



А.П. СЕНЧЕНКОВ

ТЕХНИКА
ФИЗИЧЕСКОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ

А. П. СЕНЧЕНКОВ

ТЕХНИКА ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН.
РАБОТА С ВЫСОКИМ НАПРЯЖЕНИЕМ
И ЯДЕРНЫМИ ИЗЛУЧЕНИЯМИ.
ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА



МОСКВА
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ 1983

УДК 53.08

Сенченков А. П. Техника физического эксперимента: Измерение электрических величин. Работа с высоким напряжением и ядерными излучениями. Вакуумная техника. М.: Энергоатомиздат, 1983. 240 с.

Рассмотрены вопросы создания экспериментальных устройств и методики эксперимента в области электрических измерений, техники высоких напряжений, вакуумной техники и ядерной физики.

Для научных работников и инженеров. Может быть полезна аспирантам и студентам.

Табл. 4. Ил. 145. Библиогр. 72.

Рецензент В. П. Ларионов

ПРЕДИСЛОВИЕ

Чтобы подготовить и провести хороший физический эксперимент, исследователям приходится решать разные задачи. Одной из таких задач является выбор базового оборудования, т. е. уникальных установок (реакторов, ускорителей, лазеров) и стандартного оборудования, приобретаемого именно для данного эксперимента. Задачей другого типа является создание специальных устройств, обеспечивающих проведение эксперимента. Наконец, столь же важно, уже имея подготовленный экспериментальный комплекс, в максимальной степени использовать его возможности, в ходе эксперимента все более приспособлявая оборудование к условиям работы.

В книгах, посвященных технике физического эксперимента [1—3], авторы главное внимание обращают на одно из слагаемых успеха: умение экспериментатора лично выполнить ряд операций, часто встречающихся в практике работы физической лаборатории. Это умение и сейчас следует высоко ценить; многие ученые, особенно молодые, подчас недооценивают искусство быстро, грамотно, качественно и остроумно задумать и выполнить устройство или узел прибора. Такое умение намного сокращает путь к успеху, а иногда и является его основой.

В других работах, посвященных стратегии научного поиска, конкретные вопросы, например оптимальный подход к планированию эксперимента, решаются весьма абстрактно; прочитав такую книгу, подчас чувствуешь, что ясности, как поступать в конкретном случае, не прибавилось.

Отдавая должное как технике исполнения, так и стратегическим замыслам при планировании эксперимента, автор хотел бы подчеркнуть их неразрывность. Не может быть хорошим научным стратегом ученый, достаточно детально не представляющий, что стоит за каждым из вариантов, и выбирающий или отвергающий один из них на основании личных симпатий или антипатий. Точно так же и умелец может иногда принести больше вреда, чем пользы, разрабатывая прибор, давно описанный и освоенный. Никогда не бывает так, чтобы обсуждаемое техническое решение обладало одними достоинствами. Поэтому экспериментатор должен уметь чем-то пожертвовать.

Максимально быстро и полно успех достигается теми коллективами, которые последовательно соблюдают примат цели. Наметив программу исследований, старайтесь обходиться известными приборами и техническими решениями. Эта кажущаяся тривиальность подхода, сводящаяся к простому совету без надобности не изобре-

тать велосипеды, на самом деле требует от экспериментатора глубоких знаний в самых различных областях.

В этой книге автор стремится описать базис накопленного опыта и решений, на которых строится техника современного физического эксперимента. По сравнению с другими книгами того же характера автор относительно меньше внимания уделяет искусству личного технического творчества, так как оно описано во многих специальных руководствах. Сейчас для экспериментатора очень важно предвидеть, что будет, если поступить определенным образом, как поведет себя та или иная конструкция, как выбрать оптимальный путь.

В некоторых случаях автор может быть субъективен: это неизбежно, но он ни в коей мере не хочет навязать свое мнение как «окончательную истину в последней инстанции». В то же время изложение обоснованной точки зрения, даже если Вы ее не разделяете, помогает выработать свое, тоже обоснованное решение.

Материал этой книги состоит как бы из двух частей: гл. 1, 2 и 3, особенно гл. 1, являются методическими: изложенные в них вопросы относятся к различным областям техники физического эксперимента. Гл. 4, 5 и 6 посвящены конкретным разделам: технике высоких напряжений, вакуумной технике и регистрации ядерных излучений.

Автор не ставил своей целью изложить все тонкости экспериментальной техники, да вряд ли это и возможно. Задача автора: другая — на ограниченном материале путем анализа накопленного опыта указать читателю на особенности данного раздела техники и помочь формированию самостоятельных решений: выбрать правильную стратегию, т. е. оптимально спланировать эксперимент, отбросить нерациональные и принять рациональные решения, определить базовое и стандартное оборудование из числа разработанных и выпускаемых промышленностью приборов и, наконец, помочь в поиске и осуществлении оригинальных технических решений там, где этого требуют обстоятельства.

Автор

ГЛАВА 1

СОЗДАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Существуют две главные причины, побуждающие исследователей к созданию новых экспериментальных установок: необходимость проведения конкретных, заранее запланированных экспериментов и стремление внести вклад в развитие научного приборостроения.

В первом случае установка обычно создается в единственном экземпляре и рассчитывается на проведение конкретных исследований, обслуживание конкретным персоналом, размещение в определенном помещении.

Во втором случае разработчики всегда ставят перед собой более широкие задачи и стремятся к оптимальному балансированию между чрезмерным усложнением установки и сужением ее возможностей. Естественно, общий вид создаваемых устройств, предназначенных для решения сходных задач, в первом и во втором случаях различен. Разработчики серийной аппаратуры уделяют большое внимание оптимальному подбору отдельных узлов установки, ее компоновке, внешнему виду, ресурсу работы, транспортабельности, габаритам.

Исследователи, создающие установку только для своих целей, стремятся в максимальной степени использовать имеющееся в их распоряжении или известное им оборудование и привычные технические решения. Компактности и внешнему виду уделяется гораздо меньше внимания.

Часто приходится создавать комплексные установки для решения многоплановых экспериментальных задач. В таких случаях экспериментатор, не будучи хорошо знаком с общими принципами решения некоторых аспектов задачи, при создании аппаратуры может допустить грубые ошибки, на устранение которых теряются месяцы, а иногда и годы.

Часто молодые и способные экспериментаторы работают малопродуктивно потому, что, по воле своих руководителей, пытаются решать сложные задачи в одиночку, не накопив опыта, не имея полноценного конструктивного и производственного обеспечения. В результате вместо работ по физике плазмы появляются работы по откачке вакуумных объемов, вместо работ по ядерной физике — работы по еще одному типу предусилителей, вместо работ по физике высоких давлений — работы с описанием очередной замазки

для уплотнения конусного электропровода. В некоторых случаях, например, в лазерной технике обилие вновь создаваемых доморощенных конструкций наносит реальный и значительный ущерб созданию высококачественных серийных образцов этих весьма деликатных приборов.

Пусть не сочтут автора категорическим противником полукустарных разработок (он и сам их делает). Но такие разработки, как правило, должны быть «сверхприбылью» при решении основных научных задач, а не конечной целью, иначе физик-исследователь невольно и неоправданно подменяет конструктора — создателя новой техники.

Готовясь к изучению *новых* явлений, не следует без крайней необходимости превращать свою установку в полигон для испытания *новых* насосов, вентилях, материалов, транзисторов. Используемое оборудование и материалы должны пройти испытание временем, проявить свои свойства, в том числе такие, как надежность и стабильность в рабочих условиях; они к тому же должны быть не слишком дефицитными, и тогда после создания установки основные усилия будут обращены не на поддержание ее работоспособности, а на объект исследования.

Обслуживание сложных устройств требует не меньшей квалификации, чем проведение с их помощью экспериментов, т. е. общий квалификационный уровень обслуживающего персонала должен быть сравним с уровнем подготовки экспериментаторов. Но обслуживание — менее творческая работа, чем постановка экспериментов. В результате в коллективе, вначале разумно сконструированном из физиков и инженеров, как правило, возникает непреодолимая перекачка наиболее квалифицированной части обслуживающего персонала в науку. Количество желающих поставить свои эксперименты на установках возрастает, а количество и квалификационный уровень сотрудников, призванных поддерживать установки в рабочем состоянии, падают.

Эффективность противодействия этому процессу в определенной степени зависит и от принимаемых технических решений: в частности, обслуживающий персонал легче закрепить на хорошо отработанных промышленных установках, чем на кустарных, иногда работающих лишь только в руках авторов, не имеющих полноценной технической документации и запасного оборудования.

Когда создается новая установка, то для нее нужно устанавливать свой, индивидуальный штат обслуживающего персонала. Суммарный опыт экспериментальной физики, а в некоторых случаях уже и промышленности, позволяет, при желании, достаточно объективно оценить потребность в обслуживающем персонале любой, самой оригинальной физической установки. При обслуживании установок средней сложности: масс-спектрометров, малых ЭВМ, многоканальных электронных анализаторов, ЯМР- и ЭПР-спектрометров, лазеров и др. приходится сталкиваться с недооценкой трудоемкости обслуживания и необходимой квалификации персонала. Это ведет к тому, что сложные дорогие приборы работают впол-

силы или стоят без применения, морально устаревают, демонтируются и списываются, так и не окупив затрат на их создание. Правильно поступают те руководители организаций, которые не только достают отечественное и зарубежное оборудование, но и тщательно взвешивают возможности его размещения, обслуживания.

1.1. ПЛАНИРОВАНИЕ СОЗДАНИЯ УСТАНОВКИ

Во время предварительного планирования помимо чисто научных вопросов целесообразности сооружения установки, технических характеристик, конечных целей работы должны быть поставлены следующие технические вопросы, решение которых может потребовать значительного времени:

1. Размещение установки с учетом обеспечения электропитанием, водой и т. д., и, конечно, требований техники безопасности.

2. Потребности в обслуживающем персонале соответствующей (реальной) квалификации.

3. Необходимость приобретения готовых приборов и материалов для сооружения самой установки, включая запас изделий и материалов, имеющих ограниченный срок службы, а также диагностического оборудования для налаживания и эксплуатации установки и для обеспечения требований техники безопасности.

4. Организация обучения персонала, включая самих экспериментаторов, на подходящих установках и другие формы заимствования имеющегося опыта конструирования и эксплуатации сходных устройств.

Если, как это часто бывает в науке, время дороже денег, то заказы на промышленное оборудование и материалы следует начать оформлять после эскизного проектирования, придерживаясь затем выбранной технической политики.

Чаще всего установки создают с помощью конструкторов. Это придает им более инженерный вид по сравнению с плодами сугубо личного творчества экспериментаторов, но здесь есть одна существенная опасность. В области несерийного научного приборостроения конструктор в большинстве случаев и конечную задачу толком не представляет, и традициями не умудрен. Поэтому физики, целиком доверяющие конструкторам разработку рабочих чертежей, часто затем вынуждены довольствоваться всего лишь приличным внешним видом и достаточной прочностью созданной конструкции.

Автор не берется однозначно советовать, как организовать взаимодействие с конструкторами, но сам он постоянно следит за ходом конструирования и считает себя в значительной степени ответственным за качество рабочих чертежей установки. Если, как это часто бывает, конструктор не участвует в доводке установки, испытании созданных им узлов, то он и в последующем будет многократно повторять одни и те же ошибки и неудачные решения.

Важный вопрос — какой запас по различным параметрам пла-

нирывать? Например, оценка показывает, что для исследования рассеяния атомных пучков будет нужен вакуум 10^{-6} мм рт. ст. Можно поставить обычный паромасляный насос и получить именно такой вакуум, но поставив более совершенный насос, сравнительно легко можно получить вакуум 10^{-7} и даже 10^{-8} мм рт. ст., практически без увеличения габаритов и сложности установки. Если это позволит планировать более тонкие и точные эксперименты, либо перейти к таким экспериментам в будущем — следует с самого начала заложить в установку запас по вакууму. В другом случае, например, получения высоких напряжений или давлений «запас» в целый порядок есть вещь нереальная, так как установки на 100 кВ и на миллион вольт имеют совершенно различные габариты и степень сложности. Необходимо тщательно взвесить как минимальный уровень потребностей, позволяющий приступить к успешной работе, так и возможности относительно простыми средствами повышать этот уровень в дальнейшем, добиваясь расширения возможностей установки. Общее правило можно сформулировать следующим образом: если имеются способы увеличения возможностей установки при приблизительном сохранении сроков ее создания, занимаемых помещений, характера обслуживания, то эти способы необходимо полностью использовать.

В некоторых случаях специальное оборудование и материалы можно использовать для совсем других задач, причем эффект от подобного использования по сравнению с разработкой и изготовлением самодельного оборудования бывает очень заметным. Например, мало кто пробовал приспособить силовой агрегат пылесоса в качестве газодувки для лазера на CO_2 , а между тем этот агрегат вполне работоспособен в среде не слишком химически активных газов.

Или другой пример. Как-то автору с сотрудниками понадобился синхронный двигатель довольно большой мощности, а были только асинхронные. Разобрали двигатель СД-09 (от старого самописца), поняли, чем отличается ротор синхронного двигателя от асинхронного, отфрезеровали спиральные щеки на роторе и получили синхронный двигатель.

Наша промышленность выпускает очень неплохие самописцы КСП, однако в основном с милливольтовой шкалой. Выпускает она также и хорошие фотокомпенсационные приборы Ф 116/1 и Ф 116/2, имеющие широкий диапазон чувствительности вплоть до 10^{-6} В и 10^{-9} А и выход для подключения внешнего прибора. Соединение Ф 116 и КСП позволит без разработки предусилителей наблюдать и записывать сигналы от ФЭУ (неимпульсные), сигналы от термопар любого типа, в том числе при наличии фона переменного тока, к которому Ф 116 нечувствителен.

Как оказалось, лучшим вентилятором для охлаждения анодов мощных керамических тиратронов ТГИ 1000/25 является широко известный агрегат для сушки рук. Надо лишь слегка понизить напряжение питания, и он исправно работает тысячи часов.

Разумные хозяева часто сохраняют ценные узлы демонтируемых физических установок: вакуумные камеры и агрегаты, импульсные и высоковольтные трансформаторы и др., которые могут пригодиться впоследствии или Вам, или Вашим коллегам.

1.2. ВРЕМЯ И ЗАТРАТЫ НА РАЗРАБОТКУ УСТРОЙСТВ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Часто время, которое экспериментатор затрачивает на подготовку задуманной работы, оказывается весьма большим по сравнению с временем ее проведения. Конечно, это естественно, например, в области космических исследований, где ракету или межпланетную станцию разрабатывают годы для того, чтобы она передавала основную информацию в течение месяцев, а иногда и считанных минут. Кстати, нетрудно увидеть связь между отмеченной особенностью космических исследований и их трудоемкостью и стоимостью. Вместе с тем, поскольку эта «особенность» начинает становиться правилом во многих земных областях, стоимость новой научной информации быстро растет, а количество ее, так сказать, с квадратного метра научного учреждения, уменьшается.

Быстрое и правильное решение технических вопросов, умение избегать лишнего, не жертвуя возможностями установки, требует от экспериментатора зрелости, когда за кажущейся легкостью, а иногда и тривиальностью решений стоит большой опыт, огромный багаж наигранных комбинаций и тренированная мысль. Всякая «красивость» нового узла в установке должна быть оправдана, ибо его придется создавать и отлаживать с большим трудом, всякая «очевидность» решения должна быть обдумана прежде всего с точки зрения возможности нежелательных взаимодействий различных элементов и условий в установке.

Когда однажды автор распорядился убрать из лаборатории рентгеновский выпрямитель, использовавшийся для питания установки, и заменить его небольшим специально намотанным трансформатором и компактным полупроводниковым выпрямителем, установка сразу как-то потеряла свой «высоковольтный» вид, свою внушительность. Ее надежность резко возросла, она больше не выходила из строя, но у посетителей уменьшилось почтение к технике проводимой работы, зато возрос интерес к ее существу.

Каждому экспериментатору, когда он приобретает опыт творчества, обычно сопутствует свой стиль работы. Некоторые не могут приступить к работе, не продумав ее до последнего винтика, другие, наоборот, торопятся заказать главные материалы и приборы в расчете на то, что со временем додумают остальное. Иногда встречаются работники, хронически не способные предвидеть поведение узлов установки даже в не очень сложных условиях. Их главный девиз — опыт покажет. Такой специалист с удивлением обнаружит, что растяжение стержня сопровождается его поперечным сжатием, пробой в вакууме — порчей вакуума, трение в высоком вакууме — сильнейшим износом, а протекание тока в 500 А — появлением магнитного поля.

Экспериментаторы, не умеющие предвидеть хотя бы в первом приближении поведение своих установок, обычно годами что-то переконструируют, переставляют, переключают и очень ревниво относятся к свободе переставлять и переключать так, как им хочется. Если показать им литературу, в которой давно предсказаны и описаны все результаты их действий, Вы обычно услышите в ответ разговоры об особых условиях их эксперимента, не подкрепленные действительно грамотными соображениями.

Встретившись с такой проблемой, научному руководителю нечасто удастся

повысить подлинную эффективность труда, и автор тоже не может сказать, как безболезненно поправить такую ситуацию, если она возникла. Однако из своего личного опыта он сделал один бесспорный вывод: не поручайте молодым сотрудникам «с ходу» создание сложных установок. Пусть они проявят себя под руководством более опытных товарищей, создадут отдельные узлы и непременно доведут их до работоспособности, убедитесь в том, что молодой сотрудник или инженер способен предвидеть, способен по-деловому воспринять замечание, совет, критику проекта его детища. Если же, вопреки собственному мнению и под давлением обстоятельств, поручить вести работу сотруднику, не обладающему необходимыми качествами, то с большой вероятностью можно создать в коллективе некое удельное княжество с натуральным хозяйством, малоэффективное и почти неуправляемое.

Стиль, методы, характер подготовки экспериментов являются одним из определяющих условий высокой научной отдачи.

1.3. НЕОБХОДИМОСТЬ И МАСШТАБЫ АВТОМАТИЗАЦИИ

Автоматизация экспериментальных установок связана со стремлением повысить их надежность, облегчить управление, повысить качество эксперимента и увеличить объем информации.

В той или иной степени автоматизация в настоящее время осуществляется всегда. В простых случаях автоматизация не является трудоемкой операцией, в более сложных создание соответствующих автоматических систем оказывается достаточно серьезным делом [4]. Часто такое усложнение установки представляется оправданным и даже неизбежным, но иногда необходимость более высокой автоматизации является спорной. Много зависит от квалификации экспериментатора в области электроники, его умения работать на ЭВМ. Важность этого вопроса требует пристального рассмотрения каждой отдельной ситуации, здесь же автор, основываясь прежде всего на собственном опыте и представлениях, даст лишь некоторую классификацию задач автоматизации и обратит внимание на характерные положительные и отрицательные моменты.

Автоматизация поддержания параметров

Этот вид простейшей автоматизации установок очень распространен: например, стабилизация питания электронных схем и температуры различных электронагревательных устройств.

Одним из важнейших вопросов при создании любого стабилизатора является обеспечение устойчивости к автоколебаниям во всем динамическом диапазоне. Стабилизаторы напряжения, собранные по обычным схемам, очень часто оказываются неустойчивыми при включении емкостной нагрузки. Иногда эта неустойчивость проявляется в возникновении автоколебаний достаточно высокой частоты, полностью не нарушающих работу стабилизатора. Поэтому любой, даже промышленный стабилизатор напряжения или тока при включении емкостной нагрузки следует проверить с помощью ос-

циллографа на отсутствие автоколебаний. При возникновении колебаний следует отделить заряжаемый конденсатор от стабилизатора небольшой индуктивностью или сопротивлением. При создании стабилизаторов и вообще блоков питания на электронных лампах не следует, как в некоторых промышленных приборах, жалеть лишний тумблер на отдельное включение анодного напряжения. Одновременное включение накалов и подача на них анодного напряжения, особенно при включенной нагрузке, приводят к искрению и разрушению катодов, к появлению сложных неустановившихся процессов в схемах. Желая убедиться в том, что это не лишнее предостережение, могут осмотреть катод кенотрона 6Ц5С из широко распространенного стабилизатора УИП-2, если он проработал хотя бы 100 ч при многократных включениях.

Вообще, чем мощнее электровакуумный прибор, тем более аккуратного обращения он требует.

Если Вы установили в схему электронную лампу, несколько лет пролежавшую на складе, не торопитесь подавать на нее полное анодное напряжение — в ней плохой вакуум! Вначале пусть лампа и внутренние геттеры прогреются от катода, затем постепенно подавайте напряжение, начиная от $1/2$ или $1/3$ допустимого.

Напряжение накала почти никогда не стабилизируется и редко контролируется, между тем часто хорошей работы сложных ламповых устройств нельзя достичь без стабилизации тока накалов. При этом следует помнить: недокал катода электровакуумного прибора при большом токоотборе очень быстро выводит прибор из строя [5]. Оставление ламп на длительное время в дежурном режиме, при включенном накале и выключенном анодном напряжении, плохо отражается на их работе. Вакуум и эмиссионная способность катода падают, резко возрастают сеточные токи, так что лампа может потерять управляемость. После включения анодного напряжения свойства лампы обычно постепенно восстанавливаются.

При создании стабилизаторов на транзисторах существуют две главные опасности: импульсная перегрузка по току или напряжению, способная немедленно вывести транзистор из строя, и потеря управляемости, особенно германиевыми транзисторами, при их нагреве под нагрузкой. Для борьбы с импульсными перегрузками, во-первых, следует по возможности не подходить близко к предельным параметрам транзистора, во-вторых, на стороне нестабилизированного напряжения можно включить дополнительное омическое сопротивление, ограничивающее ток, либо применить более сложную электронную систему ограничения максимального тока. Для предотвращения попадания недопустимого напряжения из питаемой схемы в стабилизатор (что бывает в импульсных схемах) можно в необходимых случаях предусматривать установку на выходе ограничивающих стабилитронов.

Потеря управления (неуправляемое открытие) транзисторов при перегреве в экспериментальных схемах встречается достаточно часто. Если транзистор правильно установлен на радиаторе, не перегревается, но теряет управление задолго до достижения предельных параметров, его следует заменить. Любой стабилизатор перед началом его эксплуатации обязательно следует испытать в режиме, несколько превышающем максимальный рабочий режим, в течение достаточного

времени. Несоблюдение этого простого правила, а также установка групп транзисторных блоков питания в плохо охлаждаемых местах ведут к ненадежной работе гораздо более сложных устройств.

Особо следует остановиться на стабилизации высоких напряжений — выше 20—30 кВ. Трудность стабилизации высоких напряжений состоит прежде всего в создании достаточно точного делителя.

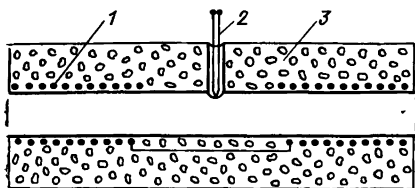


Рис. 1.1. Схема расположения нагревательных обмоток и термопары трубчатой лабораторной печи:

1 — нагреватель; 2 — термопара; 3 — теплоизоляция

Если вплоть до нескольких тысяч вольт можно применить манганиновые микропроволочные резисторы делителя и не бояться искажения тока делителя утечками короны и поверхностными токами, то при десятках киловольт приходится использовать угольные высокоомные резисторы, которые менее стабильны, а ток делителя искажается, кроме того, утечками коронного

го разряда. В некоторых случаях, особенно если используются не специальные высоковольтные, а обычные резисторы (из учета только допустимой мощности), поверхностные утечки через спиральную проточку резистора вначале разрушают его защитное лаковое покрытие, а затем и угольный слой. Один из простых и эффективных способов улучшения работы высоковольтного делителя — запайка гирлянды резисторов в стеклянную ампулу, заполняемую электропрочным газом (SF_6 , фреон-12), либо чистым сухим трансформаторным маслом.

Многие электропечи имеют устройства температурной стабилизации контактного типа. Нагревательный элемент таких печей отключается контактным устройством по достижении заданной ЭДС термопары или по сигналу другого датчика температуры и вновь включается при уменьшении ЭДС на небольшое значение. В связи с этим температура таких печей колеблется с определенным периодом (обычно 1—10 мин) и амплитудой, которая приблизительно равна области нечувствительности схемы сравнения, а иногда может быть существенно больше. Поскольку это обстоятельство, характеризующее качество работы схемы регулирования, является очень важным, остановимся на нем подробнее.

На рис. 1.1 показана схема расположения нагревательных обмоток и термопары одной из распространенных лабораторных электропечей, рассчитанной на температуру до 1200° С.

Пусть требуемая температура равна 700° С. После включения печи нагреватель, имея большой запас мощности, быстро повышает температуру прилегающих к нему областей, а центральная часть и термопара существенно отстают по температуре от наиболее горячих частей. В момент первого достижения термопарой температуры 700° С и отключения нагревательных элементов наиболее го-

рачая зона рабочей области печи будет иметь температуру 900—1000 °С. После отключения нагревательных элементов волна более высокой температуры расплывается по длине, повысив температуру в центре печи приблизительно на 100 °С. Затем последует общее охлаждение печи, и она войдет в стационарный режим, характеризующийся пульсациями температуры на уровне 1—2 %, а в зоне нагревателей до 10 %, так как каждое последующее включение нагревателей сказывается на температуре термопары лишь через определенное время. Если пульсации температуры нежелательны, требуемая температура далека от предельной, лучше снизить напряжение питания нагревателей (но не схемы регулирования!) с помощью лабораторного автотрансформатора.

Стремление повысить точность стабилизации часто ведет к возникновению автоколебаний. Это связано с большой крутизной характеристики регулирования, необходимой для достижения высокой точности. В результате малое отклонение стабилизируемого параметра вызывает большую (и обязательно запаздывающую во времени) реакцию исполнительской части схемы стабилизации. Именно запаздывание реакции, наличие зоны временной нечувствительности ведет к возникновению колебаний.

Опыт автора показывает, что практически всегда удается уничтожить автоколебания системы стабилизации, сохранив ее высокую чувствительность. Для этого следует руководствоваться следующим правилом: время реакции измерительного (сравнивающего) элемента схемы стабилизации должно быть больше времени реакции ее исполнительной части, с учетом нагрузки. Например, на рис. 1.2 показана схема обычного транзисторного стабилизатора напряжения. При включении в эту схему емкостной нагрузки C_H схема легко возбуждается. Возбуждение может быть снято включением в цепь базы транзистора сравнивания замедляющих RC -элементов, снижающих частотный предел стабилизации ниже частоты возникающих автоколебаний.

Иногда в лабораторной практике, например при выращивании кристаллов или изучении фазовых переходов, необходимо поддерживать температуру с очень высокой точностью. В этом случае использование схемы, предусматривающей включение и отключение нагревательного элемента, практически недопустимо. Недопустимо такое включение и в случае высокотемпературных вакуумных печей с малой инерцией. Инерционность исполнительной части электропечей определяется чаще всего временем прохождения температур-

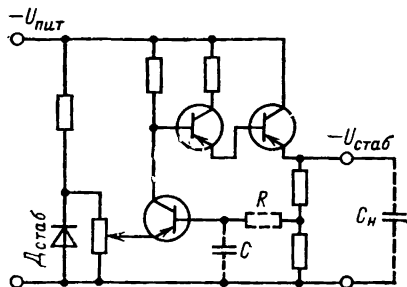


Рис. 1.2. Схема транзисторного стабилизатора напряжения, иногда возбуждающаяся при включении емкостной нагрузки. Возбуждение устраняется сужением полосы пропускания стабилизатора с помощью замедляющей RC -цепочки

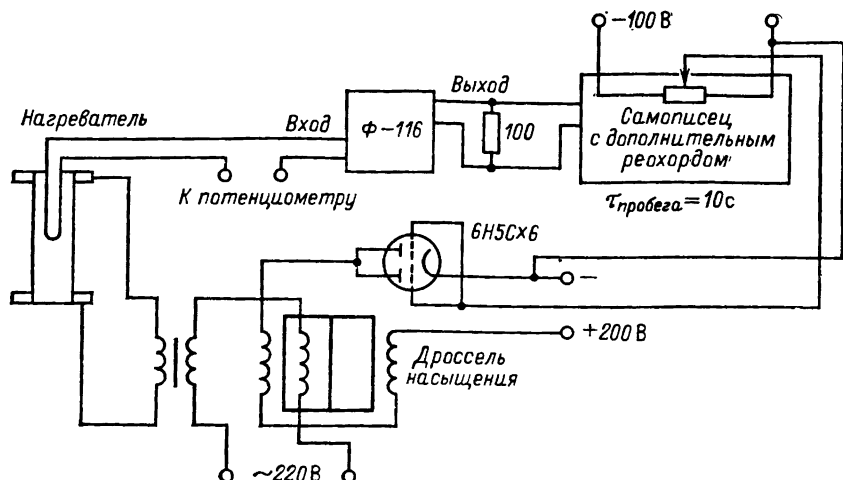


Рис. 1.3. Структурная схема точного регулирования температуры небольшого нагревателя, работающего в камере высокого давления при температуре до 2000 °С

ной волны от нагревателя к термопаре. Для предотвращения автоколебаний инерция схемы регулирования должна быть больше времени реакции нагревателя.

На рис. 1.3 приведена структурная схема для точного регулирования температуры, которую автор с сотрудниками использовал для поддержания в камере высокого давления температуры до 2000 °С с погрешностью 0,1 % [6].

В качестве элементов этой схемы были использованы серийные приборы. Сигнал от термопары, после вычитания из него постоянной составляющей с помощью стандартного потенциометра (для повышения точности), подается на фотокомпенсационный гальванометр, где он усиливается и освобождается от наводок переменного тока, весьма существенных для термопар, так как они находятся в зоне мощных токов и внутри материалов, всегда слегка проводящих при высоких температурах.

Усиленный и отфильтрованный сигнал управляет кареткой самописца, используемого главным образом для замедления реакции системы и предотвращения колебаний; вдоль направляющей каретки расположен специально установленный манганиновый реохорд, скользящий контакт которого расположен на каретке самописца, и полученный сигнал управления (амплитудой до 100 В при токе примерно 1 мА) совершенно достаточен для надежного регулирования любого исполнительного устройства (в этой схеме через лампы 6Н5С регулировался дроссель насыщения).

Изменение параметров по заданной программе

Этот вид автоматизации применяют достаточно часто. Примерами могут быть: запись энергетического спектра с помощью одноканального анализатора, запись оптических спектров при скани-

ровании длины волны, масс-спектров и т. д. Обычно при достаточной (или достижимой) стабилизации всех остальных величин производится монотонное, практически линейное во времени изменение главного параметра, а измеряемая величина записывается самописцем или воспроизводится на экране осциллографа в функции времени, которое выступает как неявный параметр эксперимента. В хороших промышленных приборах шкала X самописца прямо связана с главным параметром и время не определяет характер записи, а реверсирование записи не представляет затруднений.

Обычно при таком линейном во времени сканировании исследуемых величин качество получаемой информации не отвечает предельным возможностям используемой экспериментальной техники. Для полного использования таких основных параметров приборов, как разрешающая способность и чувствительность, обычно находящихся в противоречии друг с другом, на самом деле требуется для каждого значения сканируемого параметра, например длины волны, наилучшим образом подбирать рабочие константы прибора: ширину щелей или энергетических интервалов, а также эффективную толщину образцов и др. Кроме того, у обычно используемых самописцев по оси X довольно высокая погрешность и ограниченная разрешающая способность (порядка 1000 линий при длине записи 500 и даже 1000 мм). Например, фотография линейчатого оптического спектра, снятая при ширине щели 10—20 мкм, позволяет разрешать до 50 линий на 1 мм. Чтобы записать на самописце, учитывая разрешение прибора, одну строку спектра, снятую на пластинку 13×18 см, пришлось бы сделать запись длиной около 10 м! К этому следует добавить, что при записи линейчатых спектров, все равно, оптических, энергетических или ЯМР, подавляющую часть времени прибор будет работать в режиме записи шумов, т. е. непродуктивно.

Из-за этих ограничений ряд фирм в последние годы выпускает приборы, у которых в той или иной степени устранены некоторые недостатки режима неизбежной непрерывной записи. Иногда, пользуясь относительным удешевлением миниатюрной вычислительной техники, ее применяют, например, для записи спектров методом Фурье-преобразования, для получения спектров методом многократного прохождения с последующей машинной обработкой и выдачей усредненного результата.

Однако эти усовершенствования, безусловно, улучшающие качество получаемых результатов, все же далеки от того, чтобы в режиме автоматической записи реализовать все аналитические возможности прибора.

Если рассмотреть, например, обычную запись сложного ЯМР-спектра, то вначале всегда спектр просматривается в режиме достаточно быстрого сканирования магнитного поля с низким разрешением по всему ожидаемому интервалу полезной информации. Затем выявленные линии вновь записываются, уже в режиме высокого разрешения, с отсчетом положения линий от выбранных линий сравнения и анализом их тонкой структуры, что обычно требу-

ет от оператора значительного времени, высокой квалификации и пока что отнюдь не является простой, как говорят «рутинной», процедурой. То же самое можно сказать и о расшифровке тонкой структуры или изотопических сдвигов в линейчатых оптических спектрах, где вначале снимают (с помощью фотопластинок или самописцев) обзорные спектры, а затем с помощью спектроскопии высокого разрешения специально для каждой линии, выбирая режим ее обследования, добиваются удовлетворительных результатов.

В принципе, конечно, можно представить себе автоматизацию и такой сложной, многоступенчатой программы исследования. Можно использовать спектрограф в режиме широкой щели при быстрой записи, а при выходе на линию автоматически сужать щель и замедлять скорость записи, можно, наверное, даже автоматически переходить на исследование выбранной линии спектра с помощью интерферометра, однако подобная автоматизация представляется автору целесообразной и эффективной не более, чем автоматизация управления автомобилем на проселочной дороге. Сегодня понадобилось исследовать тонкую структуру, а завтра кратковременные процессы. Вручную Вы справитесь, имея достаточный опыт, за одну-две недели с полным обследованием нескольких десятков линий оптического спектра, десятком ЯМР- или масс-спектров. Если же Вы начнете осуществлять программу сложной «комплексной» автоматизации, то рискуете превратить ее в самоцель, забыв о том, что, собственно, собирались с ее помощью исследовать.

Автоматизация, особенно с выходом на цифровую печать, содержит серьезный недостаток — опасность неконтролируемого получения ошибочных результатов. Конечно, возможность неконтролируемой, находящейся за пределами видения или интуиции экспериментатора серьезной ошибки существует всегда. Однако простой пример покажет, насколько возрастает эта опасность при цифровой автоматизации.

Обычный, не сверхавтоматизированный, масс-спектрометр записывает спектр на самописец и имеет разрешение $M/\Delta M \approx 1000$. Если на таком приборе проводится анализ изотопного состава средних и тяжелых элементов, таких, как железо, ртуть и др., то всегда есть опасность, что в образце кроме самого вещества содержатся примеси углеводородов с той же атомной массой, что и анализируемые элементы. В этом случае запись масс-спектра за счет существующего дефекта масс выглядит несимметрично. Опытный оператор немедленно фиксирует асимметрию наблюдаемой линии, свидетельствующую о загрязнении образца, и результат отбраковывается или корректируется.

Если же Вы усовершенствовали масс-спектрометр таким образом, что он стал фиксировать высоту пика над фоном с помощью цифрового вольтметра, автоматически вводить спектр масс в вычислительную машину и печатать процентный состав образца в шкале спектра масс, то прибор уже не будет позволять следить за качеством образца, будет потеряна ценная информация, качество ана-

лизмов не улучшится, а ухудшится. Все сказанное не означает, что автор призывает не покупать и не делать масс-спектрометры со встроенными ЭВМ и числовым выходом информации. Но такой прибор, как и самолет, должен иметь «выключатель автопилота», т. е. нормальные удобные рукоятки ручного управления и приборы контроля, которыми можно воспользоваться, если случай нестандартный, а таких случаев в науке всегда хватает. Если же прибор, в угоду компактности и блестящему внешнему виду, сделан так, что может выдавать результаты только в числовой форме, а самописца лишен, или ЯМР-спектрометр может выдать спектр только после фурие-преобразования, а обычную запись выдать уже не может — здесь автор не будет выражаться уклончиво — он против: использования таких сверхавтоматизированных приборов. Такая техника отдаляет от экспериментатора объект исследования, создает обманчивую иллюзию, будто лаборант низкой квалификации с помощью супертехники может решить задачу быстрее и безошибочнее, чем ее решали ветераны экспериментальных батальонов на обычных добротных приборах высокого разрешения.

Автоматизация защиты установок

Превышение допустимых параметров тока, напряжения, давления, температуры может в считанные секунды вывести ценные узлы установки из строя, угрожать безопасности персонала и помещений. В этом отношении лабораторные установки отличаются от промышленных только тем, что всякого рода отклонения от режимов, замыкание, разрывы, перегревы происходят в них чаще.

Иногда для питания многих вторичных цепей изготавливают один общий силовой трансформатор. В таком случае одного предохранителя на первичной цепи недостаточно: он не отключит цепь при замыкании одной из маломощных вторичных обмоток.

Пусковой ток цепей питания накалов, а также выпрямителей с мощными фильтрами, электродвигателей и др. может в 5—10 раз превышать рабочий ток. Для пропускания пускового тока при достаточной чувствительности плавкий предохранитель должен обладать тепловой инерцией. В этом отношении свинцовая проволока, применяемая в заводских предохранителях, в несколько раз лучше медной, подчас впаиваемой некоторыми экспериментаторами в сгоревший предохранитель.

Если для зарядки конденсатора мощного фильтра инерция обычного предохранителя мала, можно использовать в качестве предохранителя еще более инерционные угольные резисторы небольшого номинала. Такой резистор, включенный последовательно с диодом выпрямителя, ограничит к тому же и пусковой ток.

Защищать плавкими предохранителями следует только маломощные однофазные цепи. Защита трехфазных или мощных цепей производится с помощью установки стандартных автоматов отключения.

Вблизи установок, которые могут выйти из строя при перегреве или опасны в пожарном отношении, следует располагать тепловые реле или пожарные датчики, разрывающие контакты пусковой цепи.

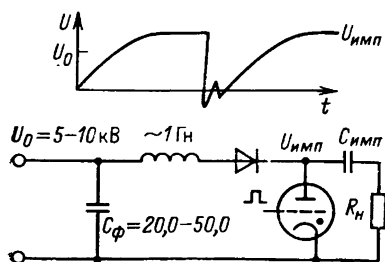


Рис. 1.4. Тиратронный модулятор с зарядным дросселем

В современной лаборатории часто используются батареи импульсных конденсаторов, разряжаемых через тиратрон. Питаются такие системы от мощных выпрямителей со сглаживающими фильтрами, от которых зарядная цепь тиратрона отделена дросселем (рис. 1.4).

Если после импульсного разряда через тиратрон он не успевает восстановить электрическую прочность, на него через омическое сопротивление дросселя разряжается вся емкость фильтра; высокое напряжение при этом отключается токовой защитой и его приходится каждый раз после такого пробоя медленно повышать до нормального уровня.

Чтобы избежать этого, можно последовательно с зарядным дросселем включить мощный тетрод или пентод, запирающийся в момент неконтролируемого пробоя тиратрона. Генераторно-модуляторные лампы, например ГМИ-90, способны

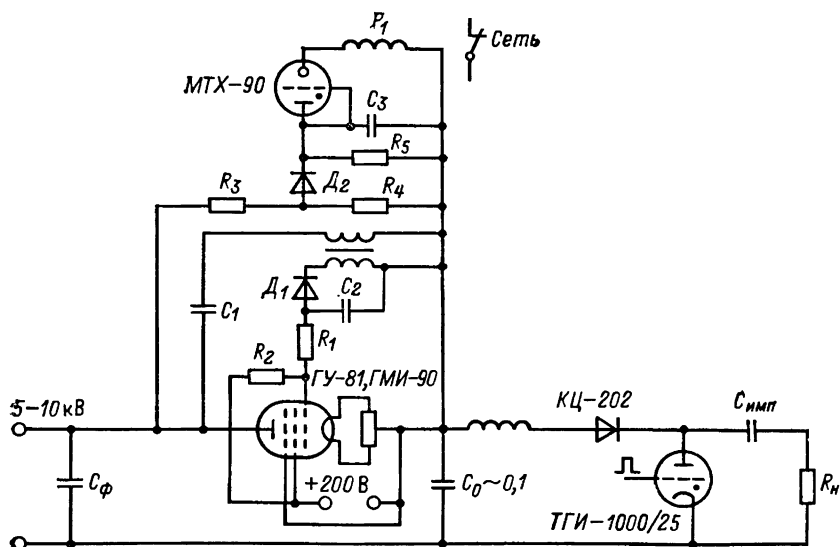


Рис. 1.5. Тиратронный модулятор с зарядным дросселем и блоком электронной защиты тиратрона

пропускать средний ток до 1 А при напряжении на экранной сетке и аноде всего 150—200 В, а при пробое тиратрона выдерживают в запертом положении напряжение до 30 кВ, отсекая импульсную цепь от конденсатора фильтра (рис. 1.5).

Элементы сеточной цепи служат в этой схеме для обеспечения запираания лампы при единичном пробое тиратрона, а также отключения электропитания при слишком частых пробоях.

Еще один часто встречающийся случай связан с пробоем трубки высоковольтного ускорителя. При таком пробое подчас портится вакуум и слишком быстрое восстановление напряжения нежелательно. Автору приходилось защищать от пробоев небольшой электростатический генератор. Защита была сделана по принципу задержки подачи напряжения на зарядную гребенку транспортера на несколько секунд после пробоя. Таким образом, трубка после пробоя успевала откачаться, а сами пробои не могли происходить слишком часто, что позволяло оставлять генератор на некоторое время без присмотра.

Автоматизация защиты не обязательно связана только с электротехническими задачами. Широко используется, например, защита по подаче охлаждающей воды; отечественная промышленность выпускает для этой цели специальные реле давления. Во многих случаях целесообразно применять автоматические клапаны для защиты вакуумных систем, прежде всего диффузионных насосов, от большого количества газа при аварии вакуумной системы.

Особого внимания заслуживает тщательное продумывание вопросов автоматизации защиты при работе с радиоактивностью и токсическими веществами.

Если стержни аварийной защиты изучаемой реакторной критической сборки должны быть при входе персонала в помещение опущены, то надежнее всего так построить защиту, чтобы до выхода всех людей из помещения стержни нельзя было поднять. Использование готовой системы тревожной сигнализации позволит Вам быстро решить эту задачу.

Если вход в бокс недопустим при определенном положении радиоактивного источника, то можно написать это на двери или использовать световую сигнализацию, но гораздо надежнее установить не слишком сложные приспособления, блокирующие либо двери, либо источник.

Часто бывает, что защита работает не слишком хорошо, затрудняет наладку установки, и защиту отключают или блокируют. Автору, как и многим читателям, известны последствия таких действий, иногда самые печальные, поэтому, если защита связана с безопасностью персонала, а не только установки, она должна входить в самый первый пусковой комплекс, работа без системы защиты не должна допускаться.

Иногда пересмотр технического решения может снять вопрос о защите по существу. Например, если для получения напряжения 20—30 кВ применять рентгеновский трансформатор с выпрямителем, необходимо ограждение, автоматические заземлители и т. п. Но такое же напряжение при токе 1—5 мА можно получить от схемы типа телевизионной строчной развертки и питания кинескопа. В этом случае защита такого масштаба в сущности не нужна, так как в конденсаторах нет большого запаса энергии, и ток короткого замыкания этой схемы не опасен для жизни.

Выпускаемые промышленностью искровые теченскатели, генерирующие импульсы напряжения до 35 кВ, системы зажигания двигателей, школьные электрофорные машины, медицинские аппараты Д'Арсонваля, приборы ночного видения не имеют защиты от высокого напряжения или имеют лишь ограниченную защиту, потому что мощность и предельная сила тока этих устройств не опасны для жизни.

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

2.1. ХАРАКТЕР ПОГРЕШНОСТЕЙ И ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И РЕГИСТРИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Требования к точности эксперимента и подход экспериментатора к вопросам обработки данных и оценке погрешностей влияют на выбор средств измерения и регистрирующих устройств, на подход к конструированию установки.

С точки зрения происхождения погрешностей регистрирующие параметры можно разделить на гладкие и статистические. Погрешности измерения статистических величин складываются из статистической, присущей самому объекту наблюдения, и аппаратных погрешностей, а погрешности измерения гладких величин носят только аппаратный характер. В [7] вполне разумно введена также категория промахов, т. е. грубых ошибок, связанных со сбоями аппаратуры, неправильной записью и т. п. При современных методах массового получения и обработки информации с появлением промахов обязательно нужно считаться.

Проще всего анализировать погрешность, когда речь идет о недостаточной статистике дискретных событий типа счета элементарных частиц или флуктуаций очень малых токов. Если за характерное время реакции прибора на вход поступает n событий, то абсолютная погрешность будет равна \sqrt{n} , а относительная $1/\sqrt{n}$. Тем не менее и в этом случае могут быть допущены неправильные оценки. Приведем два примера: поток световых квантов, падающих на фотокатод ФЭУ, равен $n_{\text{ф}}$ фотонов в секунду, следовательно, при времени реакции 1 с погрешность будет $\sqrt{n_{\text{ф}}}$, но мы не учли, что эти кванты статистически порождают существенно меньший дискретный поток фотоэлектронов с катода, и главная статистическая погрешность будет связана именно с этим минимальным потоком $n_{\text{эл}} = n_{\text{ф}}k$, где k — квантовый выход фотокатода, равный 0,1—0,3 для сурьмяно-цезиевого или мультищелочного катода и всего 0,01 для кислородно-серебряно-цезиевого.

Встречаются схемные ошибки при конструировании интеграторов импульсов, приводящие к тому, что на нарастание потока импульсов интегратор реагирует быстрее, чем на уменьшение. Такой прибор будет завышать показания при счете статистически распределенных импульсов по сравнению с регулярной последовательностью.

Поскольку статистические колебания содержат полный спектр частот, иногда есть реальная опасность раскачки механической части прибора на его резонансной частоте и ухудшения качества показаний. Автору приходилось наблюдать резонансную раскачку спидометров при определенной скорости автомобиля, раскачку метеорологического измерителя скорости ветра, электромагнитных приборов, например чувствительных низкочастотных гальванометров шлейфовых осциллографов, очень нуждающихся в правильном демпфировании.

Помимо статистических флуктуаций самой измеряемой величины погрешности могут быть вызваны посторонними сигналами — наводками. Происхождение наводок далеко не всегда удается установить, и борьба с ними при регистрации малых сигналов бывает достаточно сложной, а оценка вносимой погрешности — затруднительной. Если бы наводки имели постоянный уровень, не зависящий от сигнала, то выделение сигнала не представляло бы большого труда, как это и

бывает, например, при регистрации радиоактивности источника на фоне космического и постороннего излучения. В этом случае добавление источника практически не меняет фон, и оценка чистого сигнала сводится к двум измерениям — с источником и без источника. Напомним, что для получения наилучшей статистической точности в течение заданного времени время счета фона должно быть в $\sqrt{n_{\text{сигн}}/n_{\text{фон}}}$ меньше, чем время счета сигнала.

Часто фон является побочным проявлением сигнала; особенно это относится к импульсной технике, где сигналы идут почти одновременно с главным импульсом, порождающим как полезный сигнал, так и большинство наводок. Подчас практически невозможно создать датчик, не принимающий фоновых сигналов, однако вполне реально создать два датчика с разным отношением сигнал/фон. Тогда, вычитая с соответствующими коэффициентами сигнал более чувствительного к фону датчика из сигнала датчика, менее чувствительного к фону, можно получить запись чистого сигнала. Это приводит к быстрому успеху, например, в случае отстройки с помощью двух направленных антенн от мешающей станции, так как, во-первых, сигналы станций совершенно независимы и, во-вторых, самый факт подавления наводки легко диагностируется по чистому приему заданной программы. И в физических измерениях, когда достаточно хорошо известны (с точностью до константы) форма и временная привязка сигнала и фона, и они существенно различаются (хотя бы сдвинуты во времени), это обстоятельство позволяет достаточно легко выделить фоновую компоненту либо убедиться в эффективности ее подавления.

Приведем пример простого выделения фона. Пусть мы регистрируем импульс лазерного излучения, а фоном являются наводки от мощного электрического разряда. Убрать эти наводки — дело очень сложное, но зато убрать лазерный импульс — световой сигнал — чрезвычайно просто. Таким обращенным решением задачи тоже не следует пренебрегать.

Иногда сами понятия сигнала и фона трудноразделимы. Классический пример — отделение термоядерных нейтронов от нейтронов, образовавшихся за счет тех же реакций, но не в термической плазме, а в ускоренных в разряде пучках.

Перейдем теперь к погрешностям приборов, регистрирующих гладкие физические величины. Будем дальше считать, что гладкая величина сама по себе стабильна с большей точностью, чем это могут выявить наши измерительные возможности.

На отечественных приборах всегда указывают класс точности. Иногда аналогичные обозначения имеются и на зарубежных приборах. Полная погрешность прибора такого типа складывается из следующих компонентов:

- 1) неточности установки чувствительности прибора;
- 2) нелинейности прибора, делающей чувствительность зависящей от показаний;
- 3) трения в приборе, приводящего к негладкости реальной кривой и наличию гистерезиса и области нечувствительности.

Эти факторы сказываются в каждый момент времени. Кроме того, с течением времени с изменением температуры и ориентации прибора все эти характеристики могут несколько измениться.

Очевидно, что точность отсчета прибора никогда не может быть выше параметров, определяемых трением, магнитным и механическим гистерезисом. Эти же параметры определяют зону нечувствительности прибора и его точность в близ-

кой окрестности любой точки шкалы, т. е. постоянство и наблюдаемость производной. Для приборов среднего класса трение и гистерезис на малом интервале не превышают 0,1—0,2 % амплитуды шкалы, т. е. точность прибора в окрестности фиксированной точки шкалы и его способность к обнаружению изменений измеряемой величины существенно превышают его паспортные гарантированные параметры. Между тем во многих случаях, когда прибор используют для регулирования и наблюдения за процессом, именно способность уловить производную и определяет успех его применения.

У приборов с подвеской рамки на упругих растяжках и оптическим отсчетом гладкость хода намного выше и, если в прибор не попал и не прилип к рамке тончайший волосок, их ход в пределах шкалы является вполне гладким и безгистерезисным. Однако при значительных перегрузках, не приводящих к поломке прибора, гистерезис может стать заметным. Причиной этого неприятного явления часто бывает слабый ферромагнетизм медной проволоки либо попавшие на рамку ферромагнитные частицы. Для того чтобы уменьшить гистерезис, желательно не допускать перегрузки прибора постоянным током, и лучше, если через него не будут протекать короткие импульсы тока, даже и не выводящие его за пределы шкалы.

В отличие от аналоговых электроизмерительных приборов, гладкость хода и чувствительность которых намного лучше их гарантированной погрешности, самопишущие и цифровые измерительные приборы не обладают таким свойством. Измерение осуществляется этими приборами обычно с помощью схемы сравнения, и у цифровых приборов среднего класса погрешность «нуль-органа» обычно является основной. У самописцев основной погрешностью может быть погрешность механизма каретки из-за присущего ему трения. Поэтому обеспечиваемая хорошими самописцами погрешность 0,5 % является также и порогом чувствительности к малым отклонениям сигнала, и масштабом возможного гистерезиса.

2.2. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ ПРИ ОБРАБОТКЕ ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

В наиболее простом случае обработка данных сводится лишь к отбору наиболее удачных результатов, масштабированию, согласованию времен, вычитанию фона и, наконец, расчету на основе первичной информации измеряемых физических констант или параметров. Осуществить методически правильный, объективный отбор информации достаточно сложно. Бывает, что из десяти экспериментов лишь три-четыре — удачные, а остальные, проведенные в сходных условиях, — нет. Простое усреднение всех этих экспериментов не покажет той зависимости, которая проглядывается сквозь беспорядочные облака фона. Но бывает и обратное — усмотрение в малой выборке некоторой микрзакономерности, на самом деле не существующей или не доказываемой этой выборкой. В общем виде «правила хорошего тона» при обработке информации сформулировать невозможно, в этом смысле экспериментатор должен воспитать себя сам.

В более сложном случае физическая закономерность хотя и просматривается на основе первичной информации, но нечетко и неуверенно; количественная оценка наблюдаемого явления без обработки информации затруднительна.

Может оказаться, что серьезная обработка информации приведет к открытию явления, без такой обработки незаметного, хотя и ожидаемого. История физики хранит много примеров такого рода: вычисление орбиты Нептуна по от-

клонению положения Урана от расчетного; открытие возможности создания ахроматических объективов (Ньютон полагал, что это невозможно, считая дисперсию пропорциональной коэффициенту преломления, и только измерения параметров разных сортов стекла показали ошибочность этого представления); открытие масконов — гравитационных аномалий в поле тяжести планет с помощью тщательного измерения параметров орбит спутников.

Наконец, обработка информации позволяет открывать совершенно новые явления. Именно при обработке информации и последующей перепроверке были открыты сверхпроводимость и сверхтекучесть гелия.

Характер обработки зависит от того, предполагает ли экспериментатор обнаружить новое явление или просто хочет «причесать» эксперимент в пределах сложившихся представлений.

Наконец, при обработке опытных данных встречаются такие варианты отношения эксперимента и теории:

1. Данные предполагают соответствующими известной формуле и на их основе определяют постоянные, входящие в формулу.

2. Ожидается проявление некоторой закономерности, по экспериментальным данным подбирается соответствующая формула, имеющая теоретический смысл.

3. В силу сложности теоретической картины процесса подбираемые формулы служат лишь для сглаживания, интерполяции, а физического смысла не имеют. Наиболее распространена в таком случае аппроксимация экспериментальных данных полиномами, проводимыми по методу наименьших квадратов. Чаще всего по этому методу проводится прямая, но бывают и случаи, когда степень такого полинома приходится подбирать, и она оказывается значительной.

Сейчас, когда возможности математической обработки данных очень велики, часто при создании экспериментальных установок заранее оговаривают задачу по обработке результатов (скорость и объем обработки, обратную связь с установкой и т. д.). Однако такой подход таит в себе опасность в ходе обработки пропустить неожиданное, не предусмотренное ее алгоритмами явление. Автор рекомендует предварительно просматривать полученные с установки необработанные кривые и массивы чисел и только потом после критического отбора и осмысливания этой информации вводить ее в ЭВМ.

2.3. ГРАФИЧЕСКАЯ, АНАЛИТИЧЕСКАЯ И МАШИННАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Достоинство графической обработки — простота, наглядность, возможность быстрой обработки почти любой закономерности; недостатки — субъективность, зависимость от личности обрабатывающего сложность оценки погрешности полученных результатов. Но все-таки не следует преувеличивать субъективность графической обработки и считать, что аналитическая гораздо объективнее. Вообще роль обработки иногда переоценивают. Чаще всего результат виден сразу, а на долю обработки приходится его уточнение и, что не менее важно и подчас более сложно, оценка погрешности.

Функциональные зависимости очень часто получают в виде кривых, снятых самописцами, шлейфовыми или электронно-лучевыми осциллографами. Иногда информацию в таком необработанном виде помещают в публикации, что создает эффект достоверности, но на самом деле это очень неудобно для читателя, так как ему за авторов приходится проставлять масштабы, уточнять положение

нуля на оси Y и т. д. Правильнее всего такие кривые представить на координатной сетке, в обозначенных масштабах, если нужно, то поместить ряд кривых на одном рисунке.

Иногда при этом, опять же для достоверности, перерисовывают весь шум аппаратуры, почти всегда присутствующий на записях. В случае, когда ясно, что шум — это шум, лучше его при обработке записи снять, не искажая сигнал. Снятие шума и помех имеет особенности. Запись может идти в линейном режиме, с регистрацией как положительных, так и отрицательных всплесков — в этом случае шум снимается проведением кривой сигнала по среднёвзвешенной траектории, так, чтобы площади разности между усредненной кривой и записью сверху и снизу совпадали бы. В случае если схема регистрации включает амплитудный детектирующий элемент, шум всегда будет добавляться к сигналу, и чтобы снять его, надо провести кривую сигнала по нижней (верхней при отрицательном выходе детектора) кромке аппаратурной кривой.

Часто импульсные кривые искажаются из-за недостаточной полосы пропускания высокочастотного тракта; спектральные кривые при наличии резонансов — из-за недостаточной разрешающей способности спектрометров. Пересчет кривых с учетом функции разрешения требует математической обработки, которую мы рассмотрим в разделе описания машинной обработки результатов, но очень часто можно ограничиться проведением реально измеренной кривой и изображением под ней в том же масштабе по оси X функции разрешения прибора иногда теоретической, иногда полученной обмером условной δ -функции — очень узкого резонанса: лазерной или γ -линии — в спектроскопии, короткого импульса — в радиоэлектронике (рис. 2.1).

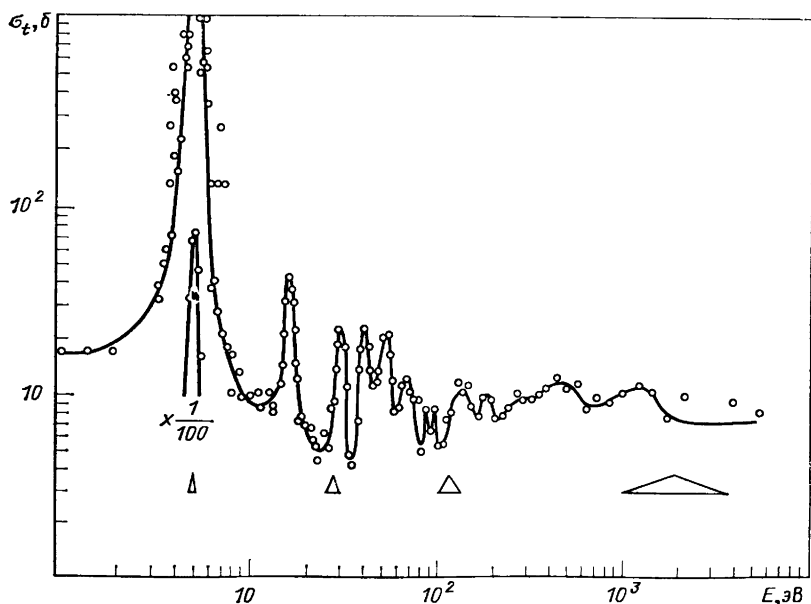


Рис. 2.1. Полное эффективное сечение серебра для нейтронов, измеренное с помощью механического селектора:

треугольники — функция разрешения прибора при различной энергии нейтрона [8]

Часто при обработке графической информации надо провести кривую через нанесенные на график точки. Типичным примером является определение периода полураспада по кривой счета активности, построенной в полулогарифмическом масштабе.

Строго говоря, прямую по полученным экспериментальным точкам нужно проводить с помощью метода наименьших квадратов, однако эту вычислительную операцию часто заменяют проведением такой прямой графически (на глаз). Автор много раз убеждался, что опытный экспериментатор проводит прямую, практически не отличимую от вычисленной, однако бывают и досадные неточности, от которых лучше предостеречь. Для проведения через группу точек прямой, достаточно хорошо удовлетворяющей условию наименьших квадратов, можно воспользоваться зрительным ощущением равенства нулю, во-первых, суммы положительных и отрицательных отклонений точек от проводимой прямой, т. е. прямая должна рассекать фигуру рассеяния точек пополам, во-вторых, прямая должна пересекать фигуру рассеяния точек вдоль главной ее оси, т. е. не должно быть компенсации, например, положительных отклонений в начале прямой отрицательными в ее конце.

Если точек достаточно много, погрешность каждой известна и после проведения прямой ясно, что точки от нее отклоняются в пределах своих погрешностей, можно довольно грубо оценить на графике допустимый разброс наклона и положения прямой. Для такой оценки разобьем все точки на две группы примерно пополам по оси X . Обе половины точек имеют два геометрических центра вблизи первой и третьей четверти кривой, и каждая содержит $n/2$ точек. Эти $n/2$ точек имеют суммарную относительную погрешность, равную погрешности каждой точки, деленной на $\sqrt{n/2}$. Поместим две таких точки с погрешностью в $\sqrt{n/2}$ меньшей в положение первой и третьей четверти кривой по оси. Допустимые положения прямой будут достаточно хорошо определяться вилкой этих двух приведенных погрешностей. Аналогично можно оценить погрешность параметра различных однопараметрических кривых: радиуса, если кривая — окружность, коэффициента при параболе или гиперболе и т. д. Если же кривая, которую графически аппроксимируют, хотя бы двухпараметрическая (например, $y = ax + bx^2$), то положение усложняется, и без математического анализа очень трудно бывает указать действительную погрешность нахождения соответствующих коэффициентов.

Перейдем теперь к математической обработке полученного цифрового материала. Естественно, вопрос этот очень сложен, по нему написано много книг [9, 10], и здесь он затрагивается лишь в той мере, в какой стоит говорить о его обратном влиянии на постановку эксперимента.

Прежде всего отметим, что погрешность есть погрешность: если бы мы ее точно знали — мы бы ввели поправку. Поэтому «вычисление» погрешности до третьего знака, как это нередко бывает, есть школярство. В основе оценки погрешности эксперимента лежит совокупность парциальных погрешностей, которые мы можем и считаем необходимым оценить. В то же время ряд других возможных источников погрешностей по ряду причин не оценивается.

Поэтому в публикациях всегда следует приводить перечень параметров, погрешности в измерении которых Вы постарались учесть, а о неучтенных погрешностях пусть уж судят читатели и критики Ваших публикаций.

Если цель эксперимента — получение достаточно точных данных, очень важ-

но заранее продумать способ обработки материала. Но надо помнить о том, что даже очень тщательная обработка не совсем доброкачественного материала может не дать хороших результатов и даже привести к «открытию» эффектов сомнительной достоверности. В этом случае уточнение эксперимента путем применения более качественного прибора или улучшения условий измерения важнее самой добросовестной обработки.

Термин «ручная» обработка как антипод «машинной» — устаревает. Микрокалькуляторы сейчас распространены повсеместно и существенно ускоряют расчеты. Имеются настольные ЭВМ с программами и математическим обеспечением, и совершенно ясно, что в ближайшие годы любой ученый сможет и будет прибегать к услугам ЭВМ требуемой мощности, когда сочтет это необходимым.

В настоящее время обработка результатов сводится чаще всего к следующим процедурам.

1. Отбор удачных экспериментов.
2. Пересчет данных к однотипным стандартным условиям и их представление в принятой системе единиц.
3. Усреднение или статистическая обработка.
4. Вычисление измеряемых физических величин.
5. Оценка погрешностей.

Про критерии отбора удачных экспериментов уже было сказано. Введение поправок на систематическую погрешность: вычитание фона, поправки на нелинейность, приведение к стандартным условиям, градуировка термометров и термопар обычно свидетельствуют о культуре экспериментатора. Не стоит отодвигать начало эксперимента очень тщательной предварительной градуировкой аппаратуры — если результат будет малоценным или придется менять приборы, труд этот пропадет. Но когда результаты получены, надо оценить их предполагаемую погрешность и позаботиться о сравнимой по точности абсолютной градуировке аппаратуры.

Для предварительной оценки случайных погрешностей, если они не чисто статистические, лучше всего провести несколько однотипных серий экспериментов, а если результаты будут различаться намного больше, чем ожидается исходя из погрешности приборов и формул статистики, — придется искать источник такого несовпадения.

Иногда точность измерения намного превосходит точность градуировки приборов, например при термометрии высоких температур, измерении сверхвысоких давлений. В таких случаях важно учесть, что возможная абсолютная погрешность не ухудшает гладкости, взаимного соответствия полученных данных. Прямое откладывание погрешности градуировки (у всех точек одного знака и пропорциональной) на графике не дает правильного представления о ее роли. Поэтому на графике или в таблицах, быть может, следует обозначать прежде всего случайную погрешность, а погрешность градуировки оговаривать в тексте либо давать в виде неопределенности масштаба по осям.

При обработке результатов измерений на ЭВМ очень важно, кто ее будет проводить. К сожалению, большинство экспериментаторов программировать не умеют и, что гораздо хуже, подчас не обладают достаточной математической культурой для корректной постановки задачи. В то же время программистов в стране хватает, казалось бы, надо поручить программисту обработку, и он ее выполнит. Но на самом деле обработку часто поручают не очень квалифицированному математику, со всеми вытекающими отсюда последствиями. Для высо-

коквалифицированного специалиста задача должна быть привлекательной, интересной и достаточно сложной. Так и получается, что тонкая коррекция орбит спутников, сверхдальняя связь при наличии помех и другие сложные задачи хорошо обеспечены машинной обработкой, а эксперименты попроще, например обработка спектроскопических данных, — гораздо хуже. Поэтому сравнительно простую обработку данных на ЭВМ экспериментатору лучше всего делать самому. Главное преимущество такого подхода состоит в том, что будет избран самый простой способ обработки и, кроме того, не будет нарушен ни в коей мере принцип персональной ответственности за полученные результаты, тем более что научиться работать на современных ЭВМ не слишком трудно. Для обработки данных лучше всего использовать базовую ЭВМ с хорошим математическим обеспечением. Некоторые экспериментальные группы стремятся купить свою малую ЭВМ, чтобы не зависеть от жесткого временного расписания базовой машины. Со временем, наверное, такой подход будет вполне оправданным, но сейчас такие машины недостаточно обеспечены стандартными программами, слишком многочисленны по типам и, главное, их не так просто поддерживать в рабочем состоянии.

Экспериментатору лучше работать на базовой машине еще и потому, что на ней работают квалифицированные математики и другие физики, которые помогут в трудную минуту.

При вводе в ЭВМ больших массивов экспериментальных точек обязательными являются программы контроля введенной цифровой информации. Обычно в машину вводят массивы чисел, представляющих гладкие кривые. Последовательность координат точек x_i должна быть по крайней мере монотонной (если только точки не эквидистантны по x), отклонение от монотонности должно фиксироваться как промах и тем или иным алгоритмом нейтрализоваться. По оси y отклонение y_i от y_{i-1} не должно превышать двойную погрешность измерений плюс произведение максимального значения производной dy/dx на приращение $x_i - x_{i-1}$. Превышение этой величины также должно нейтрализоваться алгоритмом. Автор успешно применял несколько более сложный, но более гибкий скользящий алгоритм анализа погрешностей. В этом алгоритме не закладывалось максимальное значение производной dy/dx , а бралась реальная производная, полученная самой машиной при предварительном просмотре цифрового массива. Таким образом, чем больше на данном отрезке производная dy/dx , тем менее жестким является критерий анализа погрешностей. Такой алгоритм очень удобен при обработке уравнений состояния вблизи критической точки, различных экстремумов типа резонансов и т. п.

Можно предложить еще один простой и хороший алгоритм анализа и нейтрализации промахов, пригодный для обработки кривых без узких резонансов. Вначале обработке подвергают все точки массива и по ним отыскивают константы математической формулы; затем формула табулируется, и точки, отклонившиеся дальше всех за пределы формульного описания, нейтрализуются (например, заменяются формульными для сохранения эквидистантности), после чего операция получения констант формулы повторяется. Таким путем можно реально определить все промахи, если оценивать каждый раз общую среднюю квадра-

тическую погрешность $\sum_{i=1}^m (y_i - y_{i \text{ формульн}})^2$. При удалении наиболее отклонившихся точек средняя квадратическая погрешность будет резко уменьшаться, а

удаление нормальной точки очень мало изменит эту важную характеристику приближения. Если, как, например, в спектроскопии, мы поручаем машине провести обработку линейчатого спектра вещества, то для спектра сравнения анализ погрешностей вполне возможен, ибо зависимость, описывающая координату x линии в функции λ , должна быть гладкой, и любое отклонение от такой гладкости есть погрешность в спектре сравнения по λ . Однако таблица длин волн и интенсивностей спектральных линий изучаемого объекта, которая будет машиной протабулирована, не может быть проанализирована по погрешностям, так как каждая точка этой таблицы совершенно независима от других, если спектр не образует упорядоченной последовательности.

Часто разрешающей способности приборов недостаточно для определения параметров узких линий — резонансов. Если ширина резонанса сравнима с шириной функции разрешения прибора, то с помощью математического аппарата можно при хорошей точности эксперимента воссоздать по экспериментальной истинную кривую. Экспериментальная точка кривой $\Phi(x)$ образуется из истинных точек в области $x \pm \Delta x$, определяемой функцией разрешения:

$$\Phi(x) = \int_{x-\Delta x}^{x+\Delta x} \varphi(t) f(t-x) dt,$$

где $\varphi(t)$ — неизвестная нам истинная функция; $f(t-x)$ — нормированная функция разрешения прибора. Поскольку $f(t-x) \equiv 0$ при $|t-x| > \Delta x$, это уравнение можно записать в более общем виде:

$$\Phi_{\text{эсп}}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_{\text{ист}}(t) f(t-x) dt.$$

Решение полученного интегрального уравнения, например, при гауссовой форме функции разрешения: $f(t-x) = \frac{k}{\sqrt{\pi}} e^{-k(x-t)^2}$ и представления $\Phi_{\text{эсп}}(x)$ в виде полинома (на отдельных отрезках, если резонансов несколько) вполне возможно с помощью ЭВМ. Разумеется, таким способом нельзя оценить ширину резонанса, существенно более узкого, чем функция разрешения прибора. В этом случае параметры резонанса могут быть оценены с помощью целого ряда экспериментальных ухищрений, требующих затем математической обработки. В нейтронной физике это — метод фильтров, т. е. исследование в окрестности одного резонанса пропускация образца в функции его толщины; в оптике кроме метода фильтров — различные интерференционные методы и др. В качестве примера остроумного подхода можно привести способ измерения диаметров звезд с помощью двух оптически спаренных телескопов.

2.4. ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Чем более глубокой математической обработке подверглись результаты эксперимента, тем обычно сложнее оценить погрешность параметров, полученных в результате обработки.

Главная сложность состоит в следующем. Пусть мы аппроксимировали кривую полиномом второй степени $y = a + bx + cx^2$ и нашли a , b , c с их вероятными

отклонениями. Мы можем затем аппроксимировать ту же кривую полиномом третьей и т. д. степеней, получая уже несколько другие a , b , c и дополнительно d , e и т. д. При увеличении степени полинома до разумного значения (обычно не более 10) коэффициент a флуктуирует не сильно, b — сильнее, а дальше неопределенность разложения и чувствительность к пробному изменению вводимых данных в пределах погрешностей резко возрастают. С этим и связана трудность решения таких проблем, как определение вириальных коэффициентов, потенциалов межмолекулярного и межатомного взаимодействий, зависимости ядерных сил от расстояния, восстановления прошлого или предсказания будущего состояния системы.

Высшие члены разложения очень чувствительны к малейшим изменениям формы кривой, но определяют (в шкале времени) и прошлое и будущее состояния системы.

Из сказанного следует и самый общий вывод: лучше всего устанавливать погрешность обработанных параметров по разбросу результатов при варьировании экспериментальных данных в пределах их возможных погрешностей.

Такое варьирование очень легко организовать при работе на ЭВМ. Заранее можно сказать, что при независимом варьировании каждой точки в пределах ее полной погрешности результат будет неутешительным. Это вызовет очень сильные колебания ближайших же членов высших порядков. Вот здесь и можно использовать то обстоятельство, что гладкость данных может быть много лучше абсолютных погрешностей. Например, если Вы исследуете уравнение состояния, измеряя температуру термодинамической пары, то абсолютная погрешность будет равна перепаду температур между термодинамической парой и изучаемой средой плюс погрешность градуировки; в то же время гладкость кривой, а значит, и надежность высших членов разложения могут быть гораздо лучше. Варьирование кривой с учетом как оценки ее гладкости, так и абсолютной погрешности требует, конечно, достаточной изощренности математического аппарата, однако такой подход обеспечивает получение гораздо более достоверных оценок погрешности результатов. Можно привести и противоположный пример. Если Вы снимаете кривую спада радиоактивности с помощью счета импульсов и имеете последовательность измерений n_1, n_2, \dots, n_m , то можно, обработав эту кривую, выделить ряд периодов полураспада, т. е. получить разложение

$$\frac{dN}{dt}(t) = \sum_{i=1}^{n < m} a_i e^{-\lambda_i t},$$

где dN/dt — интенсивность счета в момент времени t . Поскольку здесь погрешность каждой точки есть $\sqrt{n_i}$ и не связана с погрешностью соседней точки, то анализ достоверности a_i и λ_i придется вести произвольным варьированием n_i в пределах их возможных отклонений. Еще одно замечание об амплитуде варьирования. Если n_i — экспериментальное значение, уже содержащее отклонение $\sqrt{n_i}$, то варьируя ее в обе стороны на $\sqrt{n_i}$ еще раз, мы превышаем статистические пределы. Поэтому правильно будет, при большом количестве точек, вначале провести через массив грубо сглаженную кривую, а затем давать точкам произвольные отклонения, но не от их собственных значений, а от более достоверной сглаженной кривой.

ИЗМЕРЕНИЕ И РЕГИСТРАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

3.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ, ПОСТУПАЮЩИЕ ОТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

подавляющее большинство разрабатываемых и применяемых физиками датчиков в первую очередь оценивают по диапазону измерения, чувствительности, временному разрешению, помехоустойчивости при достаточной точности и стабильности показаний, требования к которым редко идут дальше получения погрешности 1 % [11].

Характер электрического сигнала датчика во многом определяет его последующую фильтрацию, усиление, запись и обработку. Датчик сигнала любого типа является генератором с определенным, иногда непостоянным внутренним сопротивлением. Это сопротивление, определяющее уровень шумов и помехоустойчивость, является одной из важнейших характеристик датчика.

Среднее квадратическое напряжение теплового шума, в интервале частот $\Delta\nu$ на концах проводника, активное сопротивление которого R , Ом, равно [12]

$$\Delta\bar{U}_v^2 = 4 \cdot 10^{-7} R k T \Delta\nu.$$

При обычной полосе пропускания усилителя $\Delta\nu \approx 10^7$ Гц, активном сопротивлении 50 Ом и комнатной температуре $\sqrt{\Delta\bar{U}^2} \approx 4 \cdot 10^{-6}$ В.

Ясно, что для термопары, имеющей сопротивление меньше 100 Ом и очень ограниченную из-за тепловой инерции полосу пропускания, тепловой шум практически не играет роли. Но в случае, например, применения электронных приборов, измерения эффекта Холла на полупроводниках [13] или малых ЭДС от пьезодатчиков, когда внутреннее сопротивление велико, а полоса пропускания значительна, тепловой шум может стать определяющим фактором.

Электронный прибор (лампа, транзистор) имеет в установленном для него режиме ток I при напряжении U , т. е. сопротивление $R = U/I$ (это не внутреннее сопротивление, являющееся дифференциальной величиной).

Шум таких приборов превышает шум омического сопротивления, равного R , и характеризуется эквивалентным сопротивлением (внутриламповых) шумов $R_{\text{эkv}}$. Для усиления слабых сигналов применяют специальные малошумящие типы радиоламп (меньше всего шум у триодов). Шум транзисторов в несколько раз превышает шум электронных ламп.

Для пьезоэлектрических и некоторых других приборов активное внутреннее сопротивление практически равно бесконечности, но емкостью пренебречь нельзя. В этом случае достаточно просто можно получить выражение для амплитуды теплового шума на сопротивлении $R_{\text{ш}}$, зашунтированной емкостью C . Возникает ЭДС шума $\Delta\bar{U}_{\text{ш}} = \sqrt{4 \cdot 10^{-7} R k T \Delta\nu}$, причем «генератор» ЭДС имеет внутреннее

сопротивление $R_{\text{ш}}$. Таким образом, поскольку эквивалентное сопротивление емкости равно $R_c = 1/2\pi\nu C$, генератор шума работает на это емкостное сопротивление нагрузки и

$$R_{\text{ш.экв}} = R_{\text{ш}}R_c/(R_c + R_{\text{ш}}) = R_{\text{ш}}/(1 + 2\pi\nu CR_{\text{ш}}).$$

Случай, когда надо учитывать как сопротивление, так и емкость датчика, наиболее типичен, поэтому рассмотрим влияние обоих этих параметров на амплитуду теплового шума.

Во-первых, обратим внимание, что среднее значение напряжения теплового шума на сопротивлении пропорционально $\sqrt{R_{\text{ш}}} = \sqrt{\Delta\nu T}$. Так и должно быть, ибо каждый участок R и каждый участок спектра по ν генерируют шум некогерентно, поэтому складываются, как и в волновой механике, не амплитуды, а мощности. Во-вторых, отметим, что емкость при $R_{\text{ш}} = \infty$ шума не создает. Разумеется, тогда и полоса пропускания равна нулю. Ясно, что емкость ограничивает амплитуду шумов вместе с ограничением полосы пропускания.

Таким образом, во всех случаях, когда необходимо зарегистрировать слабые сигналы, детектор сигналов должен прежде всего обеспечивать наилучшее отношение сигнал/шум. Это отношение можно улучшить, без существенного ущерба для оценки параметров сигнала, разумным ограничением полосы пропускания детектора или последующих каскадов усилителя.

Чувствительность детектора характеризует его качество недостаточно: нужно знать его внутреннее сопротивление и эквивалентное сопротивление внутренних шумов.

Если взять два детектора, то при параллельном включении сигнал останется прежним, а шум уменьшится в $\sqrt{2}$ раза, так как $R_{\text{ш}}$ уменьшится вдвое. При последовательном включении сигнал возрастет вдвое, а шум в $\sqrt{2}$ раз, т. е. эти два включения с точки зрения отношения сигнал/шум эквивалентны и обеспечивают преимущество в $\sqrt{2}$ раз перед использованием одного детектора.

Очень часто при первоначальных экспериментах не удается определить уровень шума аппаратуры — мешают наводки, о которых речь пойдет особо. Только по мере подавления наводок начинает выясняться подлинный предел чувствительности — или шум, или статистические флуктуации самой измеряемой величины.

В практике автора был случай, когда шум болометра оказался сильнее сигнала и выявить сигнал количественно по осциллограммам оказалось невозможно. Тогда, не мудрствуя, отсняли сигнал с шумом около пятидесяти раз подряд, нанесли на шлейфограмму эквивалентную шкалу времени (что было самое главное), после чего все снимки по ординатам были усреднены. Полученная кривая прекрасно выявила величину и форму сигнала: задача была решена. К сожалению, таким способом можно уменьшить влияние только шума и случайных наводок. Наводки, синхронные с сигналом (в импульсных экспериментах они основные), устранить таким способом нельзя.

Для получения наилучшего отношения сигнал/шум нужно выбирать датчик с наивысшим отношением чувствительности к корню квадратному из внутреннего сопротивления и правильно выбирать верхнюю и нижнюю границы полосы пропускания. Обычно не следует добиваться большого усиления и полной селекции от одного каскада: гораздо устойчивее работают схемы, где функции усиления, частотной селекции и др. выполняются своими узлами, без «балансирования» между перегрузкой, самовозбуждением и другими неприятностями.

3.2. БОРЬБА С НАВОДКАМИ

Точных рецептов по борьбе с наводками автор дать не может, да и вряд ли они существуют, тем не менее имеется некоторый опыт, изложение которого может оказаться полезным.

В динамических экспериментах, где наводки вызваны электромагнитным излучением, исследователи, заключив первые каскады или ФЭУ и т. п. в тонкий металлический экран, часто обнаруживают, что наводки не исчезли. Это не обязательно означает, что причина наводок в другом месте. Следует отметить три существенных момента при экранировании. Во-первых, магнитное поле проникает сквозь металл легче электрического и может быть причиной наводок, особенно если под экраном есть катушки индуктивности. Экран лучше делать двухслойным, состоящим из меди или алюминия и пермаллоя, хотя обычно одного слоя, хотя бы немагнитного металла, толщиной два-три миллиметра на больших частотах бывает достаточно.

Во-вторых, всякий щелевой разрез сплошного экрана прерывает линии токов Фуко, и эти токи проникают через щель внутрь экрана. Наложение алюминия на алюминий совсем не гарантирует хороший электрический контакт по всей длине стыка из-за диэлектрической пленки Al_2O_3 . Сетки, прикрывающие вентиляционные отверстия и т. д., должны быть пропапаны по всем узлам или, лучше, вырублены из целого листа, впаяны или сварены в стенки экрана. Приборы на передних панелях можно изолировать сзади колпаками и дать развязку по высокой частоте от клемм на корпус, трансформаторы и дроссели чувствительных цепей внутри экрана лучше выполнять на сердечниках тороидальной формы, и обмотки, первичная и вторичная, должны полностью обвивать весь тор, а не только его сегмент: помехоустойчивость такого исполнения намного выше.

Каждый каскад схемы следует монтировать, хотя и на общей плате, но по отдельности, вокруг центральных элементов каскада: лампы, транзистора. Каждый каскад соединяется с внешним миром обычно в четырех точках: землей, не обязательно связанной в этом месте с корпусом, точкой питания (часто каскад имеет свой RC -фильтр по питанию), входом и выходом. Земля всей схемы в целом соединяется с экраном или корпусом только в одной точке. Лучше, если накал 6,3 В заземлен не одним проводом, а средней

точкой, но это только если полоса пропускания включает 50 Гц. Мощные каскады схемы располагают дальше от входных. Наводки очень часто проникают внутрь экрана через блоки питания или от сети переменного тока, особенно если источник наводок питается с того же щита, что и диагностическая аппаратура. Поэтому на входе напряжения сети в прибор следует установить LC -фильтр по цепи питания (рис. 3.1). Проходная емкость дросселя должна быть небольшой.

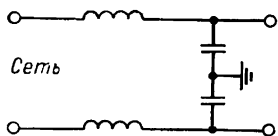


Рис. 3.1. LC -фильтр, защищающий от помех по цепи питания

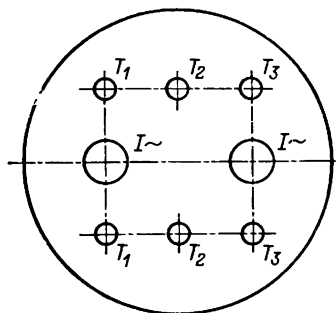


Рис. 3.2. Симметричное расположение выводов термодпар через обтюратор камеры высокого давления, уменьшающее наводки от мощных тоководов

Если в процессе эксперимента происходят мощные электрические разряды либо коммутируются большие импульсные токи, то электромагнитное поле этих токов может быть очень значительным. В таких случаях помимо подавления наводок в диагностической аппаратуре следует по возможности подавить поле самого источника наводок: лишить его потенциальных антенн, заэкранировать, защитить по цепям питания.

Бывает, что низковольтная шина с током в сотни и тысячи ампер, проходящая вблизи фотоумножителя или чувствительной аппаратуры, резко нарушает их работу магнитным полем частотой 50 Гц. В таком случае, если нельзя изменить монтаж, лучше всего применить экран из пермаллоя (отжечь после изготовления!). Наводки переменного тока могут быть вызваны магнитным полем рассеяния силового трансформатора, если он имеет недостаточное сечение сердечника или плохо собран.

Однажды в практике автора встретился несколько необычный случай. В камере высокого давления (5000 атм) через обычный стальной обтюратор были введены мощные электровводы нагревателя с током до двухсот ампер, а также выводы термодпар и контактов, подключенные к изучаемому образцу. Исследовали уравнение состояния ртути при температуре до 2000 °С и давлении до 5000 атм. Обтюратор превратился в своеобразный трансформатор, в котором магнитный поток от вводов нагревателя, пересекая контуры вводов датчиков, наводил ЭДС с амплитудой до десятых долей вольта.

Не очень долго думая, иначе отрицательные последствия легко можно было предугадать, мы перевели нагреватель на питание постоянным током. Сразу же

Рис. 3.3. Различные RC-фильтры и их основные характеристики [14]

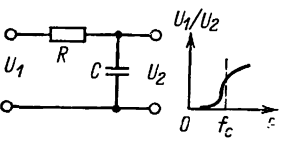
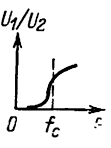
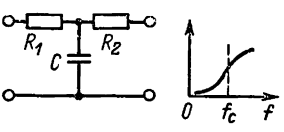
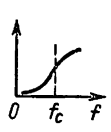
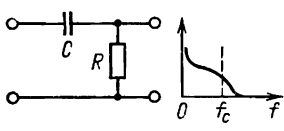

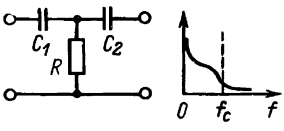

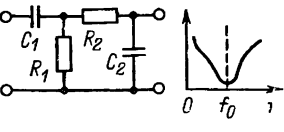
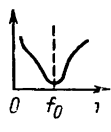
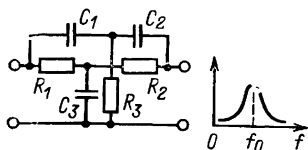
Схема	Характеристика затухания	Расчетные формулы
Фильтры нижних частот		
		$f_c = \frac{160}{RC}; C = \frac{160}{f_c R}$
		$\text{При } R_1=R_2=R \quad C = \frac{160}{f_c R}; f_c = \frac{160}{RC}$
Фильтры верхних частот		
		$f_c = \frac{160}{RC}; C = \frac{160}{f_c R}$
		$\text{При } C_1=C_2=C$ $f_c = \frac{160}{RC}; R = \frac{160}{f_c C}$
Полосовой фильтр		
		$f_0 = \frac{160}{RC}; C_1=C_2=C; R_1=R_2=R$

Рис. 3.3

Схема	Характеристика затухания	Расчетные формулы
-------	--------------------------	-------------------

Заграждающий фильтр



$$f_0 = \frac{160}{RC}; \quad R_1 = R_2 = R; \quad R_3 = \frac{R}{2\alpha};$$

$$\alpha = 1 - 2; \quad C_1 = C_2 = C; \quad C_3 = \frac{2C}{\alpha}$$

Примечание. R измерено в Ом, C — в мкФ, f — в кГц.

на показаниях термопар и ЭДС, идущих от образца, сильно сказались утечки тока через нагретую керамику, не являющуюся идеальным изолятором; переполюсовка нагревателя тут же это обнаружила. Выход был найден в том, что выводы датчиков в обтюраторе расположили симметрично по отношению к токовым, так, чтобы пересекающий их магнитный поток был равен нулю (рис. 3.2).

Очень хорошо подавляют наводки переменного тока за счет инерции рамки фотокомпенсационные усилители. Автор успешно использовал эти приборы для вывода показаний термопары на самописец, весьма чувствительный к таким наводкам.

Для подавления наводок и для уменьшения амплитуды шумов очень эффективно использование RC -фильтров как пассивных, так и «активных», включенных в цепь отрицательной обратной связи усилителей для формирования нужной полосы пропускания.

Среди многочисленных схем этих фильтров (рис. 3.3) есть и такие, которые почти полностью не пропускают сигнал на частоте, определяемой их параметрами.

Заграждающий фильтр, так называемый двойной Т-образный мост (рис. 3.3) и фильтры на рис. 3.4 и 3.5 имеют полюс затухания — частоту почти полного непропускания. Они широко используются, например, при подавлении наводок от сети 50 Гц. LC -фильтры для подавления наводок и шумов небольшой частоты использовать не стоит: их придется заключать в пермалловый экран, так как наводки 50 Гц на дроссель, расположенный в любом лабораторном помещении, слишком велики. Кто хочет в этом убедиться, пусть возьмет любой дроссель, лучше с зазором в сердечнике, и подключит его обмотку к осциллографу. Вы получите полное представление о магнитном поле частотой 50 Гц в Вашей лаборатории. Проверить, подавили ли Вы наводки от переменного тока, питающего подогреватели катодов, достаточно легко: стоит лишь кратковременно отключить их питание и проследить, не будет ли скачка в показаниях датчиков.

Для избирательного усиления фиксированных частот промышленности в настоящее время выпускает пьезоэлектрические многорезонаторные фильтры, обладающие высокой избирательностью и нечувствительностью к наводкам.

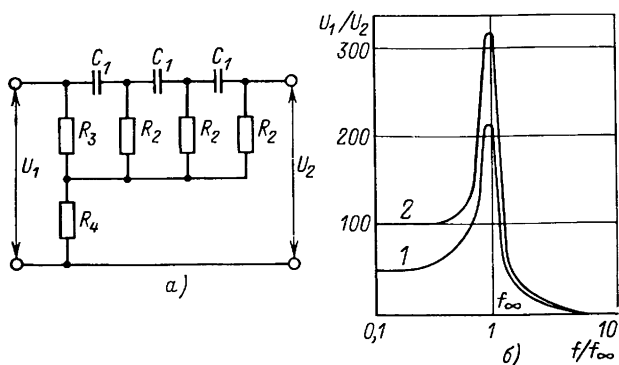


Рис. 3.4. Схема (а) и характеристика затухания (б) RC -фильтра верхних частот с полюсом затухания [14]:

1 — $f_{\infty} = 56/(C_1 R_2)$, $R_3 = R_2/2$, $R_4 = R_2/83$; 2 — $f_{\infty} = 42,6/(C_1 R_2)$, $R_4 = R_2/45,5$, $R_3 = 2R_2$

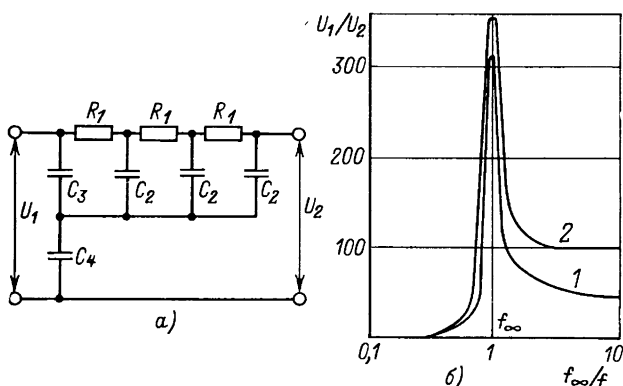


Рис. 3.5. Схема (а) и характеристика затухания (б) RC -фильтра нижних частот с полюсом затухания:

1 — $f_{\infty} = 595/(C_2 R_1)$, $C_4 = 45,5 C_2$, $C_3 = C_2/2$; 2 — $C_4 = 83 C_2$, $C_3 = 2 C_2$, $f_{\infty} = 452/(C_2 R_1)$; R измерено в Ом, C — в мкФ

Весьма инерционные усилители слабых постоянных токов, казалось бы, не должны чувствовать СВЧ-наводки, однако, как правило, они их чувствуют и весьма сильно. Дело, видимо, в том, что входной или электрометрический каскады сильно нелинейны по напряжению, и поэтому симметричная относительно полезного сигнала ЭДС наводки в пересчете на ток лампы, транзистора или другого нелинейного элемента дает постоянную составляющую, которая, как и в случае квадратичного детектирования при малых уровнях сигнала, пропорциональна квадрату амплитуды наводки. Если необходимо резко уменьшить чувствительность электрометрического усилителя к наводкам высокой частоты, его следовало бы собрать по симметричной дифференциальной схеме, так, чтобы наводка подавалась в фазе на оба ее плеча. Однако этого обычно не требуется.

Очень часто применяется компенсация наводки специально подобранным по амплитуде и фазе напряжением «антинаводки». Магнитное поле Земли компен-

сируют катушками Гельмгольца, наводки переменного тока — подачей на вход противофазного сигнала малой амплитуды. Весьма важно, чтобы форма компенсирующего сигнала была той же самой; например, переменная составляющая недостаточно сглаженных пульсаций выпрямителя не сводится к частоте ни 50 Гц, ни 100 Гц — она имеет сложную форму. Обычно добиться полноценной компенсации во всем частотном диапазоне не удастся, тем не менее, например, в технике приема слабых радиостанций при помехах со стороны более мощных прием вычитания сигналов от двух разнонаправленных антенн является весьма эффективным.

Распространено убеждение, что использование коаксиального кабеля для связи между блоками избавляет от помех. Это не совсем так. Рассмотрим конкретный пример: пусть тиратронный модулятор, расположенный в блоке I, посылает импульсы тока амплитудой 100—200 А по кабелю для питания лазерной трубки в блок II. Такая ситуация часто наблюдается при создании лазеров на парах металлов, например на парах меди. Сопротивление оплетки кабеля, с учетом скин-эффекта, составит несколько сотых долей ома, а разность напряжений между концами оплетки несколько вольт. Таким образом, оба блока будут представлять собой диполь, энергично излучающий радиопомехи со спектром от частоты повторения импульсов до десятков и сотен мегагерц. Разумеется, применение кабеля с двойной изолированной оплеткой, причем по внутренней будет протекать главный ток, а наружная будет соединять корпуса блоков, может сильно ослабить дипольное излучение.

Значительную сложность представляют наблюдение формы и измерение тока коротких мощных импульсов. Изменяя местоположение и варьируя способ включения осциллографа, можно наблюдать весьма различную форму сигнала. Сложность состоит в том, что при прямом включении провод с индексом «земля» нельзя рассматривать как действительно имеющий постоянный потенциал. Подключение этого провода к корпусу осциллографа ведет к тому, что наряду с правильным сигналом, являющимся разностью напряжений между концами датчика, мы наблюдаем также и скачок потенциала заземленного конца датчика. Лучше в таком случае использовать ферритовый разделительный трансформатор симметричной конструкции, которая менее чувствительна к наводкам и при небольшом числе витков обеспечивает достаточную полосу пропускания и минимальную индуктивность рассеяния. Применение для измерений мощных импульсов тока пояса Роговского хорошо известно. Чтобы с его помощью измерить ток, нужно применить интегрирующую ячейку, согласованную с входным сопротивлением и защищенную от наводок, так как он на выходе дает производную dl/dt (рис. 3.6). Видимо, при токе до 200 А еще можно снимать сигнал с малоиндуктивного резистора и разделительного трансформатора, а при токах более тысячи ампер лучше использовать пояс Роговского.

Наводки бывают и при измерениях постоянных или медленно меняющихся токов. Об одном таком нетривиальном случае — про-

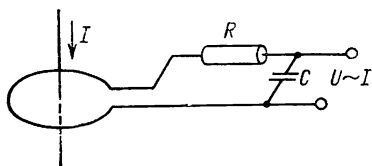


Рис. 3.6. Пояс Роговского для измерения мощных импульсов тока и его включение в измерительную цепь

водимости керамики — мы уже упоминали. Эта проводимость редко достигает такой степени, чтобы шунтировать ЭДС термопары, но вызвать наводки от нагревателя и других устройств она вполне может. То же самое можно сказать и об измерении термопарой температуры вакуумной печи. В этом случае источником наводок являются электронные токи, и питание переменным током уже не ликвидирует эффект, так как электронный ток униполярен.

Утечки по изоляторам — явление известное. Ни в коем случае нельзя в высокоомных схемах, рассчитанных на измерение малых токов (от 10^{-8} А и ниже), использовать такие изоляторы, как текстолит, гетинакс, асбоцемент, резину неизвестного сорта. Совершенно недопустимо делать из этих материалов изолирующие панели фотоумножителей и разъемов. Печатный монтаж можно допустить только после испытания образца фольгированного гетинакса на утечку, но за нечувствительность схемы к погоде ручаться будет нельзя. Лучше всего в таких случаях панели изготавливать из тефлона, эбонита, оргстекла; для ламп применять керамические панели, а монтаж выполнять на шпильках, забитых в плиту из хорошего диэлектрика.

Ввиду неудобства работы с электрометрическими лампами автор может поделиться опытом, как эксплуатировать обычные лампы, например, такие, как 6Ж1П, при сопротивлении в цепи сетки до 100 МОм. Во-первых, у обычных ламп не следует снижать напряжение анода или экранной сетки ниже 70—100 В. Во-вторых, не надо брать лампы с высокой крутизной анодно-сеточной характеристики, например 6Ж9П, 6Н23П и др. Лучше взять 6Ж1П, 6Н3П. В таком случае смещение управляющей сетки будет больше 1 В, а это совершенно необходимо для работы с малыми токами утечки. В-третьих, только что включенная после хранения лампа может иметь плохой вакуум, и ее нужно потренировать около часа обязательно под анодным током. Разумеется, надо брать лампы серии Е и несколько снижать напряжение накала.

Транзисторы, в частности полевые, легко пробиваются, когда на них попадают большие сигналы от датчиков устройства. Лампы в этом смысле гораздо надежнее. Читатели, интересующиеся работой электронных ламп в необычных режимах, могут обратиться к специальной литературе [5]. При измерениях малых токов датчики необходимо защищать от утечек по изоляторам. Лучший способ такой защиты — охранные электроды. Чистые водоотталкивающие изоляторы: тефлон, полиэтилен, либо теплое сухое стекло имеют достаточно малые поверхностные и объемные утечки. При работе с вакуумом внутренняя поверхность изолятора может запылиться металлом, что приведет к очень большим утечкам. Поэтому изоляторы в вакууме лучше закрывать экранами.

При напряжении более 3—4 кВ относительно земли появляется, а затем

резко нарастает на всех острых углах электрода коронный разряд. Подробно его роль и борьба с ним будут обсуждены в гл. 4, а здесь отметим только, что он резко увеличивает шумы аппаратуры и, естественно, искажает измеряемые токи.

3.3. ПРЕОБРАЗУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Название «преобразующие устройства» и само разбиение тракта регистрации на три узла: датчик — преобразующее устройство — регистрирующий прибор, конечно, условно. Датчик сам является преобразующим устройством ибо, например, такое свойство, как температура, «преобразует» в ЭДС термопары. В таком разбиении вот какой смысл: задача датчика — извлечь из экспериментального устройства максимально неискаженную информацию об измеряемой величине и передать ее на дальнейшее преобразование, где она будет усилена, продетектирована, отдискриминирована или просто сосчитана. Задача выходных регистрирующих приборов — обеспечить либо визуальное восприятие информации, либо, что лучше, ее запись.

Далеко не всегда нас интересуют все параметры сигнала датчика. Например, в случае счета элементарных частиц нас не интересует уже давно и хорошо известная форма импульса ФЭУ или газоразрядного счетчика, нам нужна амплитуда импульса. При отсчете времени нас интересует только доведение тактового импульса до регистрирующего прибора. Параметры сигналов датчика времени, если с ним все в порядке, нам достаточно безразличны. Поэтому задача преобразующих устройств — выделить нужную часть информации.

В настоящее время имеется возможность преобразовать информацию с помощью электронных устройств самым разнообразным и сложным образом. Успех создания или, скорее, синтеза таких устройств в первую очередь зависит от правильной постановки задачи. Поэтому в дальнейшем изложении мы будем обращать внимание на правильную, умеренную и реалистическую формулировку требований к преобразующим устройствам.

Усилители

Кроме коэффициента усиления по напряжению или по току важных параметров, характеризующих усилитель, очень много. Начнем с одного из самых существенных — полосы пропускания. Современные транзисторы и высокочастотные лампы позволяют почти без коррекции получать достаточно линейную частотную характеристику вплоть до 100 МГц. Простые корректирующие *LCR*-элементы доводят полосу пропускания до 200 МГц. Узкополосные (резонансные) усилители также легко создаются на частоты вплоть до 200 МГц.

Относительная легкость создания самой платы усилителя с такими параметрами не гарантирует, однако, таких же параметров всего тракта. Начнем с неизбежных коаксиальных кабелей. Иногда

забывают, что короткий отрезок коаксиального кабеля является скорее сосредоточенной емкостью. Например, при длительности импульса 100 нс этот импульс распространяется по кабелю пакетом длиной около 30 м. Отрезок кабеля длиной 1 м при таком импульсе можно рассматривать как сосредоточенную емкость, что особенно важно при нелинейной нагрузке, которую нельзя согласовать с волновым сопротивлением кабеля. Представление об отрезке кабеля как о емкости позволяет оценить искажения сигнала, возникающие на этом отрезке при отсутствии согласования.

В других случаях, когда согласование приведет к значительным потерям мощности на согласующем сопротивлении, также может быть оправдан отказ от согласования, с учетом конкретной длины и параметров кабеля.

Работа высокоомных датчиков, таких, как ФЭУ, прямо на нагруженный кабель невыгодна, так как уменьшает уровень сигнала. Если требуется умеренная полоса пропускания, не более 10 МГц, то в этом случае можно не ставить согласующие резисторы или предусилитель, считая емкость кабеля порядка 100 пФ/м.

Если полоса пропускания должна быть высокой, то, как правило, лучше всего непосредственно около датчика расположить усилитель — преобразователь сопротивления. На выходе кабеля (а не на входе) должно быть, с учетом входного сопротивления усилителя, активное сопротивление 75 или 50 Ом. Поскольку для большей помехоустойчивости лучше сразу же усилить сигнал, и в то же время датчик может плохо работать на низкоомный вход транзисторного усилителя, оптимальная схема такого предусилителя представляется следующей: эмиттерный повторитель — усилитель — эмиттерный повторитель. Усилитель на транзисторах очень хорошо работает на высоких частотах при применении каскодной схемы. В гл. 6 в качестве примера приведена хорошо себя зарекомендовавшая простая схема усилителя, который согласует сигнал ФЭУ, нагруженного на несколько килоом, с кабелем 75 Ом и усиливает сигнал в 20—30 раз.

Никогда не применяйте упрощенных схем включения транзисторов, взятых из радиолюбительского арсенала! Режим транзистора должен быть устойчивым, независимо от его коэффициента усиления по току, а подача сигналов такой, чтобы предотвратить его выход из строя при ожидаемых внешних неприятностях.

Электронная лампа с левой характеристикой на высоких частотах не является только емкостной нагрузкой по входу. За счет инерционного смещения электронного облака под действием сигнала у нее появляется активное входное сопротивление, достигающее при частотах около 100 МГц до десяти и менее килоом. Это сопротивление может понижать добротность колебательных контуров, включенных на вход лампового усилителя.

При создании избирательных, резонансных усилителей очень часто используют обратную связь через RC -цепи, например двойной Т-образный мост (рис. 3.7). Регулирование частоты в широких пределах достигается синхронной перестройкой трех сопротивле-

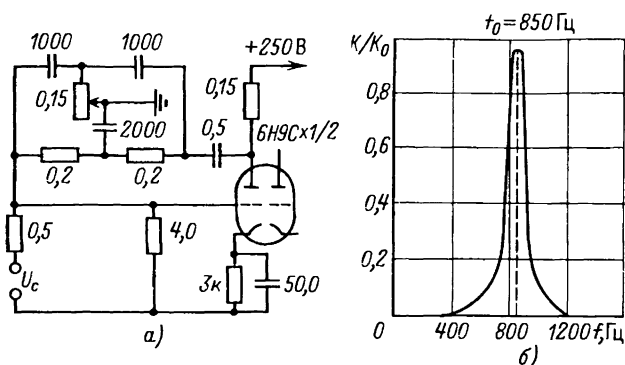


Рис. 3.7. Простой ламповый частотно-избирательный усилитель с двойным Т-образным мостом в цепи обратной связи [14]

ний, или емкостей, что достаточно сложно. В узких пределах можно подстраивать только R_3 . При использовании транзисторного каскада необходимо учитывать низкое входное сопротивление транзистора. Во всех этих случаях входной сигнал на первом каскаде усилителя, определяющем отношение сигнал/шум, не превышает амплитуду сигнала датчика. Далеко не все физики знают, что это не оптимальный вариант и что в технике радиоприема ситуация другая: сигнал на первом каскаде может быть существенно выше, чем в антенном устройстве.

У ламповых каскадов, в связи с высоким входным сопротивлением, в цепь сетки первой лампы включают колебательный контур, достаточно слабо связанный с антенной. В таком случае контур раскачивается до тех пор, пока потери в нем, в том числе через связь обратно в антенну, не сравняются с притоком энергии. Подбором параметров удастся поднять напряжение относительно напряжения антенны на порядок. Поэтому, когда неопытные радиолюбители пытаются поставить на входе своих устройств широкополосные каскады, катодные или эмиттерные ненастроенные повторители, то всегда получают резкое ухудшение отношения сигнал/шум. Отношение сигнала к радиопомехам при этом, конечно, не меняется.

В случае использования транзисторов на входе резонансного усилителя также удастся получить немалый выигрыш, несмотря на низкое входное сопротивление и даже благодаря ему [15]. На рис. 3.8 показана схема последовательного включения колебательного контура в цепь эмиттера транзистора, использующая низкое сопротивление этого включения.

Использование RC-мостов для создания селективных усилителей с точки зрения оптимального отношения сигнал/шум менее выгодно, чем использование колебательных контуров, но оправдано на низких (менее нескольких килогерц) частотах относительной малогабаритностью и низкой чувствительностью к наводкам RC-фильтров по сравнению с контурами.

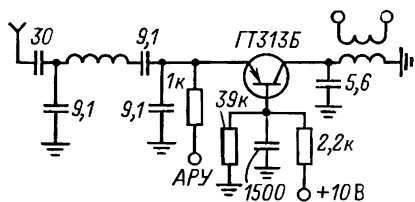


Рис. 3.8. Упрощенный фрагмент схемы входного каскада телевизора «Юность» [16]

Практика показывает, что специальное создание резонансного усилителя на избранную частоту ведет к лучшим результатам, чем использование промышленных перестраиваемых усилителей, таких, как У2-6. Для высоких частот сейчас получили достаточно широкое распространение пьезоэлектрические резонансные фильтры из пьезокерамики, они чрезвычайно помехоустойчивы, но имеют фиксированную частоту. На низких частотах экспериментаторы также успешно создают резонансные усилители с электромеханическими фильтрами типа камертонов, добротность и шумовые качества которых, конечно, много лучше, чем у RC -фильтров.

Особого внимания заслуживает вопрос о необходимости применения резонансных усилителей для усиления постоянных напряжений и периодических импульсных сигналов. Если измеряемая величина является постоянной, то для уменьшения дрейфа нуля ее подчас модулируют затворами или другим способом со скважностью порядка 1 : 1 (это оптимально) и затем усиливают первую гармонику полученного сигнала резонансным усилителем. Теоретически этот прием не улучшает отношения сигнал/шум, но очень эффективен против помех и дрейфа нуля, увы, не учитываемых теорией. Поэтому автор и сам часто применял в этом случае резонансные усилители, и другим готов рекомендовать поступать так же, хотя сейчас есть интегральные схемы усилителей постоянного тока с исключительно малым дрейфом.

Тем не менее некоторые экспериментаторы совершают элементарную ошибку, используя метод резонансного усиления для детектирования очень узких периодических импульсов. Например, длительность импульса азотного лазера составляет 5—10 нс, а частота повторения 20—200 Гц, при работе с лазерами на парах металлов частота будет около 10^4 Гц, а τ импульса — 10 нс, скважность даже для лазеров на парах металлов составит 10^{-4} , следовательно, амплитуда импульса после выделения из него только первой гармоники, т. е. синусоиды, упадет примерно в таком же отношении. Конечно, затем можно вновь довести амплитуду сигнала до необходимого значения и зарегистрировать, но, зачем же, собственно говоря, копыа ломать? При использовании резонансного усилителя мы теряем всю информацию, кроме амплитуды сигнала, не замечаем кратковременной, от импульса к импульсу, нестабильности во времени, формы сигнала, по которым можно вычислить время люминесценции, добротность резонатора и другие важные параметры.

В то же время прямой вывод импульсного сигнала с ФЭУ на осциллограф очень прост, даже если речь идет о наблюдении оди-

ночных импульсов. Если же нужно получить среднее значение естественно флуктуирующей величины, то это легче выполнить с помощью инерционного детектора импульсов, чем применять резонансный усилитель. Поэтому автор не рекомендует применять резонансные усилители там, где скважность импульсов достаточно мала.

Высокочастотный монтаж мало совместим с выводом чувствительных элементов каскадов на панели управления. Поэтому лучше заранее подсчитать, какие нужны полоса пропускания и усиление, чем создавать регуляторы, которые всегда осложняют настройку и достижение высоких параметров.

Особенно важно не расширять чрезмерно полосу пропускания ни в сторону высоких, ни в сторону низких частот. Полоса пропускания усилителя, усиливающего одиночные импульсы, должна охватывать главную часть разложения такого одиночного импульса в интеграл Фурье по частоте. Не следует без надобности усиливать частоты 50, 100 ... Гц; наводки по этим частотам от сети могут мешать наблюдению импульсов на экране осциллографа и их амплитудному анализу.

Усиливать постоянный ток обычно много проще, чем малое постоянное напряжение, поэтому, если это возможно, лучше иметь выход по току, чем выход по напряжению на уровне нескольких микровольт.

Если напряжение сигнала все же очень мало, то надо в первую очередь довести его до усилителя без искажений, т. е. избежать возникновения термо-ЭДС в местах перехода от одного металла к другому и избежать наводок за счет утечек на измерительный тракт. Совершенно недопустимо в случае малых напряжений сглаживать шумы и помехи первыми попавшимися конденсаторами; даже бумажные конденсаторы сохраняют подчас значительную поляризацию и искажают малые ЭДС. Нужно использовать конденсаторы, рассчитанные на достаточно высокие напряжения, и тщательно проверять их на отсутствие искажений малых ЭДС. Для проволочных резисторов, работающих при малых напряжениях, лучше применять манганин, а не константан, так как манганин в паре с медью не дает термо-ЭДС, а константан дает около 4 мВ/100 °С.

Первые каскады усилителей очень чувствительны к наводкам со стороны напряжения питания; дифференциальная схема имеет в этом случае очень большие преимущества перед обычной униполярной схемой.

Демодуляторы

Усилители постоянного тока прямо выходят на регистрирующие приборы, а в большинстве случаев после усилителя располагается детектор, позволяющий воспользоваться приборами постоянного тока с линейной шкалой. Идеальный детектирующий элемент должен обладать следующими свойствами: его сопротивление при прямой

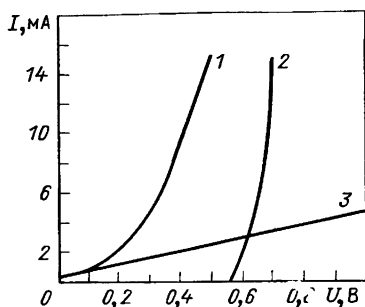


Рис. 3.9. Вольт-амперные характеристики германиевого Д9 (1), кремниевое 2Д907 (2) и лампового 6Х2П (3) диодов

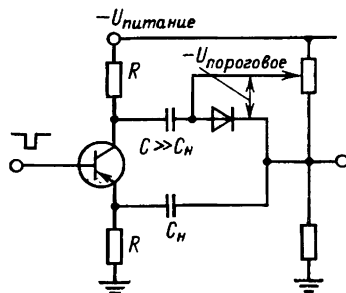


Рис. 3.10. Нейтрализация емкостной проводимости порогового детектора. Элементы, задающие режим транзистора, не показаны

полярности должно быть постоянным, а при обратной — бесконечно большим, а его проходная емкость должна быть равна нулю. На самом деле любой реальный детектирующий диод далеко не идеален, и от качества детектора во многом зависят линейность и стабильность всего тракта, а также его порог чувствительности. Рассмотрим работу детектора при малых напряжениях. Типичные вольт-амперные характеристики лампового, германиевого и кремниевого диодов представлены на рис. 3.9. Видно, что ламповый диод имеет наилучшую форму характеристики, наиболее круто ломающуюся при подаче открывающего напряжения. Наиболее сдвинутой от нуля по напряжению и потому неудачной для детектора характеристикой обладает кремниевый диод.

Для того чтобы не работать в области малых напряжений и нелинейного детектирования, где $R_{\text{прямое}}$ сравнимо с $R_{\text{прибора}}$, лучше всего усиливать сигнал до допустимых для детектора значений; тогда нелинейная часть составит доли процента от шкалы. В этом отношении ламповый диод также вне конкуренции — его пробивное напряжение весьма велико. Высокочастотные свойства лампового диода также несколько лучше, а его емкость хоть и не меньше, чем у кристаллического, но зато постоянна *. В то же время крупными недостатками лампового диода являются: необходимость подведения накала, подчас от специальной обмотки, высокая емкость на накал, большая чувствительность к наводкам от сети, большие габариты. Кривая чувствительности детектора в области малых напряжений близка по форме к его вольт-амперной характеристике в этой области и лишь в области больших напряжений приближается к прямой, проходящей почти через начало координат. Чем большего номинала по напряжению взят диод, чем больше растянута по напряжению шкала регистрирующего прибора, тем меньше

* Емкость полупроводниковых диодов зависят от напряжения на переходе.

будет область нелинейности. Весьма неприятна обратная проводимость, наибольшая у германиевых диодов; в случае детектирования коротких импульсов она существенно ограничивает снизу частоту их повторения, т. е. минимальную скважность.

Надо уметь проводить приближенные оценки оптимальных параметров схемы, выбирать оптимальные типы ламп, транзисторов, диодов, оптимально вести монтаж и настройку.

При детектировании коротких импульсов емкостную проводимость диода нельзя игнорировать; наилучший способ резко уменьшить ее влияние — это нейтрализовать часть сигнала, прошедшего за счет емкости. Одна из возможных схем нейтрализации показана на рис. 3.10. С помощью инвертирующего каскада формируется сигнал как положительной, так и отрицательной полярности. Сигнал положительной полярности направляется через диод, а отрицательной — на тот же выход через конденсатор.

Таким образом, сигналы противоположной полярности, прошедшие через емкость детектора и нейтрализующую емкость C_n , взаимно уничтожаются. Подбор нейтрализующей емкости в случае лампового диода можно провести, отключив его накал и настраиваясь на минимум сигнала на выходе. Емкость полупроводниковых диодов нейтрализовать сложнее, так как она зависит от обратного напряжения.

В случае применения высококачественных диодов влияние их емкости может быть не слишком велико и во многих случаях можно обойтись без нейтрализации, разумно ограничив верхнюю частоту пропускания. Однако, если детектор применяется для пороговой дискриминации и надо получить достаточно четкий порог срабатывания, нейтрализация необходима. Особенно важно обращать внимание на качество детектирования при изготовлении дифференциального анализатора.

При интегрировании последовательности коротких импульсов существенна роль обратной проводимости диода. Прямая проводимость проявляется только вблизи вершины импульса, на временном интервале не более 30 % полной его длительности. Амплитуда прямого тока в этот момент зависит не столько от свойств диода, сколько от мощности выходного каскада усилителя. Средний прямой ток с учетом скважности:

$$\bar{I}_{\text{прямой}} = I_{\text{имп}} \cdot 0,3 \tau_{\text{имп}} f,$$

где f — частота следования импульсов, 1/с.

Если обратный ток транзистора (мало зависящий от обратного напряжения) окажется сравнимым со средним прямым током, то измерение таких параметров, как средняя частота следования, длительность или амплитуда импульса по среднему прямому току, будет затруднено. Разумеется, автор не утверждает, что нет схемных решений, обходящих эту трудность, однако, если не удастся добиться высокой точности, проградуируйте детектор по похожим импульсам какого-либо генератора и ведите эксперимент! Если он получится, уточните градуировку, а создание совершенных детек-

торов предоставьте разработчикам. Сейчас выпускают неплохие импульсные вольтметры, но их помехозащищенность пока недостаточна. При работе с очень низкой частотой следования импульсов часто удобнее перейти к регистрации формы и амплитуды одиночного импульса с помощью запоминающего осциллографа или осциллографа с фотографической приставкой.

При детектировании коротких импульсов большой амплитуды естественно воспользоваться делителем. Если после делителя к осциллографу идет коаксиальный кабель, то это не обязательно нагрузка 75 Ом, так как у осциллографов обычно не низкоомный согласованный выход; короткий кабель, как мы уже отмечали, скорее, эквивалентен емкости около 100 пФ/м. (Это значение для каждого типа кабеля хорошо известно.) Осциллограф с несогласованным кабелем представляет собой параллельную RC -цепочку, которая должна быть измерена и учтена при расчете делителя. Учет влияния измерительного прибора увеличивает точность эксперимента, а достигается очень простыми средствами.

Большие преимущества при отделении сигнала от помех и шумов дает применение синхронного детектирования. Этот метод можно применять всегда, когда событие, которое мы регистрируем, происходит в заранее известный момент, даже если оно не повторяется регулярно. Например, регистрируются очень слабые импульсы света от события, вызванного импульсом лазера. Частота лазера невелика, и одноэлектронные импульсы ФЭУ трудно отличить от таких же фоновых импульсов.

Однако, пользуясь очень низкой скважностью ожидаемого сигнала, мы можем, например, с помощью управляющего электрода ФЭУ включать его только одновременно с приходом или чуть раньше прихода лазерного импульса света и выключать сразу после окончания ожидаемого события. Тогда фон резко, в отношении скважности, уменьшится, а сигнал останется тем же. Сдвигая момент включения ФЭУ, можно без труда убедиться, что мы имеем дело именно с сигналом, а если детектор включается на очень короткое время, то, сканируя по оси t δ -функцию чувствительности, можно записать форму сигнала с очень хорошим временным разрешением. На этом принципе основана работа очень полезных приборов — стробоскопических осциллографов [17], позволяющих наблюдать форму импульсов, имеющих длительность до 10^{-8} с.

Метод синхронного детектирования чаще всего применяется в сочетании с резонансным усилением периодических сигналов. Сущность метода в этом случае такова: на выходе узкополосного резонансного усилителя полезный сигнал дает синусоиду постоянной фазы, зависящей от реального расположения сигнала во времени относительно заданной периодической метки и постоянного фазового сдвига усилителя. Шум, прошедший через такой усилитель, тоже будет трансформирован до флуктуирующей по амплитуде и фазе синусоиды, причем средняя амплитуда шума, конечно, не будет равна нулю, но фаза шума будет по отношению к метке принимать любые значения, и поэтому среднее арифметическое из ЭДС шума, взятое

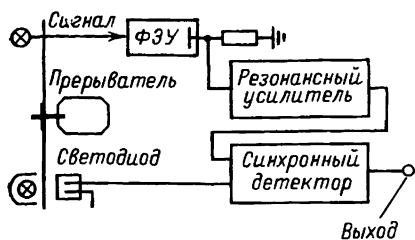


Рис. 3.11. Схема синхронного детектирования слабого светового сигнала

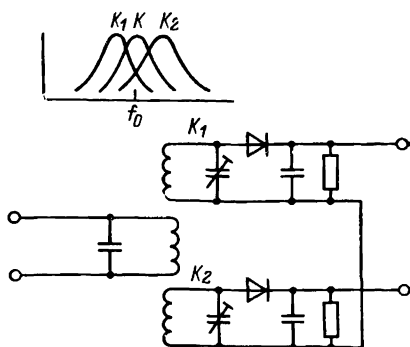


Рис. 3.12. Принципиальная схема и настройка контуров простого частотного детектора

в точке повторяющейся временной метки, будет равно нулю. Нужно лишь, чтобы детектор фиксировал напряжение в момент прихода метки вместе со знаком. Автор еще раз хочет подчеркнуть, что синхронное детектирование физически связано не со строгой периодичностью процесса, а с наличием опережающей временной метки, по отношению к которой исследуемый процесс одинаково воспроизводится во времени. Синхронному детектированию можно подвергнуть, например, радиопомехи от нерегулярно повторяющегося искрового разряда, если задержать их линией задержки, а свет от искры с помощью фотоприемника сделать меткой.

Типичный случай использования синхронного детектирования — измерение слабых световых сигналов, например, при исследовании спектров комбинационного рассеяния (рис. 3.11). Основной луч пропускают через дисковый прерыватель со скважностью 1:1, модулирующий световой поток с невысокой частотой, не кратной 50 Гц, чтобы усилитель не пропускал гармоники сети. Сигнал с фотомультипликатора подается на резонансный усилитель и затем детектируется синхронным детектором, датчиком синхронных импульсов для которого является обычно фотодиод, закрепленный около модулирующего диска напротив лампочки накаливания (питаемой постоянным током!). Следует помнить, что чем уже полоса пропускания резонансного усилителя, тем больше время установления сигнала у него на выходе. Это время τ приблизительно равно $1/\Delta f$, где Δf — полоса пропускания, Гц.

Метод синхронного детектирования не позволяет выйти за пределы ограничений, устанавливаемых неизбежными шумами аппаратуры. Теоретически чувствительность, если приходится искусственно прерывать сигнал, даже понижается, однако обычно мы боремся не с флуктуационными шумами, а с помехами и дрейфом нуля, которые теорией не описываются. Поэтому на практике этот метод совершенно оправданно широко применяется.

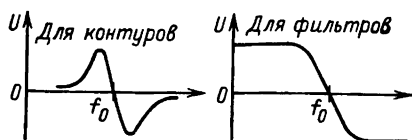


Рис. 3.13. Зависимость напряжения на выходе частотного детектора от частоты при использовании как контуров, так и фильтров верхних и нижних частот

Несколько реже применяется в физических приборах частотное детектирование, хорошо известное в технике СВЧ-связи и телевидения. Выходной сигнал классического частотного детектора пропорционален (со знаком) отстройке мгновенного значения частоты от среднего значения, т. е. $\Delta U = K(f - f_0)$. Частотный детектор имеет область преимущественного использования, связанную с возможностью регистрировать очень малые изменения частоты. Например, плазма, заполняя часть объема колебательного контура, обязательно вызовет перестройку частоты генератора, а этот эффект легко зарегистрировать с помощью частотного детектора. С помощью такого детектора можно стабилизировать частоту, обороты мотора и т. д.

Принцип работы простого частотного детектора показан на рис. 3.12. Два одинаковых колебательных контура K_1 и K_2 слабо связаны с катушкой выходного контура K . Один из них настроен на частоту $f + \Delta f$, другой на частоту $f - \Delta f$. Оба контура имеют выход на детекторы, сигналы от которых вычитаются. Ясно, что чувствительность такого детектора зависит от добротности контуров и амплитуды колебаний в них. Подчас важно, чтобы изменения амплитуды сигнала не регистрировались бы частотным детектором. Для достижения этого следует или ввести в тракт каскад автоматической регулировки чувствительности, или довести выходной каскад до состояния ограничения амплитуды. Вольт-амперная характеристика детектора достаточно линейна, пока девиация частоты δf меньше Δf ; при $\delta f > \Delta f$, т. е. при выходе из полосы, когда K_2 настроен выше, а K_1 ниже текущей частоты, частотный детектор может давать совершенно бессмысленные показания. Иногда, например в случае стабилизации оборотов мотора, это очень крупный недостаток. В таком случае можно несколько поправить схему частотного детектора, использовав вместо контуров K_1 и K_2 фильтры верхних и нижних частот с перекрывающимися на середине полосы пропускания характеристиками. Тогда кривая выходного напряжения детектора будет зависеть от частоты, как показано на рис. 3.13, что вполне удобно для автоматизации поддержания f_0 .

Преобразователи формы сигналов

Во многих случаях сигналы, поступающие от датчиков, имеют не очень удобную для последующих операций форму. Они могут иметь длинный задний фронт, слишком узкую вершину, затрудняющую анализ амплитуды, неподходящую длительность и даже могут представлять собой ряд затухающих колебаний. Поэтому перед подачей сигналов на окончательную регистрацию с помощью анализаторов, счетных устройств, интеграторов их чаще всего формируют, т. е.

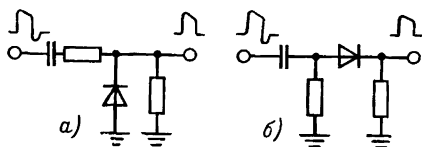


Рис. 3.14. Два способа подавления выбросов противоположной полярности:
а — замыкание через диод; б — непропускание в следующие каскады с помощью диода

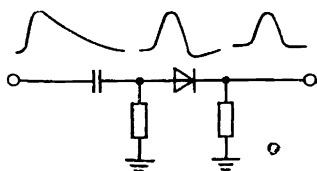


Рис. 3.15. Укорочение заднего фронта импульсов с помощью дифференцирующей ячейки и диода

стремятся максимально выявить их характерные, нужные отличия: или самый факт появления сигнала в данный момент времени, или амплитуду, или длительность, а часто и более сложный комплекс свойств, и в то же время убрать «лишние» части: выбросы обратной полярности, чрезмерную амплитуду или длинный «хвост».

Разработчики промышленной аппаратуры уделяют этому вопросу большое внимание, так как их изделия должны по возможности работать с самыми различными сигналами. В то же время в каждой конкретной физической задаче форма сигналов датчика обычно достаточно постоянна и ее преобразование не столь сложно.

Поэтому подчас простые самодельные преобразователи для узкого класса импульсов, исходящих от конкретных датчиков, оказываются лучшими, чем более сложные — рассчитанные на сигналы всевозможной формы. Здесь мы рассмотрим простые способы преобразования сигналов: уничтожение выбросов противоположной полярности, укорачивание заднего фронта, ограничение по амплитуде, формирование прямоугольных импульсов с амплитудой, равной амплитуде поступающих на вход, и формирование прямоугольных импульсов с амплитудой, не зависящей от амплитуды входных импульсов.

Уничтожение выбросов противоположной полярности. При использовании импульсных трансформаторов, имеющих малую индуктивность для обеспечения крутых фронтов, тиратронов и тиристоров и во многих других случаях импульсы имеют на заднем фронте выброс другого знака. Иногда эти выбросы бывают небольшой амплитуды и большой длительности, а иногда — большой амплитуды и малой длительности. Подчас эти выбросы безвредны, но в некоторых случаях могут вести к пробоем базовых цепей высокочастотных транзисторов, увеличению мертвого времени или искажению анализа последующих импульсов и другим неприятностям. Есть два способа подавления обратных выбросов: замыкание их источника диодом (короткое замыкание выбросов) и непропускание их в схему также с помощью диодов (рис. 3.14). Следует иметь в виду, что максимальные токи, напряжения и мощности, поглощаемые шунтирующими диодами, могут быть немалыми. В случае тиратронов обратный выброс на аноде необходим для их гашения, и полное его демпфирование может оказаться нежелательным. В таких случаях последовательно с демпфирующим диодом можно включить сопротивление.

Укорочение заднего фронта импульсов. Если сигналы идут с одного датчика и имеют одинаковую форму, как, например, в случае регистрации элементарных частиц с помощью сцинтиллирующих кристаллов и ФЭУ или пропорциональных

счетчиков, то достаточно использовать дифференцирующую ячейку и диод, чтобы преобразовать сигнал, как показано на рис. 3.15.

Здесь, однако, нужно иметь в виду, что в действительности задний фронт в датчике мы не укоротили, т. е. люминофор еще высвечивается, либо электронная схема датчика еще не отрелаксировала. Укорочение импульса следует выполнять в самых первых каскадах, например, на выходе ФЭУ, тогда оно может повести к реальному увеличению быстродействия схемы. Если форма у всех импульсов одинакова, то и их амплитуды уменьшатся одинаково. При регистрации импульсов малой амплитуды, сравнимой с шумами, укорочение импульсов, связанное с сужением полосы пропускания со стороны низких частот, видимо, не сильно сказывается на отношении сигнал/шум, так как уменьшает и сигнал, и шум.

Есть более сложный, но и более совершенный метод сокращения заднего фронта импульсов. В одном из каскадов усилителя применяют отрицательную обратную связь с линией задержки. Тогда усиление резко падает через τ задержки после начала импульса; такой каскад может возбудиться, и параметры цепи обратной связи нуждаются в уточнении при налаживании каскада.

Ограничение амплитуды импульсов для их формирования использовать не стоит, если их амплитуда различна, но если она одинакова, то этот путь прост и эффективен.

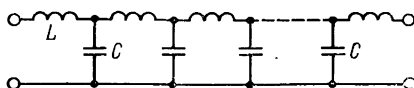
Иногда большие импульсы сильно перегружают анализирующие каскады, долго выводя их из нормального режима. Схемы ограничителей, в принципе очень простые, должны жестко держать пороги ограничения при предполагаемых нагрузках. Ограничение по амплитуде важно представить себе в плане влияния на предыдущий каскад. Представьте себе, что Вы взяли трансформатор и решили «ограничить» его выходную синусоиду жестко включенными диодами. Ясно, что Вы и трансформатор и источник его питания при этом перегрузили, к тому же в момент жесткого «удара» напряжения об ограничивающий диод, особенно если он полупроводниковый, возникают высокочастотные помехи и «звон» обмоток трансформатора. Этот эффект наблюдается даже в некоторых радиоприемных устройствах, например в трансляционном усилителе в свое время широко распространенного радиокомбайна «Казахстан». Этот усилитель создает значительные помехи собственному радиоприемнику именно за счет применения в нем полупроводниковых диодов в схеме выпрямителя. Стоит лишь последовательно с диодами включить сопротивления 30—50 Ом, как помехи резко уменьшаются. Поэтому предыдущий каскад лучше отделять от ограничителя сопротивлениями.

Формирование прямоугольных импульсов с амплитудой, равной амплитуде поступающих на вход импульсов, во многом способствует хорошей работе последующих каскадов, хотя излишне острые «углы» импульса могут вызвать ненужный звон в используемых далее индуктивных цепях. Формирование плоской вершины импульса связано обычно с некоторым его удлинением. Для формирования П-образного импульса правильно все же воспользоваться линиями задержки. Поскольку эти линии играют большую роль в электронике, приводим здесь основные сведения об их свойствах [18].

Коаксиальный кабель является длинной линией, скорость распространения сигналов по которой на 10—20 % меньше скорости света. В случае применения специального кабеля с внутренним проводом, свернутым в спираль, или длинной линии, состоящей из многих звеньев (рис. 3.16), скорость распространения по ней сигнала $V=1/\sqrt{LC}$, где L и C — индуктивность и емкость единицы длины

50

Рис. 3.16. Схема линии задержки



линии. От разомкнутого конца линии волна отражается без перемены знака. При этом на конце линии напряжение удваивается, а ток обращается в нуль. От замкнутого накоротко конца линии волна отражается с переменной знака, при этом ток на конце линии удваивается, а напряжение обращается в нуль. При сопротивлении нагрузки, равном волновому, волна от конца линии не отражается. Для искусственной длинной линии, состоящей из n ячеек, каждая индуктивностью L и емкостью C , время задержки равно $T = n\tau = n\sqrt{LC}$. Волновое сопротивление такой линии $Z = \sqrt{L/C}$. Искусственная дискретная линия, состоящая из элементов L и C , имеет верхнюю граничную полосу пропускания $f_{\text{макс}} = 1/\pi \sqrt{LC}$. Если кабель или линия нагружены на конце на волновое сопротивление Z , а начальный конец линии не нагружен, то приведенное к нему сопротивление также равно Z . Поэтому нагружать кабель на сопротивление Z и в начале, и в конце линии нет необходимости: при передаче сигнала кабель нужно нагрузить в конце, а при использовании в качестве формирователя импульсов — как необходимо в избранной схеме.

На рис. 3.17 приведена схема формирователя с замкнутой на конце линии задержки. Сеточная (базовая) цепь содержит детектор, превращающий импульс в ступеньку, которая, испытав отражение в линии, превращается в П-образный импульс. Если усилительный каскад достаточно линеен, то последующие ступеньки также будут преобразованы в импульсы, хотя входная цепь может при этом работать как интегратор, не успевая отрелаксировать к приходу следующих импульсов. Идеальная форма импульса искажается искусственной линией как за счет конечного числа элементов, так и за счет потерь энергии в них. На рис. 3.18 показана форма импульса при различном количестве звеньев линии. Изготовле-

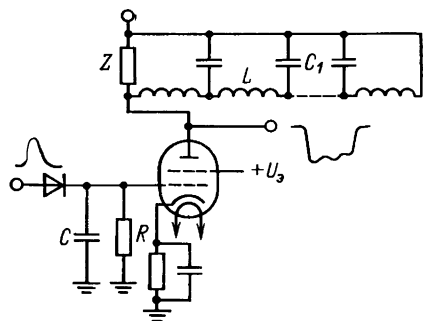


Рис. 3.17. Схема формирователя прямоугольных импульсов с замкнутой на конце линией задержки. RC на входе намного больше τ выхода

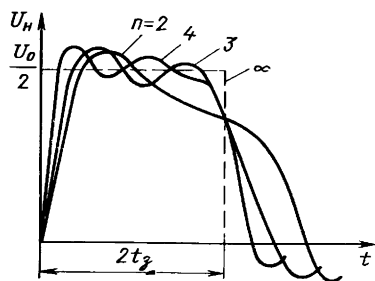


Рис. 3.18. Форма импульса на выходе каскада с формирующей линией задержки (см. рис. 3.17) при различном количестве LC -звеньев [18]:

$t_3 = n \sqrt{LC_1}$; U_0 — амплитуда импульса при отключении линии

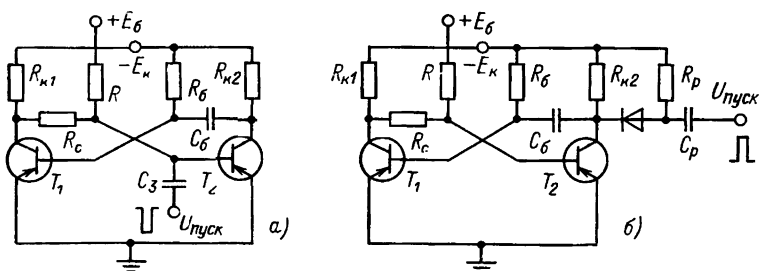


Рис. 3.19. Схема заторможенного мультивибратора:
 а — с запуском на базу, б — с запуском на коллектор [19]

ние высококачественной линии задержки в век миниатюризации обычно вызывает аллергическую реакцию, так как ее трудно сделать миниатюрной. Добротность катушек должна быть высокой, поэтому они не могут быть очень маленькими, а ферриты на высоких частотах имеют большие потери. Тем не менее промышленность выпускает стандартные линии задержки небольших размеров. При формировании мощных высоковольтных импульсов генераторов, когда о миниатюризации думать не приходится, линии задержки находят широкое применение, причем часто не искусственные, а прямо отрезки высоковольтного коаксиального кабеля.

Формирование импульсов постоянной амплитуды. Этот вид преобразования импульсов обычно завершает их путь перед подачей на интегратор или счетное устройство. Чаще всего используются генераторы прямоугольных импульсов — одновибраторы и блокинг-генераторы. На рис. 3.19 представлена схема заторможенного мультивибратора [19].

Иногда в схемах мультивибраторов коллектор (анод лампы) через емкость замыкают на управляющий электрод. То же самое делают и в блокинг-генераторах, когда вторичную обмотку через емкость включают в управляющую цепь. Такое включение не улучшает, а ухудшает передний фронт импульса на коллекторе, так как потенциал базы всегда близок к потенциалу земли, и нарастание потенциала коллектора происходит не лучше, чем со временем $R_K C_6$. В представленной схеме базовые цепи нормально закрытых транзисторов T_2 включены правильно — через делитель $R-R_C$. Можно применять и совсем другие схемы, но между базой нормально закрытого и коллектором нормально открытого транзистора всегда должно быть оптимально подобранное сопротивление R_6 . Насыщенный режим открытого транзистора нужно обеспечить с учетом коэффициентов усиления по току первого и второго транзисторов β_1 и β_2 при наименьшей рабочей температуре. Для этого R_C выбирают с учетом условия:

$$R_C + R_{K1} \leq \beta_2 R_{K2}.$$

Длительность импульса этой схемы примерно равна:

$$\tau_{\text{имп}} = C_6 R_6 \ln 2.$$

Время восстановления мультивибратора в заторможенном режиме

$$\tau_{\text{восст}} \approx (4 \div 5) C_6 R_{K2}.$$

При коэффициенте усиления по току $\beta \sim 30$ предельная скважность, определяемая как $Q = 1 + \tau_{\text{имп}} / \tau_{\text{восст}}$, равна 5—6. Чтобы уменьшить время восстановления,

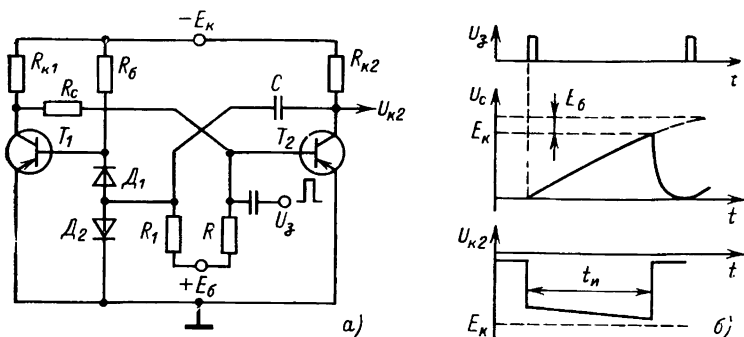


Рис. 3.20. Схема (а) и временные диаграммы (б) запертого мультивибратора с малым временем восстановления [19]

в [19] рекомендуется схема, показанная на рис. 3.20. В предыдущую схему добавлены два диода D_1 и D_2 и сопротивление R_1 . Расчет этого мультивибратора приведен в [19, с. 96—97]; максимальная скважность может достигать 20. т. е. 95 % времени схема может находиться в неустойчивом, опрокинутом состоянии. Температурная стабильность этого мультивибратора существенно выше, чем обычного. Приведем еще достаточно известную схему несимметричного мультивибратора с эмиттерной связью (рис. 3.21).

Эту схему часто применяют в качестве ждущего генератора прямоугольных импульсов, длительность которых изменяется потенциометром R_{K1} . Для осуществления положительной обратной связи через сопротивление в цепи эмиттера R_3 от T_2 к T_1 нужно, чтобы в момент переключения под действием запускающего импульса на R_3 возник перепад напряжения, противоположный по знаку запускающему. Для этого R_{K1} должно быть меньше R_{K2} .

Амплитуда импульса на эмиттерном сопротивлении [19]

$$\Delta U_3 = E_K R_3 (R_{K1} - R_{K2}) / (R_{K2} + R_3) (R_{K1} + R_3);$$

амплитуда импульса на коллекторе T_2 :

$$\Delta U_{K2} = E_K R_{K2} / (R_{K2} + R_3).$$

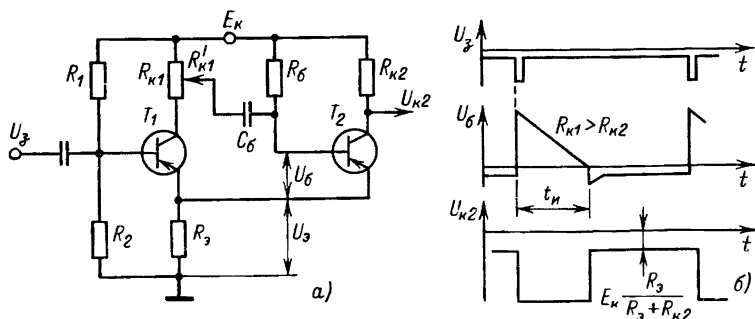


Рис. 3.21. Схема (а) и временные диаграммы (б) запертого несимметричного мультивибратора с эмиттерной связью [19]

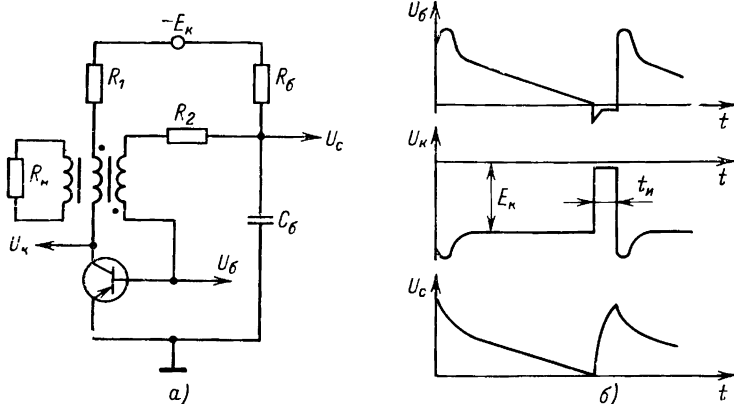


Рис. 3.22. Схема блокинг-генератора [19]

Длительность импульсов t_n , генерируемых этой схемой, определяется в основном произведением $R_6 C_6$, но нелинейно зависит от положения потенциометра $R_{к1}$.

Движок этого потенциометра не должен занимать ни крайнего верхнего, ни крайнего нижнего положения. Лучше добавить к $R_{к1}$ сверху и снизу постоянное сопротивление, чтобы устойчивая регулировка выполнялась во всем диапазоне положений движка на $R_{к1}$.

Одновибраторы на транзисторах дают хорошие фронты, плато и позволяют широко изменять длительность импульсов, к тому же они очень малогабаритны. При использовании некоторых типов высокочастотных транзисторов следует не только в этих, но и во всех схемах не допускать на базе запирающего потенциала, большего 1—2 В. С этой целью базовые цепи транзисторов иногда защищают высокочастотными диодами. Запуск одновибраторов лучше всего производить через разделительный диод, чтобы последующее его срабатывание не «тащило» бы за собой схему запускающих импульсов.

Блокинг-генератор (рис. 3.22) содержит в коллекторной (анодной) цепи импульсный трансформатор. Этот трансформатор оборачивает фазу, позволяя создать положительную связь на одном транзисторе или одной лампе, а также получить выходные импульсы любой полярности, согласованные с высокоомной или низкоомной нагрузкой. Последнее часто бывает необходимо в ламповых схемах. Блокинг-генератор может давать импульсы, близкие к прямоугольным, однако часто их форма сильно искажается индуктивностью трансформатора. Точный расчет импульсных трансформаторов, хотя и описан во многих книгах, например в [18, 20], — трудное дело, и физики обычно делают трансформаторы полуэмпирически. При этом встречается одна распространенная ошибка: индуктивность первичной обмотки трансформатора стремятся сделать поменьше для получения крутых фронтов. Между тем индуктивность обмотки прямо не определяет фронт даже в режиме холостого хода. Если бы вторичная обмотка была сцеплена с первичной всем магнитным потоком, т. е. идеально, а свойства сердечника тоже были бы идеальными, то напряжение на вторичной обмотке повторяло бы по форме напряжение на первичной. Если намотать первичную обмотку на одной стороне магнитопровода, а вторичную — на другой, то путь магнитного

тока, «сцепляющего» обмотки, распространится по всему кольцу сердечника. Если же все обмотки равномерно распределить по кольцу, то, хотя это трудно объяснить достаточно понятно, путь «сцепляющего» потока в сердечнике резко сокращается, а значит, сокращаются и потери на намагничивание, и, главное, улучшается сцепление между обмотками, уменьшается индуктивность рассеяния. Неполнота сцепления характеризуется эквивалентной индуктивностью рассеяния, и вот эту индуктивность рассеяния, а не индуктивность самой по себе обмотки нужно стараться сделать небольшой. Для этого нужно, особенно при использовании обычных ферритов, располагать обмотки как можно плотнее друг к другу и к сердечнику. Если коэффициент трансформации не равен единице, то провода двух обмоток не могут идти рядом параллельно, приходится мотать одну обмотку «павалом» поверх другой, лучше маловитковую поверх многовитковой.

Нужно знать, что диэлектрическая проницаемость ферритов очень велика, поэтому для уменьшения собственной емкости обмоток и их взаимной емкости следует, притушив у ферритового кольца фаски, обмотать его затем несколькими слоями фторопластовой или тонкой полиэтиленовой пленки, а уже затем положить обмотки, также изолировав их друг от друга пленкой. Очень важно располагать все детали схемы, в том числе усилительный элемент — лампу или транзистор, близко друг к другу и здесь же располагать малоиндуктивный замыкающий конденсатор.

Читатель, конечно, отдает себе отчет в том, что идеальный трансформатор, нагруженный на сопротивление R , эквивалентен по первичной обмотке сопротивлению R/n^2 , где $n=N_2/N_1$ — коэффициент трансформации. Аналогично трансформатор, нагруженный на емкость C , эквивалентен по первичной обмотке емкости Cn^2 , а нагруженный на индуктивность L — индуктивности L/n^2 . Отсюда следует, что в первом приближении хороший трансформатор можно рассматривать как преобразованную нагрузку, а вовсе не как собственную индуктивность. Во втором приближении, обычно достаточном, последовательно с преобразованной нагрузкой нужно представить себе индуктивность рассеяния $L_{\text{рас}}$. С увеличением количества витков и индуктивности обмоток трансформатора индуктивность рассеяния также несколько возрастает, поэтому оптимальное количество витков приходится иногда подбирать опытным путем. КПД небольших высокочастотных или импульсных трансформаторов обычно составляет 60—80 %. Сердечники трансформаторов очень легко насытить сравнительно небольшим постоянным током. Поэтому наилучший для них режим, когда $\bar{I}_1 + \bar{I}_2/n \approx 0$, где $\bar{I}_{1,2}$ — средний по времени ток первичной и вторичной обмоток. Иногда вводят размагничивающую обмотку, но она должна быть включена в источник тока через сопротивление или индуктивность, что несколько загромождает схему.

Ферриты имеют невысокую точку Кюри, и поэтому нагрев сердечника быстро ухудшает свойства импульсного трансформатора. Преимущества применения трансформаторов таковы, что не следует, если речь идет о фронтах импульсов более 50—70 нс, бояться их использовать.

Сеточная (базовая) обмотка трансформатора блокинг-генератора обычно содержит в 2—5 раз меньше витков, чем анодная (коллекторная). Чтобы фронт импульса был короче, а управляющий электрод не перегружался, в цепь сетки или базы следует включить сопротивление, как и в случае мультивибратора.

Опыт показывает, что блокинг-генератор работает надежно, если не перегружать транзистор или лампу по току и напряжению, особенно в момент открывания. Поэтому R_6 выбирают из условия максимального тока базы, и иногда,

жертвует КПД, включают в цепь коллектора последовательно с первичной обмоткой сопротивление R_k .

Запуск блокинг-генератора может осуществляться различными способами: прямо на базу, на эмиттер и даже через дополнительную обмотку трансформатора, если нужно развязаться по напряжению. Обратные выбросы, могущие привести к пробое коллекторной цепи, демпфируются диодами. В смысле скважности блокинг-генератор обычно хуже запертого одновибратора, его температурная стабильность не лучше, но мощность импульсов и КПД много выше; к тому же он, как уже говорилось, легко приспосабливается к сопротивлению нагрузки.

Дискриминация импульсов по амплитуде

В настоящее время промышленность выпускает несколько типов амплитудных анализаторов импульсов. Это достаточно сложные изделия и сейчас, видимо, не следует заниматься разработкой таких приборов в физических лабораториях. Поэтому работа существенно более сложных схем амплитудных анализаторов будет изложена очень схематично.

Есть два главных метода построения амплитудных анализаторов: в основе первого лежит принцип порогового детектирования, в основе второго амплитудно-временное преобразование сигнала.

Основным элементом в первом случае является интегральный пороговый детектор (рис. 3.23), пропускающий импульсы с амплитудой больше заданной. С помощью двух таких детекторов 3 и 3', двух формирователей 4 и 4' и схемы антисовпадений T легко синтезировать одноканальный дифференциальный анализатор. Попадание амплитуды сигнала в интервал между U и $U + \Delta U$ означает, что один формирователь сработает, а другой — нет. «Схема» антисовпадений в простейшем виде представляет собой ферритовый трансформатор с тремя обмотками: двумя первичными, включенными в формирователи 4 и 4', и одной выходной — вторичной. В случае срабатывания двух формирователей первичные обмотки гасят сигналы друг друга, и сигнал на вторичной обмотке появляется лишь на короткое время, связанное с крутизной фронта анализируемого импульса, — из-за неидеального фронта дискриминатор 3 всегда срабатывает позже, чем 3'. Поэтому цепочка RC на выходе подавляет короткий «разностный» импульс. Ясно, что длительность импульса формирователей должна быть в несколько раз больше, чем максимальная длительность фронта анализируемых импульсов.

Приведенная схема без труда обобщается, и с помощью интегральных анализаторов и n разностных трансформаторов можно создать n -канальный дифференциальный амплитудный анализатор. Однако при большом числе каналов такая схема, во-первых, громоздка и, во-вторых, нестабильна, так как ΔU между

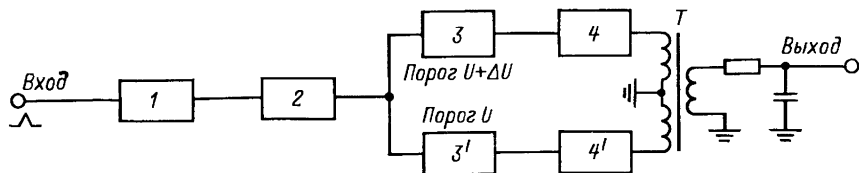


Рис. 3.23. Структурная схема одноканального дифференциального анализатора

каналами уменьшается, а счет каждого канала пропорционален ΔU_i , и реальный спектр искажается недостаточно одинаковыми интервалами ΔU_i . Поэтому многоканальные анализаторы сейчас обычно строят по принципу амплитудно-временного преобразования. Сигнал с амплитудой U преобразуется в первом блоке такого анализатора в сигнал с длительностью $\tau = kU$, т. е. пропорциональной U . После такого преобразования длительность полученного импульса измеряется по числу сосчитанных импульсов ударного, т. е. мгновенно включающегося, управляемого этим импульсом генератора, и сигнал о приходе импульса соответствующей длительности (амплитуды на входе) направляется в нужную ячейку памяти. Такие анализаторы не могут иметь очень высокое быстродействие при большом числе каналов, однако они автоматически, если кривая преобразования $U \rightarrow \tau$ линейная, обеспечивают однородность интервалов ΔU_i на каждый канал, а число каналов лимитируется только объемом памяти и практическим смыслом.

Интеграторы и пересчетные устройства

Схемы такого рода сейчас приходится создавать редко, поэтому ограничимся некоторыми замечаниями. Интеграторы показывают среднее количество импульсов за установленный интервал времени прямо на шкале прибора. Поскольку обычно измеряется статистическое среднее при случайном распределении импульсов во времени, то показания стрелки флуктуируют со временем RC , которое всегда имеет у этих приборов несколько диапазонов, обычно от долей секунды до минуты. Иногда, как это уже отмечалось автором, в результате схемных недоработок промышленные интеграторы имеют одно τ на спад и другое на подъеме счетной характеристики, т. е. если мгновенно включить поток импульсов, то показания интегратора будут возрастать со временем по закону $n = n_0(1 - \exp(-0.69/\tau_1))$, а если тот же источник мгновенно выключить, то спад показаний пойдет по закону $n = n_0 \exp(-0.69/\tau_2)$. Это приводит к ошибке в оценке интенсивности статистически распределенных импульсов при градуировке прибора по периодическим импульсам от генератора.

Серьезным недостатком интеграторов является наличие падающей части счетной характеристики при увеличении частоты импульсов. Присутствие этой части характеристики, если не усложнять схему «подстраховывающими» блоками пониженной чувствительности, неизбежно. Поэтому в ответственных слу-

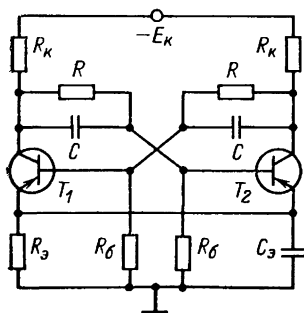


Рис. 3.24. Симметричный триггер с автоматическим смещением [19]

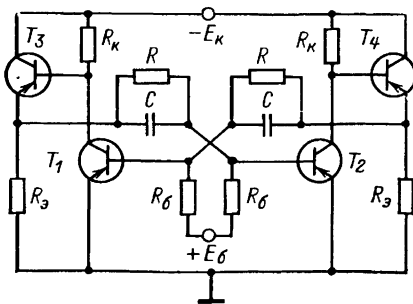


Рис. 3.25. Схема триггера с эмиттерными повторителями [19]

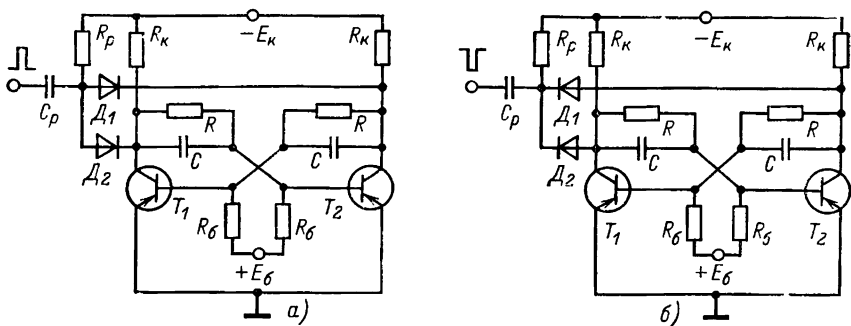


Рис. 3.26. Запуск триггера через два диода для уменьшения его обратного влияния на схему запуска [19]:
 а — импульсы положительной полярности; б — импульсы отрицательной полярности

чаях, когда измеряют уровень мощности критической сборки атомного реактора, пучка ускорителя, активность мощного источника, необходимо, чтобы область падающей характеристики была подстрахована другими приборами, дающими аварийный сигнал.

Пересчетные приборы, с помощью которых производится точный счет импульсов, подчас обладают недостаточным быстродействием, намного уступающим возможностям люминесцентных детекторов, усилителей и формирователей импульсов. Поэтому приходится вводить поправки на просчеты, что существенно уменьшает точность эксперимента. Повысить быстродействие стандартного пересчетного блока не меньше чем на порядок довольно легко с помощью включения перед его входом быстрой пересчетной ячейки. Например, дополнительный пересчет на четыре уменьшает просчеты не в четыре, а в гораздо большее количество раз, так как вероятность быстрого следования друг за другом восьмерки импульсов очень мала, а именно восьмерка (два импульса после быстрого пересчета) может быть просчитана основным блоком. Наибольшим быстродействием обладают триггеры, собранные на быстрых транзисторах, например на ГТ-313. Их мертвое время меньше, чем у интегральных схем, и может при хорошем подборе элементов и монтаже составлять 200—300 нс, что обычно вполне достаточно. Лучше всего такой блок быстрого счета помещать прямо в предусилитель, если не производится дифференциальный анализ импульсов. Схема симметричного триггера с автоматическим смещением приведена на рис. 3.24 [19]. Для надежного запирания одного из транзисторов должно выполняться условие:

$$R_3 \geq R_6 R_K I_{K0} / (E_K - R_6 I_{K0}).$$

Поскольку второй транзистор при этом насыщен, то

$$I_{K0} \approx E_K / (R_3 + R_K).$$

Применяя в схеме триггера эмиттерные повторители, можно значительно увеличить его быстродействие (рис. 3.25). Кроме повышения быстродействия эмиттерные повторители намного повышают нагрузочную способность триггера. Для устойчивой работы необходимо подавать на вход триггера оптимально подобранные по амплитуде и длительности импульсы. Длительность импульса

обычно определяется требуемым быстродействием, а амплитуда не должна быть близка к минимальной запускаящей, так как при этом быстродействие падает. Триггеры обычно запускают через пару диодов на коллекторные или базовые цепи (рис. 3.26).

3.4. ВЫХОДНЫЕ РЕГИСТРИРУЮЩИЕ И ПОКАЗЫВАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Если изменение параметров во времени происходит не очень быстро, можно считать показания со шкал приборов, но чаще приходится вести автоматическую запись результатов. Первичные результаты во многих случаях обрабатывают затем на ЭВМ, что требует либо считывания данных с полученных записей, либо автоматического фиксирования результатов с помощью перфораторов или магнитных лент. В результате фиксирование и последующая обработка информации становятся важной задачей экспериментальной техники, а создание центров обработки информации — неременной составной частью при сооружении крупных установок.

Одно время цифровые измерительные приборы стремились установить повсюду. От них добились огромной точности, перегрузочной способности и неплохого быстродействия, хорошей фильтрации наводок. С этих пор они не стали хуже, но стало ясно, что иметь в лаборатории массу дорогих, практически не ремонтируемых приборов доступно далеко не всем. К тому же при быстром изменении величины следить за шкалой такого прибора трудно, а цифровая запись не так проста. Например, при параллельной работе нескольких приборов необходима синхронизация их показаний. В то же время большинство экспериментов ставится при ожидаемой погрешности хуже 1 %, аналоговые приборы вполне эту точность обеспечивают. Поэтому автор, поработав на тех и других приборах, отдает предпочтение аналоговым.

Для регистрации во времени быстропротекающих процессов почти единственным прибором является электронный осциллограф. Если процесс повторяется, то на экране с помощью ждущей развертки легко воспроизводится зависимость параметра от времени, а если процесс можно повторять нечасто, например при взрывных экспериментах, изучении действия мощных лазеров и т. п., то запись проводится на осциллографы с запоминающими трубками или с фотоприставками.

Число типов приборов современной лаборатории, в том числе осциллографов, огромно. Поэтому инструкции о поверке и профилактике приборов реально не всегда выполняются. К тому же такие характеристики прибора, как «полоса пропускания 50 МГц», не дают достаточно полного представления о реальной частотной характеристике. Ряд кинескопов, особенно двухлучевых, имеют не вполне линейную характеристику по оси Y и т. п. При необходимости провести не только полуколичественный, а достаточно точный эксперимент лучше всего проверить весь тракт от датчика до выхода, подавая на вход очень короткие импульсы. Зарегистрировав

форму импульса на выходе, пропущенную всем трактом, можно получить хорошее представление о функции разрешения системы. Амплитудные характеристики снимают обычным порядком. Более медленные процессы со спектром частот до нескольких килогерц можно фиксировать с помощью шлейфовых осциллографов. Их недостаток — невозможность немедленно увидеть результат (кроме осциллографов с ультрафиолетовыми осветителями). Но у них и большие достоинства: одновременная запись многих параметров, высокая точность и стабильность. Запись такого осциллографа на достаточно широкой бумаге (120—300 мм) представляет собой великолепный документ об эксперименте. В случае, если есть опасность перегрузить и вывести из строя вибраторы шлейфового осциллографа, их можно зашунтировать кремниевыми диодами. Таким путем можно вести запись параметра одновременно несколькими вибраторами с различной чувствительностью и сильно увеличить динамический диапазон прибора. По оценкам автора, кратковременная перегрузочная способность отечественных вибраторов по отношению к отклонению записи на 1 мм достигает 10^5 . Из-за отсутствия внутреннего сердечника рамки вибраторов не ударяются о детали при перегрузке и уходе зайчика за шкалу, поэтому вибратору страшны только ускорения, возникающие под действием импульса тока, и тепловое воздействие тока. Геофизики для своих нужд изготовляют низкочастотные вибраторы с высокой чувствительностью, порядка 10^{-7} А/мм, что позволяет в большинстве случаев использовать их прямо без усилительных каскадов.

Медленно меняющиеся величины — со спектром частот до нескольких герц фиксируют с помощью самопишущих приборов, тип и даже принцип действия которых весьма различны. Есть два варианта использования таких приборов. Чаще всего их изготовляют в виде самостоятельных приборов, обычно с записью напряжения в функции времени, иногда с переключением пределов измерения и измеряемой величины: напряжения или тока. Эти приборы не реверсируются, повтор записи или запись эксперимента в обратном порядке можно делать только на продолжении диаграммной ленты, причем обратная запись будет инвертирована по оси t . Если необходимо совместить прямую и обратную записи, нужно положить обратную запись на прямую «лицом вниз» и рассматривать обе записи на просвет. Протяжка бумажной ленты осуществляется, как правило, синхронными двигателями с погрешностью скорости, определяемой стабильностью частоты сети. Люфты редуктора и проскальзывание бумаги по валикам ведут к кратковременному непостоянству скорости движения ленты. Поэтому при необходимости точной временной привязки либо синхронизации двух приборов следует применять метки времени, легко совмещаемые с основной записью. Существуют также и двухкоординатные самописцы, у которых отклонение пера как по оси Y , так и по оси X происходит под действием напряжения. Эти приборы рисуют функцию $U_y = f(U_x)$ и могут работать как при прямом, так и при обратном ходе эксперимента, рисуя петлю «гистерезиса», т. е. несовпадения

хода процесса в двух направлениях, его неравновесности. Когда время является косвенным параметром изучаемой зависимости, применение этих приборов оказывается очень полезным.

Второй вариант исполнения самописцев заключается в том, что их кинематическую часть встраивают в один из физических приборов, например спектрограф. При этом ось диаграммы X непосредственно связывается с узлом поворота дифракционной решетки, реохордом частоты ЯМР-спектрометра и т. п. Такие самописцы обычно снабжают диаграммными бланками, размеченными по оси X в единицах измерительного прибора, что позволяет получать результат прямо в шкале длин волн или обратных сантиметров и т. п. Разумеется, наличие такой шкалы не избавляет экспериментатора от ответственности за измерения. Шкалу X фирменного прибора следует в ответственных случаях градуировать и проверять.

Большинство самопишущих приборов используют вибропреобразователи для преобразования постоянного напряжения в переменное, управляющее реверсивным двигателем. Эта схема очень проста и совершенна, но чувствительна к наводкам переменного тока от сети. Дело в том, что вибропреобразователь сам работает от сети, и поэтому фаза сетевой наводки в момент переключения его контактов будет одна и та же, т. е. усреднение наводки по фазе и обращение ее в нуль не произойдет. Это особенно надо иметь в виду, когда записывается ЭДС термопары, при наличии вблизи нее мощного переменного тока нагревателей. При необходимости перейти к другой шкале чувствительности или для полного подавления наводки переменного тока можно включить самописец как вторичный прибор на выходные клеммы фотокомпенсационных усилителей или гальванометров, например, типа Ф-116.

Существуют самопишущие приборы со встроенными регулирующими контактами, включение которых происходит в выбранном перед началом работы месте шкалы. Это не значит, что можно, скажем, включив любой нагреватель через эти контакты, получить заданный закон регулирования. Инерция термопары и теплоемкость нагревателя при большом избытке его мощности могут легко привести к большим положительным выбросам температуры над зоной регулирования. В этом смысле контактные регуляторы лабораторных электропечей, включающие печь на всю мощность независимо от требуемой температуры, несовершенны. Включив нагреватель промышленной печи, отдельно от ее автоматики, через ЛАТР или регулировочный дроссель насыщения, можно намного улучшить ее работу и увеличить ресурс нагревателя.

Если необходимо одновременно с записью получить информацию в цифровом виде, то можно применить параллельное включение цифрового прибора и самописца. Нужно при этом учитывать, что и самописец, и цифровой прибор опираются при измерении на внутренний эталон напряжения и вырабатывают свою ЭДС, сравниваемую с поступающей. Поэтому они могут влиять друг на друга, уменьшая точность показаний. При параллельном включении уравновешивающихся приборов процесс настройки одного из них влия-

ст на показания другого, но зато настроившийся, уравновесившийся прибор практически не потребляет тока, т. е. имеет высокое внутреннее сопротивление.

3.5. СВЯЗЬ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ С ЭВМ

Существует несколько подходов к этой достаточно сложной задаче. Логически наиболее простой путь — связать экспериментальную установку и ЭВМ в одну систему и обеспечить работу такой системы. В то же время габариты и сложность обслуживания больших ЭВМ привели к более сложной связи базовой ЭВМ и экспериментальных устройств. При этом базовую ЭВМ используют в основном для решения математических задач и лишь иногда переключают на обработку результатов и даже управление проводимым экспериментом, т. е. ЭВМ работает в режиме «разделенного времени». При этом подходе необходимо обеспечить надежную связь с ЭВМ, например расположить вблизи экспериментальной установки входные и выходные устройства, согласовывать по времени или устанавливать «номер приоритета» различных задач, решаемых на ЭВМ. Между тем совершенствование ЭВМ, повышение их надежности позволяют уже сейчас эксплуатировать их сравнительно просто, а математическое обеспечение малых ЭВМ таково, что вполне позволяет решать задачи обработки экспериментальных данных и даже управлять ходом эксперимента. Поэтому автору (быть может, субъективно) кажется, что использование больших ЭВМ в режиме разделенного времени является, как правило, нерациональным. Сейчас многие исследовательские коллективы включают в свои ряды математиков или физиков-теоретиков (конечно, умеющих программировать) и переходят к «самообслуживанию» на своих ЭВМ. Видимо, этот путь наиболее оптимален. Сейчас задачу сопряжения экспериментальных устройств с входом ЭВМ решают в основном сами экспериментаторы, но работа специалистов на этом пути ведется достаточно интенсивно, поэтому связь экспериментальных устройств с ЭВМ в ближайшем будущем станет таким же простым делом, как сейчас — пользование хорошим микрокалькулятором.

Сложнее обстоит дело с управлением ЭВМ ходом эксперимента. Нужно очень тщательно взвесить целесообразность выбора такого пути. Во всяком случае, нужно вначале хорошо представить себе алгоритм управления, сформулировать доступную машине логику изменения режимов. Если на производстве однажды отработанный алгоритм управления будет затем реализован тысячи раз и многократно окупит затраты на свою разработку, то научно-исследовательский эксперимент ведут лишь один или несколько раз и есть опасность, что время и средства, затраченные на полную автоматизацию, только отодвинут его проведение. В кругосветное плавание пошли те суда, которые только-только могли это сделать. Наука во многом похожа на то великое время. Если можно плыть на каравелле — не дожидайтесь лайнеров!

ГЛАВА 4

РАБОТА С ВЫСОКИМ НАПРЯЖЕНИЕМ

Аппаратура высокого напряжения, создаваемая в физических лабораториях, подчас существенно отличается от аппаратуры тех же параметров, применяемой в промышленности. Причины разли-

чий вполне объективны. Срок эксплуатации промышленной аппаратуры должен составлять десятки лет, а лабораторная установка существует не более нескольких лет, причем время ее активной работы еще меньше. Степень надежности физической установки также по понятным причинам может быть меньше, чем у промышленного оборудования; она может конструироваться, а иногда по необходимости и конструируется из расчета предельных параметров материалов и среды.

Кроме того, создание установки в единственном экземпляре диктует иные, чем в промышленности, конструктивные решения; в частности, больше применяют пластмассы и стекла и меньше используют электротехнический фарфор.

Эти особенности ни в какой мере не затрагивают общих правил техники безопасности и других обязательных условий сооружения и эксплуатации высоковольтных установок.

4.1. ИСТОЧНИКИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В качестве источников постоянного высокого напряжения используют выпрямители, работающие от сети 50 Гц, высокочастотные выпрямители и электростатические генераторы. В редких случаях применяют батареи с радиоактивным препаратом, заряжающим центральный электрод. В качестве источников импульсного высокого напряжения применяют каскадные искровые генераторы, импульсные трансформаторы и индуктивные накопители с соответствующими модуляторами.

Трансформаторы

Высоковольтные трансформаторы на частоту 50 Гц выпускаются промышленностью в большом ассортименте. Силовые трансформаторы рассчитаны на работу под полной нагрузкой в течение длительного времени; испытательные трансформаторы меньше по габаритам и обычно используются в режиме кратковременных включений [21]. Выпускаются также и блоки трансформаторов с высоковольтными выпрямителями, например для рентгентехники. Поэтому если для проектируемой установки нужен трансформатор, то, как правило, его можно приобрести. Такой трансформатор можно располагать вне лаборатории: в сухом внутреннем помещении или даже на улице. Отрезки высоковольтного кабеля, необходимые для ввода напряжения в лабораторию, остаются при прокладке электрических сетей, и энергетики охотно передадут их в Ваше распоряжение.

Как правило, требуется регулировать высокое напряжение от нуля и до допустимого предела: при мощности до 10 кВт этого можно достичь с помощью регулировочных автотрансформаторов, а при большей мощности, например, с помощью дросселей насыщения. Эти способы регулирования не всегда обеспечивают достаточную плавность; автотрансформаторы малоприспособлены для создания

систем стабилизации. Пожалуй, в наибольшей степени отвечает лабораторным требованиям, несмотря на громоздкость, система мотор-генератор — повышающий трансформатор. Такие системы мощностью от одного до сотен киловатт можно собрать из промышленного оборудования. Если использовать генераторы повышенной частоты (обычно 400 Гц), то это в большой степени облегчит фильтрацию пульсаций высокого напряжения. Регулирование и стабилизацию напряжения при такой схеме осуществляют управлением током подмагничивания генератора с помощью электронных систем. Тиристорные схемы регулирования могут быть компактнее электронного преобразователя, но разработка их сложнее, а конечный результат будет несколько хуже.

Следует учитывать тот факт, что нельзя сделать маломощный трансформатор на очень высокое напряжение: между минимальной мощностью и напряжением трансформатора из-за необходимости обеспечить резонансную частоту высоковольтной обмотки выше 50 Гц существует зависимость. Поэтому все высоковольтные схемы на основе трансформаторов промышленной частоты опасны для жизни, чего нельзя сказать о некоторых других схемах получения высокого напряжения.

Если не удалось достать готовый высоковольтный трансформатор, не спешите браться за его изготовление: это не так просто, а главное — имеется большое количество специализированных мастерских, которые сделают это профессионально. Проведите расчет [22], согласуйте конструкцию [23] и постарайтесь обеспечить заказ материалами. Если Вы позаботились об этом в начале работы, силовая часть установки будет изготовлена вовремя.

Нужно отметить, что проще регулировать и стабилизировать высокое напряжение, полученное с использованием машинных генераторов, а не тиристорных преобразователей; машинные генераторы, кроме того, не боятся ни режима холостого хода, ни кратковременных замыканий.

Выпрямители

Простейшая и одна из самых распространенных в высоковольтной технике — схема однополупериодного выпрямителя (рис. 4.1). Преимущество этой схемы, во-первых, в том, что требуются лишь одна цепь диодов, рассчитанных на двойное амплитудное значение напряжения, и одна емкость. Второе преимущество — высоковольтный вывод у трансформатора всего один, другой конец обмотки высоковольтного трансформатора заземлен. Недостатками этой схемы являются: повышенный уровень пульсаций и низкий коэффициент мощности трансформатора [21]. При высоких напряжениях LC-фильтры применяют редко из-за громоздкости, поэтому с пульсациями обычно приходится мириться. При наличии емкости напряжение холостого хода выпрямителя в 1,41 раза превышает среднее (действующее) напряжение вторичной обмотки.

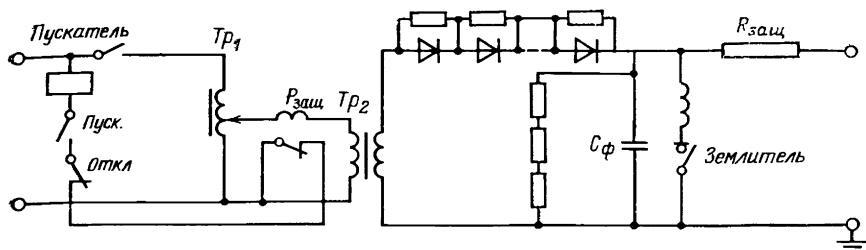


Рис. 4.1. Схема высоковольтного однополупериодного выпрямителя:

$Tr1$ — регулировочный автотрансформатор; $Tr2$ — повышающий трансформатор; $P_{зщ}$ — реле защиты по току; $R_{зщ}$ — сопротивление, защищающее нагрузку при пробое; $З$ — заземлитель

Подсчитать амплитуду пульсаций нетрудно. В предположении, что пульсации малы по сравнению с напряжением ($\Delta U \ll U$), а ток нагрузки I постоянен, можно привести формулу для оценки напряжения пульсаций однополупериодного выпрямителя:

$$\Delta U = I / C f,$$

где ΔU — пульсация напряжения; f — частота, Гц; C — емкость фильтра, Ф. Эта формула дает несколько завышенные значения пульсации, но не более чем на 20—30 %.

Сделать однополупериодный выпрямитель с малым уровнем пульсаций (доли процента) за счет увеличения емкости трудно — запасенная энергия нарастает настолько в рабочей части схемы, что может произойти разрушение элементов конструкции при пробое да и включение схемы с конденсатором большой емкости затруднено. Если потребление тока постоянное, то всегда безопаснее между конденсаторами и нагрузкой включить мощный высоковольтный защитный резистор такого номинала, чтобы рабочее падение напряжения на нем было не более 1—5 %. В случае пробоя сопротивление нагрузки резко упадет, и на защитном резисторе, выдерживающем всю энергию разряда $C U^2 / 2$, выделится большая часть энергии. Этот резистор особенно необходим при работе с вакуумными ускоряющими трубками на несколько сот киловольт.

Если потребление тока импульсное, но соответствующее за каждый импульс лишь малому разряду C_{Φ} , то хорошей защитой от разрушительного пробоя будет схема, изображенная на рис. 4.2. В этой схеме $C_{имп}$ будет, а C_{Φ} не будет полностью разряжаться в момент импульса. Такая схема эффективна только если $C_{имп} \ll C_{\Phi}$.

При работе с импульсными разрядами очень часто заряжаемую конденсаторную батарею собирают из многих промышленных конденсаторов. В случае пробоя одного из них вся энергия батареи выделяется в зоне пробоя, что приводит к значительным разрушениям.

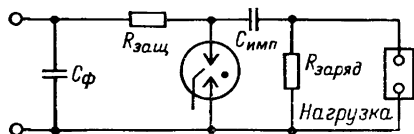


Рис. 4.2. Схема защиты от пробоев при нагрузке, потребляющей ток импульсами с небольшой общей энергией

Например, батарея из керамических конденсаторов К15-10, каждый из которых имеет емкость 10^4 пФ и рабочее напряжение 40 кВ, может работать только в масле. При пробое одного из конденсаторов гидравлический удар вызывает такие последствия, которые лучше видеть, чем описывать. Самое неприятное, что после такого пробоя даже целые на вид конденсаторы могут иметь внутри микротрещины, поэтому вместо масла лучше использовать электропрочный газ. Каждый конденсатор имеет максимально допустимый ток разряда; электрические силы, возникающие при мощном разрядном токе и пропорциональные I^2 , ломают керамику, постепенно нарушают целостность других твердых диэлектриков. Поэтому при монтаже батарей конденсаторов, если это возможно, следует каждый конденсатор включать через резистор или дроссель с небольшим сопротивлением или индуктивностью, способными выдержать всю энергию ее разряда.

Для экономии места иногда батарею собирают из электролитических конденсаторов, включенных последовательно. Так делать можно, но нужно учитывать особенности этих конденсаторов. Во-первых, такую батарею необходимо собирать с сопротивлениями делителя напряжений. При работе в непрерывном режиме это относится ко всем типам высоковольтных конденсаторов, включаемых последовательно. Во-вторых, пульсации напряжения частотой 50 Гц и выше во время работы не должны быть значительными, не более 10 %, а для мощных конденсаторов 300 В, 1200 мкФ и того меньше. В-третьих, только что полученные конденсаторы нуждаются в тренировке. Напряжение на батарее придется поднимать несколько часов. Это же придется делать после длительных перерывов в работе, но последующее восстановление будет происходить гораздо быстрее. В-четвертых, батарея электролитических конденсаторов, если она работает на полный разряд, не должна сильно переполсовываться в конце разряда.

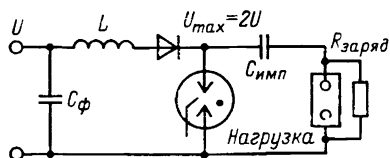
Мощные батареи конденсаторов заряжаются медленно, а зарядный ток непостоянен во времени, экспоненциально уменьшаясь до нуля. Автоматизировать процесс заряда батареи можно с различной степенью приближения к оптимальному режиму. Делают даже тиристорные схемы управления, ведущие заряд в режиме постоянного тока; делали такие схемы и в лаборатории автора, но увлекаться ими не стоит — лучше решать научные задачи.

Нужно отметить, что заряд конденсатора от источника постоянного напряжения через резистор с активным сопротивлением всегда происходит с энергетическим КПД не более 50 %. Действительно, возьмем RC -цепь и подадим на вход в момент времени $t=0$ напряжение U_0 . Тогда на сопротивлении R текущее напряжение будет $U_R = U_0 \exp(-t/RC)$ и энергия, выделенная до конца заряда:

$$E = \int_0^{\infty} \frac{U_0^2 \exp(-2t/RC)}{R} dt = \frac{CU_0^2}{2}.$$

Та же самая энергия запасается и в конденсаторе, т. е. теоретический КПД равен 50 %. В случае заряда конденсатора через дроссель теоретический КПД тоже может оказаться не более 50 %, если

Рис. 4.3. Схема заряда емкости $C_{имп}$ через индуктивность и диод



не принять меры против рассеяния энергии при возникающих в этом случае затухающих колебаний. Простым и хорошо известным решением, повышающим КПД при заряде конденсатора, является включение диода последовательно с дросселем (рис. 4.3). В такой схеме конденсатор заряжается до $2U$ на первой четверти волны колебания и КПД может быть близок к 100 %. Конструкторы тиратронных модуляторов такой схемой часто пользуются.

В схеме однополупериодного выпрямителя ток высоковольтного трансформатора очень сильно пульсирует и имеет постоянную составляющую, что существенно снижает его допустимую среднюю мощность. Есть две схемы двухполупериодного выпрямления — со средней точкой обмотки трансформатора и мостовая схема. В случае высоких напряжений мостовая схема предпочтительнее, так как не требует изготовления трансформатора с удвоенной вторичной обмоткой и удвоенной максимальной разностью напряжений. Поскольку сейчас чаще применяются диоды, чем кенотроны, то сколько использовать: две или четыре колонки диодов — не столь важно.

Трансформатор в двухполупериодной схеме работает лучше, чем в однополупериодной, минимальная частота пульсаций выше (100 Гц), соответственно меньше и амплитуда пульсаций. При применении LC - или RC -фильтра эти преимущества возрастают. Следует отметить, что если в однополупериодной схеме диод должен выдерживать двойное пиковое напряжение и неблагоприятный режим по току, то в мостовой схеме каждое плечо моста должно выдерживать только одинарное пиковое напряжение, а токовый режим плеча тоже в два с лишним раза менее напряженный.

Мостовая схема имеет один недостаток: обмотка может работать только на один выпрямитель. Отводы от нее могут служить только для изменения напряжения, подаваемого на этот мост.

Наименьшим уровнем пульсаций обладает двухполупериодная схема выпрямления трехфазного тока — схема Ларионова (рис. 4.4, а). График выпрямленного напряжения при использовании этой схемы и полной симметрии фаз показан на рис. 4.4, б. Ясно, что пиковое напряжение выпрямителя равно пиковому межфазному, т. е. среднему межфазному, умноженному на 1,41. Если пиковое напряжение принять за 1, то минимальное будет равно $\sin 120^\circ = \sin 60^\circ = 0,866$. Строго говоря, пульсации несинусоидальны и усреднять их надо интегрированием, но с приемлемой точностью среднее значение будет равно 0,94, а отклонение от него в большую сторону 6, в меньшую 8 %.

Минимальная частота пульсаций при строгой симметрии фаз

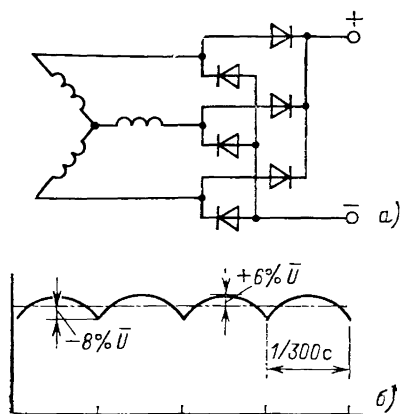


Рис. 4.4. Трехфазная схема выпрямителя (а) и график выпрямленного напряжения (б)

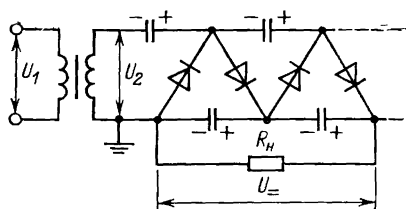


Рис. 4.5. Общая схема умножения напряжения

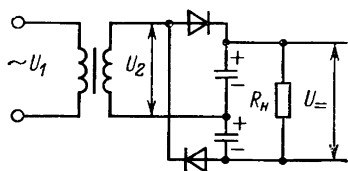


Рис. 4.6. Специальные схемы удвоения и утроения напряжения

для этого выпрямителя равна 300 Гц; правда, фазы редко бывают симметричны с погрешностью меньше чем 3—5 % (кроме мотор-генератора). Повышающие фазные обмотки, если они включены звездой, все равно нельзя в этом выпрямителе заземлять или присоединять к любому постоянному потенциалу.

Умножение высокого напряжения. Изготовление трансформаторов на большие напряжения — дело сложное, поэтому очень часто применяют схему каскадного выпрямителя (рис. 4.5). Для удвоения напряжения помимо последовательной схемы, совпадающей с общей, есть параллельная схема (рис. 4.6). Хотя может показаться, что использование общей схемы при большом коэффициенте умножения позволяет обходиться весьма простыми трансформаторами, подробный математический анализ работы каскадного выпрямителя показывает [21], что падение напряжения под нагрузкой ΔU резко возрастает с увеличением числа каскадов n :

$$\Delta U = \frac{I_{cp}}{fC} \left(\frac{2}{3} n^3 + \frac{1}{2} n^2 + \frac{n}{6} \right),$$

где I_{cp} — средний ток нагрузки; f — частота; C — емкость, одинаковая для всего каскада. Эта формула не учитывает конечное сопротивление обмоток трансформатора и вентилялей. Оптимальный путь состоит в удвоении — учетверении напряжения, не более, однако чем меньше потребляемый ток и требования к КПД, тем большее количество каскадов можно использовать вместо изготовления сложного трансформатора. Имеющиеся сейчас высоковольтные кремниевые диоды позволяют создавать по этой схеме достаточно компактные высоковольтные блоки, особенно с применением масляной и другой электропрочной изоляции.

Высокочастотные выпрямители. Повышение частоты ведет к

уменьшению размеров трансформаторов. Улучшается регулирование схем, уменьшается их опасность. Поэтому возможности питания высоковольтных схем от источников напряжения повышенной частоты следует активно использовать. При не очень малых мощностях — около киловатта и более — самым простым и надежным путем, как уже отмечалось, является использование преобразователей частоты: такие преобразователи в машинном и тиристорном исполнении выпускают в СССР в широком ассортименте: на частоты 200, 400, 500 Гц и более с однофазным или трехфазным выходом. Трансформаторная сталь обычной толщины 0,35 мм достаточно хорошо работает на частотах до 400 Гц, а тонкая ($\sim 0,1$ мм) — до нескольких килогерц; в то же время потери в трансформаторном масле при повышенных частотах могут стать заметными и зависеть от качества применяемого масла. Некоторые типы кремниевых высоковольтных выпрямительных столбов хорошо работают при частоте несколько килогерц, но при последовательном включении лучше снабдить их омическими делителями, так как токи утечек диодов могут быть разными.

Во многих случаях мощность выпрямителя должна быть небольшой, а напряжение — значительным. Тогда требуемое напряжение удобнее получать с помощью ламповых высокочастотных схем. Высокая частота (обычно десятки килогерц) позволяет обходиться очень малой емкостью фильтра, ток короткого замыкания таких схем невелик, он может лишь в 2—3 раза превышать рабочий ток, тогда эти схемы неопасны для жизни и могут эксплуатироваться с той же степенью защиты, как у телевизоров, медицинских аппаратов Д'Арсонваля, ионизаторов воздуха и др. На частотах в десятки килогерц кремниевые высоковольтные диоды работают уже хуже, поэтому нужно стремиться работать на частоте около 20 кГц, чуть выше звукового порога. Радиолампы для таких схем должны допускать использование максимального напряжения на аноде при заданной мощности. При мощности выпрямителя до 10—20 Вт можно использовать серию телевизионных выходных тетродов, а при мощности порядка ста ватт генераторно-модуляторные тетроды, например ГМИ-90.

Задающий генератор для таких схем делать не следует: они лучше работают в режиме автогенерации, в трехточечной схеме с автоматическим смещением и ограничением тока экранной сетки (рис. 4.7). Напряжение на экранной сетке для получения хорошего КПД следует брать возможно меньшим (меньше паспортного), в частности для лампы ГМИ-90 — не более 150—200 В.

Большое внимание при создании такой схемы нужно уделить колебательному контуру. Ферритовый сердечник (в отличие от индуктивных накопителей, см. импульсные источники высокого напряжения), лучше не применять; катушку индуктивности проще сделать однослойной, намотав ее на отрезок стеклянной трубы или трубы из бакелизированной бумаги, но ни в коем случае не из оргстекла. Индуктивность катушки контура L_k (рис. 4.7) должна быть достаточно большой, а емкость контура C_k небольшой (до 1000—

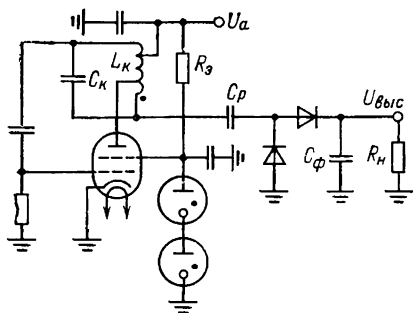


Рис. 4.7. Схема высокочастотного лампового генератора для получения высокого напряжения

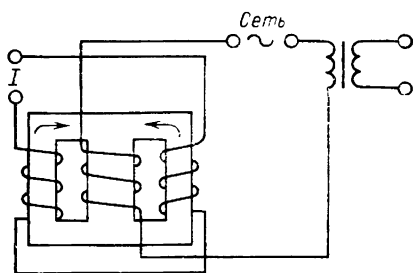


Рис. 4.8. Схема работы дросселя насыщения

3000 пФ), с малым $\operatorname{tg} \delta$, и рассчитанной на напряжение примерно вдвое больше $U_{\text{выс}}$. Импульсные керамические конденсаторы К15-10 для такой схемы не годятся (они греются), а конденсаторы КВИ-3 очень хороши.

Разделительный конденсатор C_P обеспечивает защиту цепи высоковольтного выпрямителя и выхода от цепи анодного питания, поэтому она должна быть надежной.

Генераторы такого типа дают амплитудное значение переменной составляющей на аноде лампы на 20—30 % меньше напряжения питания анодной цепи; при высокой добротности контура $L_K C_K$ и отношении длины катушки к ее диаметру порядка единицы, не более, можно получить $U_{\text{выс}}$ в 7—10 раз больше, чем U_a . В этом отношении высокочастотные генераторы уступают индуктивным накопителям, способным увеличить напряжение питания в десятки и сотни раз.

Стабилизация напряжения высоковольтных выпрямителей. Большинство физических высоковольтных установок требуют стабилизации напряжения питания. Если в низковольтных стабилизаторах управляющий элемент ставят обычно в выходную цепь последовательно с нагрузкой, то для высоковольтных схем это сделать трудно. Для источников напряжением до 30 кВ еще можно применить в качестве таких элементов генераторно-модуляторные лампы, хотя управление потенциалом сеток этих ламп будет достаточно сложным, а при больших напряжениях случайные пробои в нагрузке будут постоянно выводить эти ценные приборы из строя.

Основным способом стабилизации высоковольтных выпрямителей следует считать воздействие на первичную обмотку повышающего трансформатора.

Регулирование напряжения первичной цепи можно осуществлять с помощью таких элементов, как дроссель насыщения, который может управляться электронными элементами без перемещения механических узлов (рис. 4.8). Основой дросселя является обычное Ш-образное ярмо. На центральном стержне ярма разме-

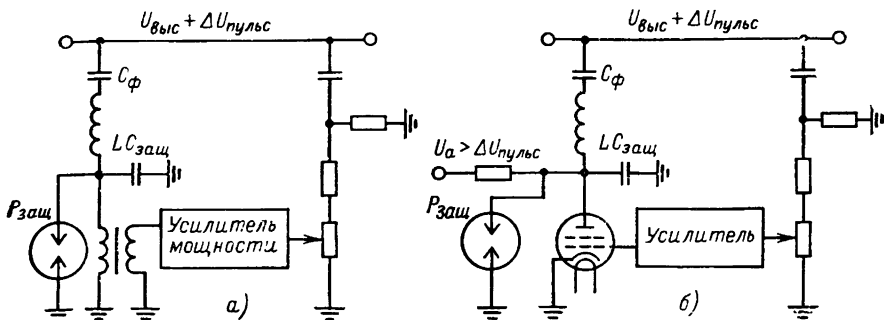


Рис. 4.9. Уменьшение пульсаций высокого напряжения с помощью обратной связи через конденсатор фильтра:

а — с использованием усилителя мощности и повышающего трансформатора; б — с использованием высоковольтного тетрода

шена обмотка, рассчитанная на тот же ток и напряжение, что и первичная обмотка регулируемого трансформатора.

На боковых стержнях ярма размещены две одинаковые обмотки для насыщения сердечника пропусканием постоянного тока. Эти обмотки включены последовательно навстречу друг другу, а ток I через них управляется с помощью электронной схемы; в качестве выходных управляющих ламп лучше всего использовать низковольтные триоды типа 6Н5С, 6С33С и т. п. Дроссель насыщения позволяет регулировать напряжение точно и плавно, но не совсем от нуля, так как его максимальная индуктивность конечна.

Плавное регулирование от нуля до максимального значения также обеспечивается хорошо известной тиристорной схемой с фазовым управлением.

Высоковольтные трансформаторы имеют сравнительно низкую резонансную частоту вторичной обмотки, поэтому при разработке тиристорного управления может потребоваться сглаживание импульсов тока в первичной цепи с помощью дросселей или резисторов [24].

Системы стабилизации через управление первичной цепью, конечно, не могут уменьшить пульсации напряжения на выходе выпрямителя. Если фильтрацию выпрямленного напряжения улучшить трудно, можно использовать следующий прием (рис. 4.9). Конденсатор фильтра C_f не заземляется, а включается своим опорным (заземленным) концом во вторичную обмотку трансформатора (а) или на анод мощной высоковольтной лампы (б).

Пульсации на выходе $\Delta U_{\text{пульс}}$ через системы обратной связи управляют напряжением на первичной обмотке трансформатора или сетке лампы и изменяют потенциал опорного конца фильтрующего конденсатора в противофазе. Если в такой схеме удастся избежать самовозбуждения, то подавление пульсаций будет значительным. Цепи $LC_{\text{защ}}$ и $R_{\text{защ}}$ защищают трансформатор или лампу при пробох $U_{\text{выс}}$.

В задаче стабилизации высокого напряжения помимо систем регулирования есть еще проблема датчика. Высокое напряжение измеряют с помощью высокоомных делителей, собранных из высоковольтных резисторов. Поскольку эти резисторы угольные, то точность и стабильность делителя хуже, чем в случае низких напряжений, стабилизируемых с помощью проволочных делителей. Вблизи делителя из-за неоднородности электрического поля может возникать коронный разряд, который вызовет перераспределение тока делителя и неточности в определении значения напряжения. Коронный разряд с самого верхнего электрода (колпака) на землю не искажает ток делителя, а разряд на землю с промежуточных электродов, если к ним подключен делитель, может повлиять на результат измерения [21]. Поэтому иногда лучше градиент напряжения вдоль высоковольтной колонны создавать одним рабочим делителем, а другой — измерительный — располагать под защитой градиентных колец, не делая от него промежуточных выводов на эти кольца.

Импульсные источники

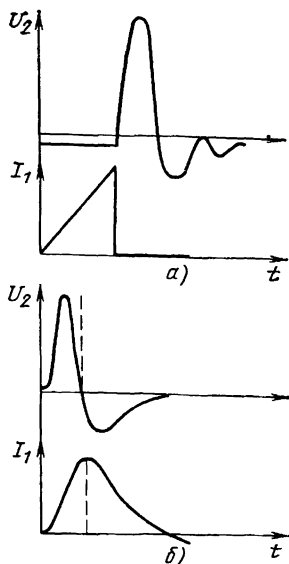
Довольно часто мощность выпрямителя не очень существенна, в этом случае одним из самых экономных решений является применение импульсных генераторов. Такие генераторы изготавливают по двум принципиально разным схемам: схеме с использованием индуктивного накопителя и схеме с импульсным трансформатором.

Классическим примером первой схемы является схема автомобильного зажигания с центральным элементом — бобиной, которую часто принимают за импульсный трансформатор. У этого «трансформатора» отношение числа витков $n_2/n_1 \approx 100$, и если бы это был действительно трансформатор, то на вторичной обмотке в этом случае у него было бы $12 \cdot 100 = 1200$ В, а на самом деле он дает 20 000 В! То же самое и у телевизионного строчного трансформатора — исходя из его моточных данных и анодного напряжения никак нельзя получить 15—20 кВ. На самом деле эти устройства работают на «экстратоках размыкания», т. е. используют запасенную магнитную энергию. Рассмотрим этот вопрос количественно. При намагничивании 1 см^3 ферромагнитного сердечника запасается магнитная энергия (Дж) $E = B^2/0,8\pi$, где B — индукция, Тл. Если сердечник стальной, то поле, близкое к насыщению, $B = 1,5$ Тл и $E \approx 1 \text{ Дж/см}^3$. Для типичного ферритового сердечника с индукцией насыщения, несколько превышающей 0,2 Тл, запасенная энергия будет равна $0,02 \text{ Дж/см}^3$.

Возьмем намагниченный сердечник объемом, например, 20 см^3 : если он стальной, то содержит 20 Дж запасенной энергии, ферритовый 0,4 Дж. В момент прекращения намагничивания — разрыва цепи тока в намагничивающей катушке — магнитная энергия, как и полагается в колебательном контуре, перекачивается в электростатическую $CU^2/2$, где C — либо распределенная емкость катушки с подключенными к ней элементами схемы, либо специально установленная емкость. В явном виде индуктивность или количество витков катушки на значение получаемого напряжения не влияют, более того, ясно, что намагничивающая и высоковольтная катушки

Рис. 4.10. Ток первичной цепи I_1 и напряжение на вторичной обмотке U_2 :

a — индуктивный накопитель; b — импульсный трансформатор



могут быть совмещены, если есть подходящий прерыватель. Практически количество витков катушки, конечно, сказывается на получаемом напряжении, так как магнитный материал не может отдать всю энергию мгновенно из-за высокочастотных потерь, и если катушка имеет очень малую индуктивность, то размагничивание сердечника происходит со скоростью, определяемой токами Фуко или другими потерями, а вся энергия рассеивается в нем самом. Если же элементы схемы выбраны правильно, то в нашем примере при полном преобразовании энергии и выходной емкости 50 пФ ферритовый сердечник может дать напряжение 40 кВ, а стальной — более 250 кВ! Важно отметить, что высокое напряжение возникает в этой схеме именно в момент разрыва контактов, прекращения тока через индуктор (рис. 4.10, a). Точно так же работает и строчная развертка телевизора.

Рассмотрим, какие требования предъявляются к элементам этой схемы для получения высокого КПД и надежной работы. Время, за которое тонкое трансформаторное железо может размагничиться без больших потерь на токи Фуко, около 20—50 мкс. Следовательно, период собственных колебаний системы катушка — емкость $T = 2\pi\sqrt{LC}$ должен быть больше этого значения. Это — одна из причин, из-за которой автомобильную bobину мотают очень тонким проводом. Для ферритов с проницаемостью $\mu \approx 10^3$ время полезного освобождения магнитной энергии приблизительно равно 1 мкс и меньше, в зависимости от допустимых потерь, следовательно, индуктивность обмотки может быть существенно меньше [25].

Для того чтобы коммутатор не был в момент разрыва тока вновь пробит быстро возрастающим напряжением первичной обмотки, он должен обладать определенной скоростью восстановления электрической прочности; трудность обеспечения нужных свойств прерывателя тока как раз и приводит к решению о двух обмотках: низковольтной (для намагничивания) и высоковольтной. Это решение является достаточно общим, оптимальным как для телевизора с его совершенным прерывателем — высоковольтным лучевым тетродом, так и для автомобиля с его примитивным механическим прерывателем.

После преобразования магнитной энергии в электростатическую может быть использована только часть энергии, обязанная внешней емкости, поэтому внутренняя, распределенная емкость катушки должна быть минимальной, а на вы-

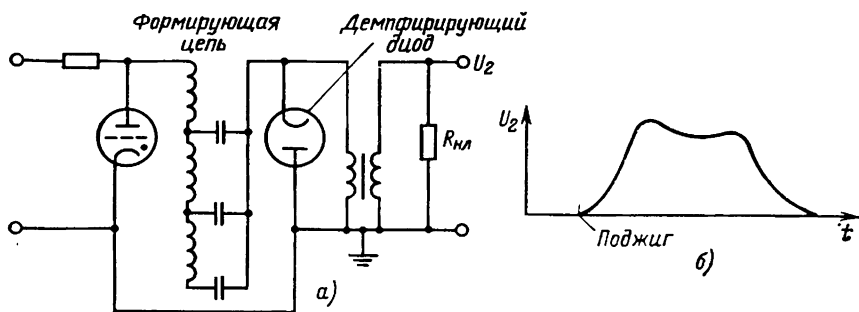


Рис. 4.11. Упрощенная схема включения импульсного трансформатора с тиратронным модулятором (а) и ее временная диаграмма работы (б)

ходе необходимо установить импульсную высоковольтную емкость, улучшающую это соотношение. Если параметры элементов такой высоковольтной системы выбраны с учетом высказанных соображений, то обычно сразу же достигаются вполне удовлетворительные результаты, а КПД преобразования получается более 50 %.

Второй способ получения импульсного высокого напряжения связан с использованием импульсных трансформаторов. Хотя элементы схемы здесь внешне похожи: лампа, тиратрон, транзистор или тиристор, в анодной (коллекторной) цепи которых включен импульсный трансформатор, но в этом случае высокое напряжение получается именно за счет включения большого импульсного тока в первичную катушку трансформатора (рис. 4.10, б). Поэтому если в случае индуктора от прерывателя большой импульсный ток не требовался, то при использовании импульсного трансформатора прерыватель должен обеспечивать такой ток.

Остановимся на качественном анализе процессов работы импульсного трансформатора совместно с коммутаторами различных типов [26]. На рис. 4.11 показаны типичная схема включения импульсного трансформатора в анодную цепь тиратрона и диаграмма напряжения на вторичной обмотке трансформатора. В момент поджига тиратрон быстро приобретает проводимость, и со временем, определяемым индуктивностью подводящих проводов и индуктивностью рассеяния трансформатора, напряжение на первичной обмотке становится равным напряжению на формирующей цепи. Казалось бы, чем время переднего фронта меньше, тем лучше, но здесь есть ограничение: если хотим избежать больших потерь, то трансформатор должен работать в режиме, близком к идеальному, т. е. на его нагруженной вторичной обмотке напряжение должно успеть возрасти почти так же, как и на первичной. Если же напряжение на первичной малоиндуктивной цепи возросло очень быстро, то вторичная обмотка как бы замыкается на собственную емкость. И в первичной и во вторичной обмотке в этом случае неизбежны большие омические потери. Иногда полезно задержать нарастание напряжения с помощью небольшой индуктивности, включенной последовательно с прерывателем. Эта индуктивность может заметно повысить КПД такого преобразователя.

Хорошо согласуются импульсные трансформаторы с импульсными модуляторными лампами, ток через которые почти не зависит от анодного напряжения. Импульсная лампа после открывания дает ток не короткого замыкания, как тиратрон, а импульс тока заданного профиля. Это облегчает согласование с трансформатором, так как форма импульса тока, протекающего через первичную обмотку, может быть оптимально подобрана.

Надо отметить, что схему с индуктивным накопителем чаще применяют для последующего выпрямления и получения постоянного напряжения, в то время как схему с импульсным трансформатором — для питания импульсных устройств: магнетронов, клистронов, лазеров и др. И импульсный трансформатор, и индуктивный накопитель не очень подходят для формирования коротких, наносекундных импульсов высокого напряжения, так как частотные свойства имеющихся магнитных материалов не позволяют рассчитывать на высокий КПД вложения энергии в течение нескольких десятков наносекунд. Поэтому сейчас, например, при формировании мощного импульса напряжения 200—300 кВ для электронной пушки пользуются искровым разрядником для обострения импульса трансформатора. Соответствующая схема показана на рис. 4.27 (см. § 4.4). Импульсный трансформатор, питаемый тиратроном, за несколько микросекунд заряжает батарею конденсаторов до напряжения 300—400 кВ. В конце зарядки искровой промежуток, расположенный в камере, заполненной азотом под давлением 5—10 ат, пробивается, и весь заряд сбрасывается через сопротивление искрового канала по коаксиальной линии на электронную пушку.

Электростатические генераторы

Если нужно напряжение превышает 150—200 кВ, а мощность источника требуется небольшая (десятки и сотни ватт), то наиболее безопасным и компактным является электростатический генератор. Принцип его действия — нанесение зарядов на диэлектрическую ленту или ротор с помощью коронирующих электродов и последующая транспортировка зарядов к высоковольтному электроду. При напряжении до 0,5 МэВ предпочтительнее использовать жесткий ротор из стекла или оргстекла [27], а при больших напряжениях — гибкую широкую ленту из прорезиненной ткани. Электростатический генератор конструктивно очень хорошо комбинируется совместно с ускорительной трубкой в баке с электропрочным газом, поэтому этот тип источника высокого напряжения получил очень широкое распространение в ядерной физике [21, 28].

Известно, что удар током от искры при высоком напряжении и небольшой емкости менее опасен, чем разряд той же энергии при большой емкости и меньшем напряжении. Дело в том, что чем меньше емкость, тем короче импульс тока, тем больше скин-эффект. Протекающий очень большой ток не успевает проникнуть к жизненно важным центрам. Вместе с тем при значительной энергии разряда скин-эффект приводит к сильным ожогам кожи. Емкость

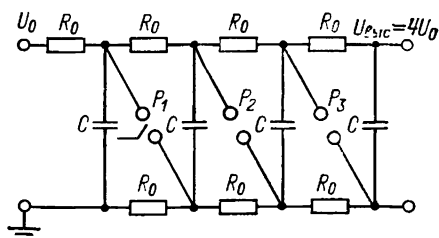
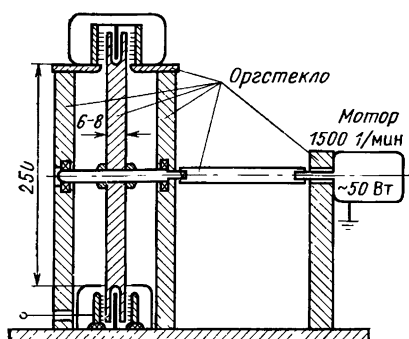


Рис. 4.13. Схема каскадного генератора импульсных высоких напряжений

Рис. 4.12. Простой электростатический генератор на 150—200 кВ

электрода электростатического генератора 50—100 пФ, и разряд от такого электрода при напряжении до 200 кВ не опасен для жизни. Автор, увы, по неосторожности имел удовольствие лично в этом убедиться. Очень часто электростатические генераторы помещают в газовую среду под повышенным давлением.

На рис. 4.12 показано устройство простого настольного электростатического генератора, дающего напряжение до 150—200 кВ при токе около 15—30 мкА. Управление высоким напряжением у электростатических генераторов — это только управление балансом тока заряда и разряда. Проще всего управлять напряжением короны заряжающей гребенки; так обычно и поступают, хотя транспортер больших генераторов — устройство инерционное.

Каскадные генераторы

Если зарядить одновременно несколько высоковольтных конденсаторов, а затем отключить их от зарядного устройства и соединить последовательно, то напряжение источника зарядки будет умножено в n раз, где n — количество конденсаторов. В каскадном генераторе используется этот принцип, а переключение конденсаторов осуществляется при пробое искровых промежутков.

Схема каскадного генератора показана на рис. 4.13. Подробно теория, расчет и конструкции каскадных генераторов описаны в [21].

Конденсаторы заряжаются параллельно с некоторым запаздыванием относительно друг друга через последовательно включенные резисторы сопротивлением R_0 . В заданный момент с помощью поджигающего электрода в первом разряднике P_1 инициируется искра, замыкающая C_1 и C_2 последовательно. Удвоенное напряжение немедленно пробивает второй шаровой разрядник и т. д. В результате на короткое время существования искрового канала все конденсаторы включаются последовательно, и напряжение на верхнем электроде становится равным nU_0 , где n — количество параллельно заряжаемых конденсаторов. Фронт, обеспечиваемый таким генера-

тором, и его внутреннее сопротивление сильно зависят от конструкции конденсаторов и разрядников, от монтажа.

От генератора импульсного напряжения получают напряжение более 5 МэВ, проводят испытания изоляции и грозовой защиты. Используют их и для питания таких устройств, как импульсные пушки и рентгеновские трубки. КПД этого генератора невысок из-за потерь энергии на сопротивлениях.

Искровые промежутки в момент разряда имеют сопротивление в несколько ом каждый и повышенную индуктивность, так как диаметр искрового канала очень небольшой. Это ограничивает крутизну фронта. Разряд мощного генератора с воздушным монтажом сопровождается ужасающим грохотом и огромными радиопомехами. Незащищенные транзисторные устройства могут даже выйти из строя от наводок. Открытый генератор смертельно опасен. Многие типы конденсаторов после импульсного разряда еще сохраняют значительную энергию, да и в процессе параллельного заряда опасность генератора импульсного напряжения, который при срабатывании может внезапно поразить человека на расстоянии одного метра от колонны, нельзя недооценивать.

Несмотря на определенные недостатки и невысокую частоту повторения импульсов, простота и устойчивость в работе сделали этот тип генераторов достаточно широко распространенным.

Если проектируемая установка должна работать с частотой не более нескольких герц, то применение этой схемы может намного сократить время создания установки, тем более что генераторы импульсного напряжения разных номиналов серийно выпускаются промышленностью.

4.2. ВНЕШНЯЯ АРМАТУРА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ УСТРОЙСТВ

В технике физического эксперимента высокое напряжение чаще всего применяют для обеспечения электрического разряда в различных средах или вакууме. Внутренней арматурой будем считать арматуру, находящуюся в контакте с изучаемой средой, а внешней — находящуюся в контакте с воздухом, трансформаторным маслом или электропрочным газом. Изоляторы во многих случаях являются также и конструктивными элементами, причем они должны быть достаточно прочными, поэтому при конструировании необходимо рассматривать очень многие их свойства.

Прокладки между обмотками

У высоковольтных трансформаторов и дросселей обмотки обычно расположены слоями. При изготовлении такого изделия всегда принимают меры для предотвращения межслойного пробоя. Учитывают также и возможность пробоя через всю катушку. Если катушка плохо закреплена между щечками, то воз-

возрастает. Вблизи выводов возникает большая неоднородность поля, так что использование тонких выводов от высоковольтных обмоток — большая ошибка; тонкий провод до его отделения от обмотки надо перевести в толстый и хорошо изолированный провод.

Располагать выводы лучше с разных сторон обмотки. Узкие и высокие обмотки всегда лучше низких и широких. У них лучше сразу три параметра: меньше межслойное напряжение, меньше вероятность пробоя через всю катушку, меньше собственная емкость, однако для таких катушек приходится создавать менее экономные магнитопроводы большего размера.

Если высокая многослойная катушка размещена на одной из сторон замкнутого прямоугольного магнитопровода, то первичную обмотку нужно располагать под ней, на той же стороне магнитопровода, иначе индуктивность рассеяния станет слишком большой. Первичная катушка может занимать всю длину стороны магнитопровода, а вторичная должна своей высоковольтной частью отстоять от него на безопасное расстояние. Если в готовом магнитопроводе это расстояние трудно обеспечить, необходимо закрыть катушки защитными диэлектрическими пластинами.

Пробой сквозь твердый диэлектрик обычно выводит изделие из строя. Поэтому трудоемкие изделия, типа больших высоковольтных трансформаторов, лучше делать надежнее, с запасом. Подчас, посмотрев в справочнике пробивное напряжение, считают, что если дать напряжение раза в полтора поменьше — все будет в порядке. Это совсем не так, особенно для переменного тока. Например, если между высоковольтным электродом и землей оказалось недостаточное пробивное напряжение, для его повышения заземленный электрод можно закрыть пластиной из диэлектрика (полиэтилена, тефлона). Если речь идет о постоянном напряжении — это очень помогает. Если же напряжение переменное, особенно высокочастотное (более килогерца), то в такой системе, поскольку диэлектрик каждый раз должен переполяризовываться, возникает коронный разряд. Атомарный кислород, озон, окислы азота постепенно разрушают диэлектрик, и он пробивается. Например, в практике автора пробой тефлоновой проходной втулки толщиной стенки 1 см импульсным напряжением 15—17 кВ при частоте 10 кГц происходил за сутки, причем неоднократно (с заменой изделий). В то же время такая втулка может длительное время выдержать постоянное напряжение 70—100 кВ. Гораздо лучше в сочетании с воздухом и неизбежной короной ведут себя неорганические изоляторы: стекло, керамика, даже слюда. Они не боятся окисления и могут работать вблизи коронного разряда очень долго. Чем больше ϵ защитной пластинки и чем она тоньше, тем более интенсивным будет коронный разряд.

При прокладывании изоляции между обмотками нужно заботиться о надежном удержании витков, в том числе при повышенной температуре. В этом смысле скользкие пластики типа полиэтилена и тефлона не очень удачны; пропитанная бумага лучше удерживает витки. Самое худшее, что можно сделать, — это использовать как изоляцию полихлорвиниловую (синюю) липкую ленту. При нагреве она расплзается, кроме того, $\tan \delta$ полихлорвинила весьма велик.

Если требуется более интенсивное охлаждение обмотки, то между слоями можно положить рейки, образующие сеть каналов. Керамика мало пригодна из-за хрупкости; обычно в таких конструкциях применяют деревянные рейки: они достаточно термостойки и хорошо удерживают витки (чаще это делают у масляных трансформаторов).

Пробой изоляции вдоль поверхности диэлектрика

Если между электродами, разделенными промежутком, поместить диэлектрик, расположенный вдоль поля, электрическая прочность промежутка всегда падает. Это явление уже давно хорошо изучено. То же самое еще в большей степени наблюдается и в вакууме. На очень хорошо очищенных поверхностях: прокаленном до 350°C стекле, обезвоженном парафине удавалось приблизиться к прочности воздушного промежутка, но в реальных условиях электропрочность по отношению к скользящему вдоль поверхности разряду в различных газах и в масле много ниже, чем в отсутствие такой поверхности вдоль электрического поля. В воздухе этот параметр, как установлено, сильно зависит от влажности. Тем не менее, несмотря на такое поведение изоляторов, успешно эксплуатируются тысячекилометровые линии электропередач напряжением до миллиона вольт, и в любую погоду... Так что удачное конструирование, удачный выбор формы и точек закрепления изоляторов позволяют обойти эту трудность. Надо лишь о ней не забывать. Чем выше электропрочность газа, например благодаря повышенному давлению, тем больше разрыв между прочностью по газу и прочностью вдоль поверхности диэлектрика. Этот разрыв максимален на частоте 50 Гц и меньше на более высоких частотах [29].

Проходные изоляторы

Для вывода высокого напряжения из корпусов изделий и установок, вакуумных, наполненных маслом или газом под давлением, применяют проходные изоляторы. Во всех этих случаях принимаются меры к тому, чтобы уменьшить напряженность поля вблизи вывода и предотвратить как сквозной пробой через диэлектрик, так и скользящий — вдоль поверхности вывода. Обычно диаметр выводимого проводника делают достаточно большим, а в зоне концентрации напряжений скругляют острые части, в том числе на заземленном основании (рис. 4.14—4.17).

Напряженность поля вдоль верхней части изолятора, находящейся в воздухе, обычно не более 5—7 кВ/см; у установок, работающих в режиме наносекундных импульсов, можно допустить вдвое большие значения. Профилирование поверхности изолятора дает возможность несколько повысить напряженность поля вдоль него. Напряженность поля вдоль изолятора в масле может быть выше, до 20—30 кВ/см.

Края проходного отверстия в крышке бака следует скруглить на радиус, как на рис. 4.17, а если крышка слишком тонкая, то в отверстие вставляется скругляющий вкладыш.

При вводе импульсных напряжений, подчас с большими токами, нужно учесть еще некоторые моменты.

Омический нагрев ввода. В случае тонких выводов из фольги импульсных

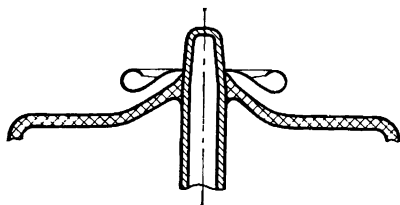


Рис. 4.14. Высоковольтный вывод анода стеклянной модуляторной лампы ГМИ-90 (35 кВ, 100 А)

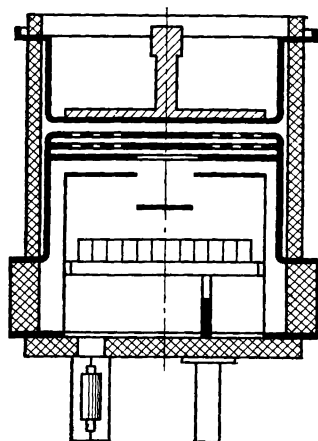


Рис. 4.15. Разрез металлокерамического тиратрона ТГИ-1000/25 (25 кВ, 1000 А) [32]

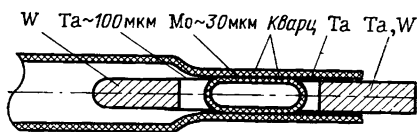


Рис. 4.16. Вывод электрода кварцевой импульсной лампы

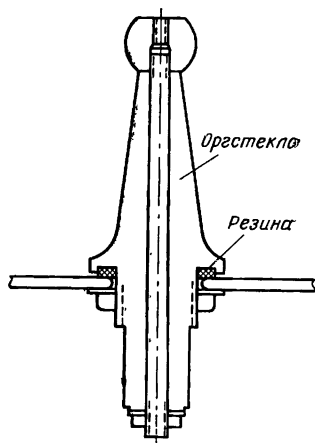


Рис. 4.17. Изолятор для вывода высокого напряжения из масляного трансформатора

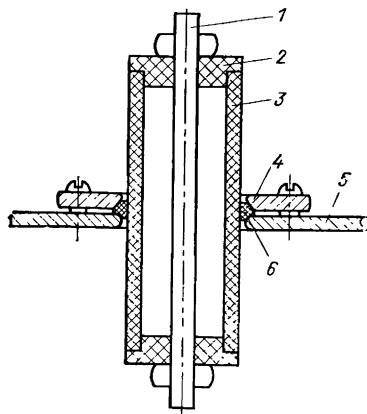
кварцевых ламп омический нагрев может быть одним из факторов, ограничивающих энергию импульса.

Пондеромоторные силы. Здесь могут быть два крайних случая. В первом случае силы, вызванные током, меняются медленно по сравнению с возникающим под их действием перемещением, и изделие деформируется квазистационарно. Для вводов это обычно не опасно, но такие силы учитывают при конструировании катушек, создающих мощные магнитные поля, при конструировании тонкостенных нагревателей вакуумных печей и т. п. Возникающая сила пропорциональна I^2 . Во втором случае время импульса тока мало по сравнению с временем перемещения частей изделия, которое происходит под действием импульса, т. е. сам импульс короче механического последствия. В этом случае

деформация определяется импульсом силы Ft , пропорциональным $\int_0^T I^2(t) dt$,

Рис. 4.18. Простой проходной изолятор с малой емкостью (из кварца):

1 — электроввод; 2 — вкладыш (тефлон); 3 — трубка, кварц (стекло); 4 — фиксирующий фланец; 5 — корпус; 6 — прокладка (резина, силиконовая резина)



где T — время действия импульса. Это соотношение показывает, что при заданном количестве электричества, протекающем за импульс, отношение импульса сил к количеству электричества тем больше, чем короче импульс. Более короткий импульс разряда емкости вызывает большие силы последствия, например в обкладках конденсаторов.

Индуктивность вывода. Эта величина, пропорциональная $l \ln(R/r)$, где l — длина отрезка вывода; R , r — внешний и внутренний радиусы (в приближении коаксиальной линии).

Для справок полезно привести формулы для расчета индуктивности коаксиального кабеля

$$L = 2 \cdot 10^{-7} l R/r$$

и длинной двухпроводной линии

$$L \approx 4 \cdot 10^{-7} l d/r,$$

где d — расстояние между осями проводов; r — радиус проводов $d/r \gg 1$; l — длина линии.

Для уменьшения индуктивности нужно выполнять выводы достаточно толстым проводом и обязательно очень внимательно относиться к контуру токов возврата, идущих по корпусам и шинам заземления.

Коронный разряд вблизи стержня вывода. При постоянном напряжении возникающий коронный разряд быстро заряжает поверхность диэлектрика и прекращается. При импульсах, следующих с частотой менее 10—50 Гц, коронный разряд не очень опасен, но при достаточно высокочастотном импульсном или переменном напряжении этот разряд может легко разрушить органический изолятор. Бороться с коронным разрядом можно двояко: 1) использовать органический изолятор, чисто обрабатывать внутреннее отверстие и очень плотно вставлять полированный электрод достаточного диаметра, или 2) применять керамику (стекло), не боящуюся коронного разряда. Если наличие коронного разряда само по себе не мешает, то в лабораторных условиях можно выполнить ввод так, как показано на рис. 4.18. Хорошая кварцевая трубка толщиной 2 мм длительное время выдерживает импульсное напряжение до 20 кВ и не боится интенсивного коронного разряда. Емкость такого изолятора минимальна.

4.3. СВОЙСТВА РАЗЛИЧНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Пробивная прочность диэлектрика, особенно при малой толщине, может достигать сотен киловольт на сантиметр, но реальная надежность наблюдается при много меньшей напряженности.

Диэлектрики по-разному относятся к пробоям: могут, в том числе твердые диэлектрики при поверхностном пробое, сохранить свои свойства, а могут и выйти из строя. Под напряжением многие диэлектрики «стареют», изнашиваются. Твердые и жидкие диэлектрики разного строения совершенно неодинаково рассеивают электрическую энергию переменного поля в форме тепла. Тепловые, механические и вакуумные свойства диэлектриков также чрезвычайно различны. В этой книге мы не будем делать обзор всех свойств диэлектриков, которые описаны в литературе [29], а остановимся на правильном выборе и учете особенностей диэлектрика.

Вакуум

Пробивное напряжение в вакууме нелинейно зависит от расстояния между электродами, поэтому нельзя сказать, что вакуумная изоляция лучше или хуже газовой без конкретизации величины зазоров и значения напряжения. Для небольших зазоров и напряжений она вне конкуренции, а при напряжении более 150 кВ начинает уступать газовой (рис. 4.19).

В настоящее время вакуум как диэлектрик используют главным образом в вакуумных конденсаторах [30], несколько массивных, но очень высококачественных. Теоретическая электропрочность вакуума очень высока и определяется током автоэлектронной эмиссии с отрицательного электрода. По данным [31], ток всего лишь в 10^{-10} А/см² будет наблюдаться при напряженности поля, В/см, для: вольфрама $1,8 \cdot 10^7$; магния $1,2 \cdot 10^7$; бария $7 \cdot 10^6$. На практике такие значения напряженности поля достигаются лишь для острых катодов. В случае плоских

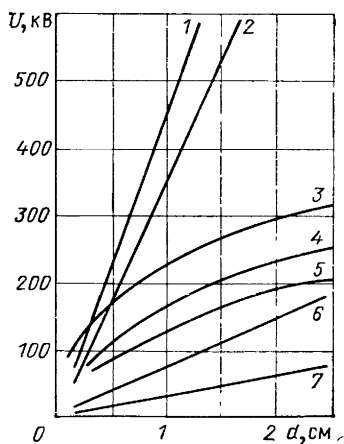


Рис. 4.19. Зависимость пробивного напряжения от расстояния для некоторых диэлектриков, включая вакуум [30]:

1 — воздух, 28 ат; 2 — SF₆, 7 ат; 3 — вакуум; 4 — трансформаторное масло; 5 — фарфор; 6 — SF₆, 1 ат; 7 — воздух, 1 ат

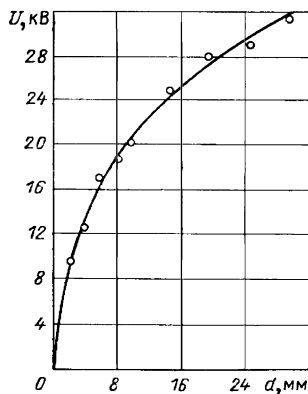


Рис. 4.20. Зависимость пробивного напряжения вдоль стекла пирекс от расстояния между плоскими электродами [30]

или плавно скругленных электродов автоэлектронная эмиссия начинается гораздо раньше и носит точечный характер. Существующие на поверхности микровыступы, пылинки, химические включения приводят к гораздо более раннему началу холодной эмиссии. Тренировка под напряжением, в том числе несильными разрядами, приводит к заметному уменьшению эмиссионного тока, позволяет достичь примерно вдвое большего напряжения, чем в момент начала пробоев, но затем улучшение прекращается, далеко не достигнув теоретического предела. Механизм автоэлектронной эмиссии сам по себе, как легко заметить, не может объяснить наблюдаемой нелинейной зависимости пробивного напряжения в вакууме от расстояния между электродами.

Вакуумный пробой сложнее, чем описанная картина [32]. Между электродами возникает «положительная обратная связь», приводящая к преждевременному пробую.

Следует отметить, что особо высокий вакуум не повышает пробивного напряжения. Автор в это не верил, пока не стал проверять. Работая с электростатическим генератором, дающим 500 кВ при длине ускорительной трубки электронной пушки 28 см, автор умышленно под напряжением ухудшал вакуум в трубке от 10^{-6} до 10^{-3} мм рт. ст. Только при 10^{-3} мм рт. ст. начинались непрерывные пробои. Между прочим, в тиратроне, наполненном водородом под давлением около 0,5 мм рт. ст., тоже «вакуумная» изоляция, так как он работает на краю левой ветви кривой Пашена [33].

Не все материалы одинаково пригодны для изготовления электродов в вакууме. Более тугоплавкие и твердые металлы меньше распыляются при пробоях и даже ими полируются. Ряд хороших материалов начинается с вольфрама, за ним идут молибден, нержавеющей сталь, никель, медь и на последнем месте оказывается алюминий.

В вакууме очень легко возникает разряд вдоль поверхности диэлектрика. Гофрирование поверхности обычно помогает мало, гораздо меньше, чем очистка и обезгаживание. На рис. 4.20 показана зависимость пробивного напряжения при скользящем пробое от расстояния для стекла пирекс; для кварца пробивное напряжение, по данным [30], в 1,5 раза больше. Лучший способ избежать пробоя по поверхности — сделать путь пробоя возможно длиннее, как в рентгеновских кенотронах или высоковольтных лампах.

Холодная автоэлектронная эмиссия используется в ряде вакуумных устройств: импульсных рентгеновских трубках, электронных пушках для получения увеличенного до 10^6 раз изображения кристаллической решетки острия. Ток электронной эмиссии образует вокруг острия электронное облако, после чего он перестает зависеть от формы поверхности острия и подчиняется известному закону Лэнгмюра ($\sim U^{3/2}$); образующийся пространственный заряд блокирует и «защищает» острие от дальнейшего возрастания эмиссии, поддерживая ток в соответствии с законом Лэнгмюра. Если используется достаточно частая решетка острий, образующиеся вокруг них облачка эмиссии сливаются; эмиссия как бы исходит с плоского катода, что позволяет создавать на этой основе, например, пушки Пирса.

В импульсном режиме часть материала острия может нагреться и испариться, создавая облачко плазмы, что приводит к износу катода. В смысле износа медные острия не хуже вольфрамовых, возможно, из-за высокой теплопроводности меди. Острийный катод может обеспечить импульсный ток до десятков ампер на квадратный сантиметр площади анода, в этом смысле он не хуже ок-

сидного и в то же время проще в изготовлении. Однако он не обеспечивает значительного среднего тока и такого ресурса, как у оксидного и других подогревных катодов.

Газовая изоляция

В качестве газовой изоляции чаще всего используют атмосферный воздух. Единственное, но огромное его преимущество — максимальная простота, открытость конструкции, ненужность баков, кроме экранировки от помех. Хорошо известно пробивное напряжение сантиметрового промежутка — 30 кВ. Пробивное напряжение нелинейно зависит от расстояния, зависит от частоты (рис. 4.21 и 4.22).

При установке в помещениях открытого оборудования на 200 кВ и более почти неизбежно возникает коронный разряд. Появляются озон и окислы азота. Длительное пребывание в такой атмосфере вредно для здоровья: появляется ломкость легочных капилляров и т. п. Поэтому наиболее правильное решение: в помещении, где стоит открытая высоковольтная установка, во время работы никто не должен находиться. Например, в случае ускорительных трубок пучок, генерируемый ими, выводится в другое помещение. Исключением являются установки с редко следующими импульсами.

У высоковольтных установок из-за опасности пробоя вдоль стенок диэлектрика продольная, вдоль колонны, напряженность поля в воздухе обычно не превышает 10 кВ/см, а в газах под давлением 20 кВ/см. Для уменьшения коронного разряда и повышения электрической прочности электрическое поле обычно выравнивают вдоль колонны с помощью металлических колец, находящихся под потенциалом. Кольца изготовляют из медной или латунной трубки и хромируют. Иногда их делают разъемными. Крепить кольца к колоннам с помощью винтов не следует, так как при проскоках искр между кольцами оргстекло, часто употребляемое для изготовления колонн, пробивается от конца винта характерными очень красивыми ветвистыми дендритами. Лучше крепить кольцо к колонне несколько выступающим внутрь пуансоном, а кольца делать разъемными, на металлических пробках. Это позволит снять любое кольцо, не трогая остальные. Омический делитель лучше располагать внутри колец, на отдельной стойке, и лишь соединять его с кольцами. Можно располагать его и на внутренней стороне колец, но тогда для удобства монтажа в зазор между кольцами должна прохо-

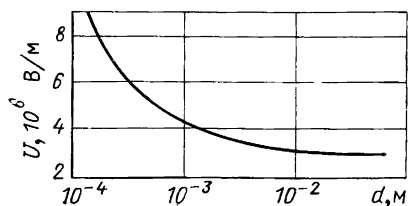


Рис. 4.21. Зависимость пробивной напряженности электрического поля в воздухе от расстояния между плоскими электродами. Однородное поле при 50 Гц [29]

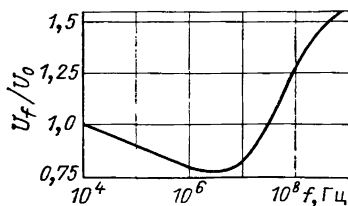


Рис. 4.22. Зависимость отношения пробивного напряжения воздуха при заданной частоте U_f к пробивному напряжению при постоянном токе U_0 от частоты f [29]

дять рука. Особенно уменьшать кольца и зазоры, как показывает опыт, не следует, поэтому сопротивлений делителя может быть и больше, чем колец, но каждое кольцо должно быть присоединено к своей точке делителя.

Если наружный диаметр заземленного кожуха установки задан, то оптимальный с точки зрения минимума напряженности поля вблизи его поверхности диаметр внутреннего электрода составляет приблизительно половину внешнего диаметра. Когда воздушное исполнение установки недопустимо увеличивает ее габариты, обычно применяют масляную изоляцию. Однако в некоторых случаях, чаще всего при конструировании ускорителей на 1—5 МэВ, использование масляной изоляции неудобно или невозможно. Например, транспортер электростатического генератора в масле работать не будет. У импульсных ускорителей возрастание ϵ в масле ухудшает параметры. Вскрытие сложных устройств, побывавших в масле, и обратная его заливка — не самая приятная процедура. Поэтому часто предпочитают электрическую изоляцию в виде электропрочных газов или газов под давлением (см. рис. 4.19).

Электропрочные газы — это газы электроотрицательные и тяжелые, типа SF_6 , CF_2Cl_2 (фреон-12) и многие другие. Электрическая прочность газового промежутка почти линейно растет с увеличением давления и гораздо медленнее — при наличии вдоль поля поверхности диэлектрика. Коронный разряд в таких газах, как SF_6 , вызывает нежелательные химические превращения, поэтому, а также из-за дешевизны часто используют чистый сухой азот, несколько увеличивая давление.

Электрическая прочность SF_6 и CF_2Cl_2 примерно в 2,5 раза выше, чем у воздуха. Иногда для экономии применяют газовые смеси азота с SF_6 или CF_2Cl_2 . Вряд ли это оправдано. Чистый SF_6 при разборке установки можно легко переконденсировать в ловушку, охлаждаемую жидким азотом, почти ничего не теряя, SF_6 для этого надо очистить от примесей откачкой при -150°C . Автор при работе с электростатическим генератором так и поступал, обходясь практически одним и тем же запасом SF_6 . Потери SF_6 при составлении смесей, которые каждый раз срабатываются в воздух, будут много больше.

Коронный разряд в азоте, видимо, не вызывает химических реакций, и в этом преимущество азота. Тот же разряд в электроотрицательных газах (а в электростатическом генераторе разряд неизбежен) ведет к возникновению химических процессов. Автор замечал повышенный выход из строя германиевых диодов в атмосфере SF_6 при наличии коронного разряда, а также огромное (в несколько раз) падение номинала переменных угольных сопротивлений, в то время как номинал постоянных сопротивлений (МЛТ) не изменялся. Коронирующие стальные иглы в атмосфере SF_6 довольно быстро выходят из строя. Недостатком применения газов под давлением является необходимость создания прочного корпуса для установки, а также невысокая теплопроводность этих газов, затрудняющая рассеяние больших мощностей, исключением является водород, но его электрическая прочность вдвое ниже, чем у воздуха, и он пожароопасен.

Трансформаторное масло и другие жидкие диэлектрики

Располагать детали установок удобнее всего в воздухе, но при больших напряжениях габариты установок растут непомерно; воздух, кроме того, плохо охлаждает обмотки. Поэтому очень широко используют электропрочное масло,

чаще всего трансформаторное. Сухое трансформаторное масло выдерживает напряжение до 200 кВ/см, но его электропрочность резко снижается от примеси воды; при 0,1 % влаги электропрочность лишь 50 кВ/см. Поэтому масло должно постоянно поддерживаться сухим. Другие свойства масла: $\epsilon=2,1\div2,3$; $\operatorname{tg} \delta=0,002\div0,005$; $\rho=10^{14}$ Ом·см.

Не следует думать, что если в масле не наблюдается искрового пробоя, то оно залито «навсегда». При значительной напряженности вблизи углов высоковольтных деталей возникают стримеры, протекают слабые токи, и масло постепенно портится и даже темнеет. Электрики это хорошо знают; они следят за качеством масла, его очищают, осушают, меняют. Физики этой стороной вопроса пренебрегают, а импульсные трансформаторы в масляном исполнении делают на 300—400 кВ и доводят их до максимально возможного напряжения. В таких изделиях после искрового пробоя можно видеть «трек» по долго не расплывающемуся в неподвижном масле следу. Установка очистки масла, сделанная, например, из простого шестеренчатого насоса (от старого автомобильного двигателя) и фильтра, вместе с осушающим патроном поможет при минимуме вложений существенно поднять работоспособность и продлить жизнь высоковольтных масляных трансформаторов. Пробой, как мы знаем, сильно облегчается вдоль поверхности диэлектрика. Стоит в масле появиться волоску и встать по силовым линиям электрического поля, как пробой вдоль него будет сильно облегчен. Пылинки, соринки, микрокапельки воды образуют в поле гирлянды, по которым также облегчается пробой. Наконец, мало кто заливает масло путем вакуумирования: чаще всего его просто заливают, даже как следует не просушив предварительно собранный трансформатор. Для повышения уважения к культуре очистки масла и сушке деталей стоит ознакомиться, например, с технологией изготовления высоковольтных, пропитанных маслом конденсаторов [34].

Конденсаторное масло — это дополнительно очищенное трансформаторное масло. У него меньше электропроводность, выше устойчивость к высокой напряженности поля, так как обычно масло в конденсаторы заливают на весь срок службы. Иногда применяют касторовое (рициновое) масло — полярный диэлектрик, имеющий более высокое $\epsilon=4,0\div4,4$, но и больший $\operatorname{tg} \delta=0,01\div0,03$.

В последние годы резко увеличилась потребность в высоковольтных накопителях энергии, способных как можно быстрее отдать энергию нагрузке. Наряду с разработкой керамических конденсаторов изготавливают также накопители на основе кабелей с полиэтиленовой изоляцией, кабелей с изоляцией из бумаги, пропитанной маслом, жестких коаксиальных конструкций. Стремление запасти в компактной системе как можно больше энергии ведет к попыткам применения в качестве диэлектриков уже не только рицинового масла, которое всего лишь вдвое увеличивает емкость по сравнению с трансформаторным маслом, а полярных жидкостей, таких, как глицерин, этиленгликоль, нитробензол и даже вода, у которых ϵ в десятки раз больше. Публикации об успешном применении таких жидкостей встречаются, но здесь нужно быть осторожным. Главная трудность состоит в том, что эти жидкости обладают нужной проводимостью только будучи хорошо очищенными, а прохождение через них тока ведет к интенсивным электрохимическим процессам и резкому возрастанию проводимости. Автор проводил опыты с хорошо очищенным глицерином и убедился, что поддерживать на нем высокое напряжение можно не более нескольких минут. При быстрой зарядке и еще более быстрой разрядке импульсных систем использование поляр-

ных жидкостей может все же оказаться приемлемым, если не требовать большого ресурса работы.

Очень большую роль играет масло в охлаждении электротехнических агрегатов. Охлаждение маслом может быть и конвективным. Именно так работают сетевые трансформаторы средней мощности. Если конструкция является энергонапряженной, то можно либо применить внешний контур охлаждения, либо погрузить в масляный бак смесевик с проточной водой и организовать там циркуляцию масла, как в термостате. Обмотки с каналами для охлаждения внутренних слоев лучше располагать вертикально для улучшения конвекции.

Хотя диэлектрическая проницаемость масла и диэлектрические потери невелики, все же в некоторых случаях, особенно на высоких частотах, это играет отрицательную роль.

Твердые диэлектрики

Эти диэлектрики являются несущей основой внешней и внутренней armатуры высоковольтных устройств. Их свойства, правильный выбор материала и учет особенностей во многом определяют успех создания высоковольтной установки.

В промышленности для создания изоляторов обычно используют неорганические материалы: фарфор, стекло, в то время как физиков-экспериментаторов привлекают пластмассы из-за простоты придания им нужной формы.

Конечно, установить высоковольтный электрод на текстолитовых опорах с отфрезерованными гнездами для деталей — самое простое решение. Но, повозившись немного больше, с помощью широко распространенного алмазного инструмента можно и из фарфоровых труб сделать очень удобные колонны, которые будут гораздо жестче и долговечнее.

Хорошими изоляционными и конструкционными свойствами обладает оргстекло, если температура не более $+50^{\circ}\text{C}$, хотя его жесткость невелика. Текстолит обладает гораздо большей электропроводностью, чем оргстекло, которая во влажной атмосфере сильно возрастает. Часто его обрабатывают на станках с мыльной эмульсией, после чего из него можно делать что угодно, только не изоляторы. Никогда не делайте из текстолита панельки фотоумножителей! В этом случае можно рекомендовать эбонит, учитывая его непрозрачность и высокие диэлектрические свойства.

Диэлектрики помимо объемной имеют поверхностную проводимость. Несмачиваемые водой диэлектрики — тефлон, полиэтилен страдают этим недостатком в малой, а легко гидролизующееся стекло — в гораздо большей степени, зависящей от сорта стекла. Часто для уменьшения этого недостатка хорошо просушенные стеклянные изделия покрывают кремнийорганическими лаками, особенно это относится к непрогреваемым изделиям: вводам, фотоумножителям, в то время как лампы благодаря прогреву имеют меньшую поверхностную проводимость.

Когда предстоит эксплуатация высоковольтной аппаратуры в условиях высокой влажности, например приборов ночного видения или экспедиционных, то лучше всего, если можно, заключить высоковольтную часть в достаточно герметичный отсек, снабженный влагопоглотителем. Это самое радикальное решение, спасающее одновременно и от запыления. Хорошо известно, что открытая высо-

ковольтная установка, даже телевизор, является хорошим электрофильтром, собирающим там, где не надо, всю попадающую на нее пыль.

Твердые конструкционные диэлектрики бывают полярными с большими ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ — это полихлорвинил, оргстекло, эпоксидные смолы, текстолит, гетинакс. Их использование нежелательно в мощных контурах высокой частоты, так как они там сильно нагреваются. Импульсные напряжения высокой скважности они переносят легче. Неорганические конструкционные диэлектрики могут иметь значительную диэлектрическую проницаемость, например у Al_2O_3 $\epsilon=10$, у стекла и слюды $\epsilon=5-7$, но $\operatorname{tg} \delta$ у них достаточно мал.

Кроме обычных твердых диэлектриков существуют еще достаточно пластичные компаунды, например церезин, применяемые для заливки высоковольтных маломощных изделий. Заливать изделие компаундом можно, только если есть достаточная уверенность, что он сможет пропитать всю конструкцию, а для этого она не должна содержать плотных прокладок. Компаунд должен быть пластичен при наиминишей ожидаемой температуре, процесс заливки и пропитки нужно вести медленно, не перегревая изделие, и чтобы времени для вытеснения пузырьков воздуха было достаточно.

В телевизионной технике с успехом используют покрытие высоковольтных катушек наружным слоем пластмассы, без сплошной пропитки. Этот прием не увеличивает ϵ и защищает изделие от внешних пробоев, когда оно покроется слоем пыли, а также сохраняет его сухим. Видимо, для катушек типа «универсаль» такая технология даже лучше пропитки. При создании конденсаторов исключительно широко применяются различные керамические составы, имеющие высокую диэлектрическую проницаемость вплоть до нескольких тысяч. Пользуясь такими конденсаторами, нужно помнить: чем больше ϵ керамики, тем сильнее емкость зависит от температуры [29]. По этому важному параметру керамику подразделяют на несколько классов, имеющих положительный или отрицательный температурный коэффициент емкости, что позволяет добиться высокой температурной стабильности частотно-зависимых цепей простым подбором конденсатора с подходящим температурным коэффициентом.

Некоторые изделия из керамики, например высоковольтные изоляторы, должны быть дугостойкими. В этом отношении наилучшими свойствами обладает стеатит, имеющий малый коэффициент расширения, и Al_2O_3 , отличающийся небольшим расширением и очень высокой прочностью. Изготовить нужное Вам изделие из стеатита «не очень сложно». На заводе, изготавлиющем высоковольтные изоляторы, нужно достать готовую керамическую массу, с большим или меньшим искусством отформовать из нее изделие, медленно и хорошо просушить, в просушенном состоянии, если нужно, дополнительно обработать его поверхность, а затем обжечь его в электропечи, соблюдая режим, указанный заводом для обжига керамической массы. Размеры изделия при этом уменьшаются в определенной пропорции, известной, если используется проверенная технология.

Еще проще на шлифовальном станке, оснащенном алмазным инструментом, изготовить нужное Вам фарфоровое изделие (без отверстия) из старого высоковольтного изолятора. Изделие массой несколько килограммов можно обработать в течение одного дня.

Некоторые твердые диэлектрики употребляют для изготовления импульсных конденсаторов. Импульсные конденсаторы исключительно широко используют в современной физике, и от их параметров: габаритов, индуктивности, надежности,

частотных свойств во многом зависят достижения в создании таких установок, как эксимерные и CO_2 -лазеры, и многих других импульсных устройств.

Емкостные накопители изготавливают сейчас в основном четырех типов. Первый, самый простой тип емкостного накопителя — это длинная линия из коаксиальных электродов, залитая трансформаторным или конденсаторным маслом. Этот накопитель — простой, надежный, легко восстанавливаемый после пробоев, но малозергоемкий. При длине в несколько метров, наружном диаметре 20 см и напряжении до 300 кВ запасается всего несколько десятков джоулей энергии. Благодаря хорошему естественному охлаждению частотные свойства такого накопителя неплохие. Иногда стремятся в эту же линию поместить и импульсный высоковольтный трансформатор, придавая ему форму, напоминающую турбобур, но вряд ли это оправдано, так как такая линия вполне сочетается с обычным тороидальным высоковольтным трансформатором.

Второй тип емкостного накопителя — использование отрезков промышленных высоковольтных кабелей с бумажной, пропитанной маслом, или полиэтиленовой изоляцией. Этот путь хорош тем, что используются практически готовые изделия, причем отрезки кабеля можно для уменьшения волнового сопротивления соединить параллельно. При таком решении существенны два обстоятельства. Нужно аккуратно разделять концы кабеля, без резкого обрыва наружного экрана, который создал бы концентрацию напряженности на кромке; экран на конце следует вначале расширить наподобие небольшого экспоненциального рупора, а затем присоединить к деталям заземления. Нужно также проверить, не идет ли наружная металлическая обмотка кабеля одиночной спиралью с незамкнутыми витками. Если это так, то придется снаружи вдоль всего кабеля протянуть полосы медной ленты, соединив их с оплеткой через 10—20 см, не реже.

Третьим типом конденсаторов, применяемых в емкостных накопителях, являются конденсаторы пленочные, диэлектриком в которых служит пленка тефлона, полиэтилена, лавсана и других пластиков. При хорошем конструировании и изготовлении, опыт которого накоплен в СССР, например Ленинградским политехническим институтом, эти конденсаторы очень хороши: обладают малой индуктивностью, выдерживают токи короткого замыкания, работают при частоте повторения 100 Гц и более.

Четвертым типом конденсаторов, применяемых в емкостных накопителях, являются импульсные конденсаторы на основе керамики с высоким ϵ , до тысячи и более, содержащей титанат бария [31]. Во многих случаях эти конденсаторы работают очень хорошо, но при монтаже батарей, при пробое внешних цепей, приводящих к разряду через очень низкое сопротивление, бывают случаи разрушения не очень прочной конденсаторной керамики. Если конденсаторная батарея погружена в масло, то гидравлический удар от «взрыва» пробитой емкости разрушает и несколько соседних.

Если только возможно, следует соединить конденсаторы в батареи через небольшие сопротивления, выдерживающие импульсный перепад напряжения в случае короткого замыкания и ограничивающие пондеромоторные силы, видимо, ломающие керамику. Ряд экспериментаторов рекомендуют заливать керамические конденсаторы К15-10 эпоксидной смолой каждый в отдельности. Обеспечение надежной работы высоковольтных импульсных конденсаторов в режиме полного разряда — задача, пока далекая от решения.

Некоторые типы керамических конденсаторов очень плохо работают в высокочастотных импульсных схемах, в то время как другие оказываются вполне ра-

ботоспособными и долговечными, например К15-3. Последовательная батарея из таких конденсаторов может годы проработать в таком устройстве, как модулятор лазера на парах меди, конечно, при пониженном примерно вдвое против номинала напряжении на каждом из них. Керамические конденсаторы с большим ϵ могут иметь довольно значительную зависимость емкости от температуры. Разогрев конденсатора из-за диэлектрических потерь или других причин может сильно изменить его емкость. Поэтому перед применением лучше поместить конденсатор в обыкновенный сушильный шкаф и изучить зависимость его емкости от температуры.

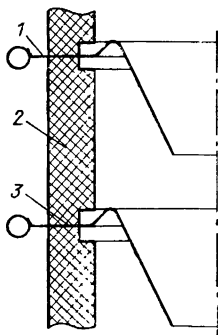
4.4. ВАКУУМНЫЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ УСТРОЙСТВА, ЭЛЕКТРОННЫЕ И ИОННЫЕ УСКОРЯЮЩИЕ ТРУБКИ

Высокое напряжение часто получают для ускорения заряженных частиц. Наряду с большими ускорителями продолжают существовать и быть полезными электронные пушки, непрерывные и импульсные, применяемые для самых различных целей: возбуждения активной среды лазеров, проведения неравновесных химических реакций, полимеризации органических пленок и изоляции кабелей, получения нейтронов, вакуумной электронно-лучевой сварки и плавки металлов, испарения веществ для получения высококачественных покрытий, получения рентгеновского излучения, электронной микроскопии.

Ускорители положительных ионов небольшой энергии применяют реже, но тоже достаточно часто, иногда в тяжелых условиях, например для нейтронного каротажа скважин, где такие ускорители более безопасны, чем источники нейтронов. Наконец, существуют и разрабатываются разнообразные ускорители плазмы, ионно-плазменные двигатели для космических целей и т. д.

Общей чертой всех этих устройств является приложение высокого напряжения к вакуумным узлам. На вакуумные узлы в высоковольтных приборах ложится двойная нагрузка: они должны обеспечивать вакуум и в то же время быть достаточно надежными под напряжением. Характерная нелинейная зависимость прочности вакуумного промежутка от зазора (см. рис. 4.19) привела физиков к мысли — секционировать вакуумные устройства, разбивать прикладываемое высокое напряжение на относительно малые доли, для которых каждый промежуток с запасом удовлетворял бы требованиям электрической прочности, и таким путем получать очень высокие напряжения. Если бы закон «аддитивности» прочности последовательных промежутков выполнялся, то можно не сомневаться, что электростатические ускорители работали бы до десяти мегаэлектронвольт и более и современным малым линейным ускорителям электронов было бы не просто выиграть у них соревнование. Наверное, можно было бы создать и многоэлектродные кенотроны с распределенным защитным потенциалом на запирающей полуwave, которые позволили бы строить выпрямители с меньшим количеством каскадов.

Рис. 4.23. Форма внутренних электродов разрядной трубки:
 1 — электрод (хромированная медь или сталь); 2 — керамическое
 жоло; 3 — соединение электрода с кольцами (пайка в водород-
 ной печи по металлизированной керамике, герметики, клей БФ-4)



Но первые же попытки показали, что такой путь возможен, но очень труден. Аддитивности не было. Отдельные секции великолепно работали, а, поставленные одна за другую, пробивались. Тем не менее многим физикам, совершенствуя устройство секционированных трубок, удавалось все больше повышать напряжение, однако надежной работы таких трубок добиться пока не удалось. Таким образом возникло неопределенное положение: с одной стороны — отсутствие теоретически обоснованного запрета, отдельные достижения, с другой — возрастающая редкость достижений, недопустимый спад надежности. Бывает так, что трудно объяснить теоретически, например, свойства сложного сплава. Это не мешает им пользоваться, если свойства благоприятные и хорошо воспроизводятся. Особенность вакуумного пробоя состоит, к сожалению, в том, что электрическая прочность высоковольтных вакуумных конструкций воспроизводится плохо. Это обстоятельство является следствием сильного влияния на вакуумный пробой особенностей технологии и эксплуатации высоковольтных вакуумных устройств. Совершенствование этой технологии обязательно приведет к воспроизводимым результатам.

Если перекрыть секции вакуумной ускорительной трубки в их центральной части, служащей для пропускания пучка, то она разбивается на ряд не связанных между собой полостей и потому электрически аддитивна. Ясно, что неаддитивность возникает из-за положительной обратной связи, как, например, генерация в многокаскадном усилителе с плохо экранированными каскадами. Отсюда вывод: сужать центральное отверстие до размеров пучка, а для откачки употреблять боковые отверстия, расположенные не друг против друга. Путь этот дает свои результаты, но он только один из возможных.

Вспомним про каналную конструкцию ФЭУ, получившую распространение в последние годы. Электроны в таком ФЭУ размножаются прямо в узком канале, перемещаясь со стенки на стенку. Быть может, в ускорительной трубке мы имеем нечто аналогичное, и сужение ее канала только усилит размножение. Экспоненциальное нарастание темнового электронного тока через трубку отмечают многие исследователи [32]. Накопление положительных ионов на внутренней стенке трубки приводит к накоплению отрицательных ионов на наружной поверхности. Бывает, что разрядная трубка даже пробивается через стенку.

Установлено, что изготовление стенок разрядных трубок из слабопроводящего материала (стекла) положительно влияет на электрическую прочность. Правда, есть опасность электрохимического старения такого стекла. Гофрирование внутренней поверхности изоляторов мало улучшает дело, сильно затрудняя их изготовление. В то же время форма внутренних электродов, препятствующая попаданию ионов на изоляционные кольца секций (рис. 4.23), улучшает характеристики трубок.

Раньше большие ускорительные трубки обычно склеивали из отдельных колец, прокладывая между ними выдавленные по про-

филю электроды. Сейчас иногда их изготавливают на основе пайки металлизированной керамики, что гораздо надежнее. Трубки для ускорения электронов изготавливают даже в стеклянном отпаянном варианте. Можно также, и автор в этом убедился, монтировать промежуточные электроды внутри целой трубы из диэлектрика, закрепляя их через просверленные в трубе отверстия и уплотняя эти места, например, небольшими тефлоновыми прокладками. Сверлить сейчас фарфор или стекло нетрудно, так что эта технология, пожалуй, проще. В не очень ответственных случаях ускорительная трубка может быть изготовлена даже из оргстекла. Сразу после изготовления и сборки хороший вакуум в ней не получить, но через сутки откачки вакуум будет нормальным. Пробои в такой трубке сильно портят вакуум, поэтому восстановление напряжения после пробоя должно происходить с задержкой в 2—3 с [27]. Если придется делать ускорительную трубку из цельной стеклянной или фарфоровой, то нужно учесть некоторую эллипсность и конусность готового изделия. Для предотвращения скользящих пробоев вдоль стенок через зазоры между стенкой и электродами в этом случае, видимо, стоит применить что-то вроде поршневых колец.

Известно, что электроды из нержавеющей стали лучше, чем электроды из алюминия. Создатели ускорительных трубок должны также всегда учитывать необходимость тренировки трубки, в том числе пробоями. Для успешной тренировки емкость трубки на землю не должна быть слишком велика: в случае электростатических машин это выполняется автоматически, а в случае каскадных выпрямителей ускорительную трубку с колоннами конденсаторов приходится соединять через резистор, кратковременно выдерживающий все рабочее напряжение установки, т. е. резистор весьма больших размеров, в том числе большого диаметра.

Источники питания на высоковольтных платформах

Находящаяся под напряжением часть высоковольтной установки редко бывает лишена активных, потребляющих энергию устройств. Обычно там находится или накаливаемый катод и фокусирующие электроды, или катушки электронной пушки, или еще более энергоемкий источник ионов водорода. В установках на несколько десятков киловольт питание этих устройств обычно осуществляют с помощью разделительных трансформаторов. Но с ростом напряжения габариты и трудоемкость изготовления трансформатора растут, как растет и его минимальная, совершенно ненужная здесь мощность, так как высоковольтный трансформатор нельзя сделать на мощность меньше некоторого технического предела, зависящего от его напряжения. Поэтому, начиная с тридцати — пятидесяти киловольт (оценка может колебаться) гораздо более выгодным является расположение на земляном и высоковольтном концах установки пары мотор — генератор. Кто-то может сказать, что промышленность таких генераторов не выпускает, а разрабатывать их очень хлопотно. Но современные автомобильные генераторы как будто

созданы для этой цели: они дают частоту около 70—100 Гц и мощность 200—400 Вт. В качестве двигателя лучше брать двигатель не на 3000 об/мин, а более быстроходный и регулируемый двигатель до 6000 об/мин. Соединять двигатель с генератором, если они удалены друг от друга на небольшое расстояние, можно штоком из оргстекла, а в случае большого расстояния лучше (из-за резонансной частоты) взять более жесткую фарфоровую трубу и даже применить промежуточную опору.

На высоковольтной платформе обычно требуется регулировать режим работы, изменять фокусирующие напряжения, открывать и закрывать натекатели газов. Лучший способ медленной регулировки — использование сельсинов. Сельсин-датчик с рукояткой, а если нужно, то и шкалой с редуктором, располагается на пульте, а сельсин-приемник — под заземленной платформой. От сельсина-приемника идет диэлектрический шток к регулируемому устройству. Если необходим большой крутящий момент, то до или лучше после штока располагают редуктор.

Для быстрого управления, например, работой электронной пушки в импульсном режиме проще всего использовать луч света. Сейчас достаточно много малоинерционных импульсных источников света, а с помощью световода из стеклянной палочки или оптических элементов их излучение можно легко провести на значительное расстояние.

Управление пучком заряженных частиц.

Вывод пучка

Пучок заряженных частиц обычно или подают на мишень, или выпускают через фольгу наружу. При большой интенсивности пучка трудности возникают и в том и в другом случаях. Можно, конечно, попытаться расфокусировать пучок, и иногда это единственный вариант, если требуется одновременное облучение большой площади. Если же строгая одновременность воздействия не очень существенна, то более правильно сканировать пучок отклоняющими катушками. При таком решении гораздо легче добиться однородности облучения мишени, легко сохранить форму поля облучения при изменении интенсивности пучка. Пучок электронов очень легко отклоняется в магнитном поле. Его сканирование можно производить на выходе из ускорителя с помощью двух скрещенных катушек, одетых на тонкостенную часть ускорительной трубки из нержавеющей стали. Можно также расположить отклоняющие катушки прямо в вакуумном объеме. Отклонение ионного пучка требует гораздо большего магнитного поля. Обычно в этом случае применяют магнитные системы с магнитопроводом.

Вывод пучка быстрых электронов из ускорительной трубки, как правило, осуществляется через металлическую фольгу. Наилучшим материалом является бериллий, но фольга из него хрупка и часто не является вакуумно-плотной. Тем не менее нужно доби-

ваться, чтобы промышленность освоила выпуск бериллиевой фольги хорошего качества.

Титановая фольга толщиной 12—15 мкм сейчас является самым удовлетворительным материалом для вывода пучка электронов. Ее тормозная способность соответствует потере 10—15 % энергии для электронов с энергией около 200 кэВ. При большей энергии пучка потери быстро уменьшаются.

Алюминиевая фольга, особенно прочная фольга из сплава АМЦ, выпускаемая в СССР, толщиной 30 и 50 мкм по тормозным и прочностным характеристикам не хуже титановой, но уступает ей по термостойкости и соответственно допустимой энергонапряженности.

Сейчас существуют очень прочные пластиковые пленки, например лавсановая, тормозные потери в которых меньше, чем в алюминиевой или титановой фольге. Через такие пленки успешно выводятся электронные пучки импульсных электронных пушек. Однако из-за радиоллиза у таких пленок очень малое время жизни.

Фольга является самым «узким» местом энергонапряженных электронных пушек. Фольга большой площади поддерживается с вакуумной стороны решеткой, подчас охлаждаемой, обдувается струей воздуха или, в лазерной камере, струей, активной среды лазера.

Расчеты показывают, что при скорости обдувающего газа около 50 м/с можно, в зависимости от термостойкости фольги, обеспечить с нее энергоотвод до 2 кВт/дм².

Вывод пучков тяжелых заряженных частиц более сложен из-за больших тормозных потерь, хотя мощность этих пучков обычно существенно ниже. В таких мощных ускорителях, как циклотрон, практически не удастся вывести через фольгу пучок с максимально возможным током, поэтому облучаемую мишень помещают прямо в вакуум, обеспечивая ее интенсивное охлаждение. В ускорителях, дающих пучки частиц высокой энергии, эта проблема решается проще, так как большой пробег частиц позволяет применять толстые выводные окна. Прорыв фольги — вещь достаточно обыкновенная и не должна вызывать слишком неприятные последствия, вроде замены масла в насосе. В случае больших установок, видимо, правильно делать узел вывода пучка с быстрым клапаном, отсекающим вакуумный объем при прорыве фольги, или применять турбомолекулярные насосы.

4.5. СИЛЬНОТОЧНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ УСТРОЙСТВА

Задача создания сильноточного импульсного устройства, как правило, высоковольтного, в общем виде выглядит так. Дана некоторая нагрузка, параметры которой условно описываются зависимостью $I(U)$, часто не очень хорошо известной и не всегда безгистерезисной; кроме зависимости $I(U)$ нагрузка характеризуется индуктивностью и емкостью. Иногда требуется сформировать на нагрузке заданный по мощности и форме импульс, например прямоугольный, если это СВЧ-генератор. Чаще энергию требуется вло-

жить в нагрузку как можно быстрее, крутизна и амплитуда переднего фронта определяют степень решения задачи. Это требование связано с тем, что в нагрузке происходят процессы рассеяния энергии, будь она лазерной камерой или термоядерной мишенью, и, чем быстрее происходит вложение энергии, тем большая ее часть реально накопится в нагрузке.

Накопители электрической энергии

Если взять любой конденсатор и зарядить его до допустимого напряжения U , затем разрядить в режиме короткого замыкания, то в ходе такого простейшего «эксперимента» можно получить весьма поучительные результаты. В режиме короткого замыкания через цепь потечет все же конечный ток, зависящий от внутренней индуктивности и от активного, с учетом скин-эффекта, сопротивления обкладок конденсатора. В этом режиме КПД отдачи энергии во внешнюю цепь, естественно, почти равен нулю и для того чтобы заметная доля энергии попала в нагрузку, ток через конденсатор должен быть в несколько раз меньше тока короткого замыкания. Если увеличивать число конденсаторов, соединяя их последовательно, то ясно, что ток короткого замыкания не возрастет. Если увеличивать число конденсаторов, соединяя их параллельно, ток будет увеличиваться в 2, 3, 4 раза а далее прибавка будет все уменьшаться из-за того, что следующий конденсатор близко уже не поставишь — нет места, а ставить подальше — резко увеличиваются и индуктивность, и сопротивление подводящих проводов. Поэтому для любого конкретного типа конденсаторов существует некоторый асимптотический предел достижимого импульсного тока. Реально достижимый ток на нагрузку, конечно, существенно меньше.

Легко убедиться в том, что далеко не всякая емкость безболезненно переносит не только ток короткого замыкания, но и меньшие значения токов, особенно если она входит в состав батареи. По соображениям безопасности конденсаторную батарею нельзя делать со слишком большой плотностью укладки конденсаторов.

Плотность электростатической энергии, Дж/см³, в активном объеме конденсатора v , см³, пропорциональна

$$dW/dv \approx \epsilon E_2^{\text{раб}}/8\pi \cdot 10^{-12},$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость; $E_{\text{раб}}$ — допустимая напряженность электростатического поля, В/см. Для трансформаторного масла при $\epsilon=2$ и $E_{\text{раб}}=100$ кВ/см:

$$dW/dv \approx 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/см}^3.$$

Для хорошей конденсаторной керамики dW/dv может достигать 0,1 Дж/см³ и даже больше.

Можно сравнить эти значения с энергией, которая может быть запасена в катушке индуктивности (см. с. 72), для ферритового сердечника мы получили 0,02 Дж/см³, для стального 1 Дж/см³, т. е. больше, чем для лучших конденсаторов. Плотность энергии магнитного поля в индуктивном накопителе энергии может быть

в десятки раз больше, чем в емкостном. Этим объясняется интерес, проявляемый рядом физиков к индуктивному накопителю. Трудность использования индуктивности как накопителя резко возрастает при увеличении энергии и напряжения.

Индуктивность для сброса энергии надо разомкнуть, а емкость — замкнуть. Сильноточный коммутатор, работающий на быстрый разрыв цепи, конечно, сложнее, чем замыкающий. Трудность создания надежных высоковольтных и малоиндуктивных конденсаторов, позволяющих, в частности, запастись энергией для импульсных электронных пушек, привела в последние годы физиков к использованию вместо конденсаторной батареи силового высоковольтного кабеля. Высоковольтный силовой кабель с рабочим напряжением 100 кВ выдерживает многократное приложение импульсного напряжения до 350—400 кВ. Погонная ёмкость такого кабеля — около 200 пФ/м, волновое сопротивление — около 50 Ом. Кабель при включении его одним концом представляет собой длинную линию, на каждом метре длины которой можно запасти приблизительно 10 Дж энергии. При полном согласовании с нагрузкой напряжение на нагрузке будет равно половине напряжения, до которого заряжен кабель. Если кабель включить кольцом, т. е. обеими концами, то волновое сопротивление уменьшится в 2 раза, и при работе на сопротивление нагрузки 50 Ом напряжение упадет не вдвое, а на треть. Если используется маслонеполненный кабель, то необходимо принять меры против попадания в него воздуха. Разделка концов кабеля должна производиться с учетом имеющегося здесь опыта. Возможно, в настоящее время использование кабеля как емкости представляет собой одно из наиболее приемлемых решений для формирования импульсов в десятки наносекунд.

Коммутаторы

К коммутатору проще предъявить требования, чем их удовлетворить. Он должен: выдерживать до замыкания максимально высокое напряжение, пропускать без разрушения большой ток, быть малоиндуктивным, иметь низкое внутреннее сопротивление, легко и точно во времени замыкаться, а также подчас обладать униполярной проводимостью. В этот список требований не включены технологические требования — о рабочей частоте, ресурсе и др. Понятно, что число коммутаторов достаточно велико — от контактных прерывателей до высоковольтных ламп с магнитным полем — инжек-

Механические прерыватели, коммутирующие ток за счет соприкосновения или разрыва электродов, нельзя использовать как высоковольтные из-за искры при замыкании и дуги при разрыве контакта. Исключение представляют промышленные устройства для распределения электроэнергии и защиты. Они снабжены мощными дугогасителями и имеют внушительные габариты. Экспериментаторам такие устройства требуются редко. По сравнению с тиристорами, которые могут коммутировать достаточно большие напряжения

и токи, у механического коммутатора остается преимущество простоты и неплохой надежности при примитивном обслуживании.

В первичной цепи индуктивного накопителя такой коммутатор может обеспечить получение во вторичной обмотке напряжения до десятков киловольт, но с пологим фронтом. Небольшие механические прерыватели — вибропреобразователи используют для получения высокого напряжения в некоторых маломощных устройствах, но и здесь их, видимо, вытеснят тиристоры.

Если электрический контакт должен быть замкнут под напряжением при очень быстром нарастании тока, то следует иметь в виду, что на воздухе искра при сближении электродов проскакивает, начиная примерно с 400 В. Контакты при протекании большого импульсного тока могут свариться между собой. Хорошо противостоят этому вольфрамовые поверхности контактов.

Разрыва находящейся под током цепи механическим прерывателем надо избегать из-за опасности возникновения дуги. Если же это необходимо, то скорость разъединения контактов должна быть максимально большой. Реально большую скорость удаления для тяжелых контактов сразу не разовьешь, поэтому в мощных размыкателях контакты вначале скользят друг по другу, набирая скорость, а затем уже выходят из зацепления.

При работе контактов в периодическом режиме с большим количеством коммутаций для уменьшения износа лучше, если поверхности соприкасаются друг с другом без трения; если же необходимо применить вращающееся контактное устройство, то в качестве одного из электродов лучше взять графит или меднографит.

Дуга гораздо легче гасится, если разрываются сразу два последовательно включенных контакта, как это сделано в стандартных магнитных пускателях. Часто для подавления дуги при размыкании контактов применяют «искрогасящую» цепочку — последовательно включенные небольшое сопротивление и емкость, параметры которых подбирают эмпирически.

Тиратроны — газоразрядные трехэлектродные приборы, обычно наполненные водородом под давлением доли миллиметра ртутного столба, являются одними из самых распространенных коммутаторов. В СССР изготавливают тиратроны на рабочее напряжение до 50 кВ и ток до 2,5 кА. При малых частотах повторения и малой длительности импульсов, характерных, например, для лазерных камер с поперечным разрядом, токи могут быть существенно больше. Старые типы мощных тиратронов помещались в стеклянные корпуса и имели довольно большие габариты и значительную индуктивность выводов. Новые типы тиратронов изготавливают на основе изоляции из алундовой керамики. Они имеют коаксиальные малоиндуктивные выводы.

Потери мощности в тиратроне делятся на потери установившегося режима, стартовые и послеразрядные (если через прибор протекает обратный ток). Развитие разряда в тиратроне происходит в течение десятков наносекунд, тем быстрее, чем более крутой фронт сеточного открывающего импульса dU_c/dt ; время

задержки разряда по отношению к моменту подачи импульса на сетку может достигать 1 мкс; обычно эта задержка достаточно стабильна при неизменном режиме. Доля стартовых потерь в потерях энергии много больше, чем доля времени, занимаемая стартовым режимом в общем времени разряда. Это понятно: в момент старта произведение $IU_{\text{внутр}}$ много больше, чем в установившемся режиме, так как напряжение на аноде тиратрона еще не упало до десятков вольт. В стартовые потери неизбежно попадает значительная доля энергии заряда емкости анод — сетка. У тиратрона ТГИ 1000/25 эта емкость равна 22 пФ, у ТГИ 2500/35 (металлостеклянного) — 68 пФ, а у еще более мощного ТГИ 2500/50 — снова 22 пФ. Ясно, что последний тиратрон будет обладать меньшими стартовыми потерями по отношению к коммутируемой мощности.

Особенно велики стартовые потери и связанный с ними износ тиратрона в высокочастотных импульсных схемах, в то время как в генераторах ударного возбуждения колебаний велика также и доля послеразрядных потерь за счет обратного тока при многократной быстрой переполусовке тиратрона.

При работе импульсного модулятора с низкоомной нагрузкой, например, с поперечным разрядом в лазерной камере, трудно бывает избежать затухающих колебаний, в связи с чем в этом случае велики и стартовые, и установившиеся, и послезарядные потери.

Тиратроны работоспособны до 50 кГц, но при пониженном импульсном токе и средней мощности [33]. После более мощных импульсов восстановление протекает медленнее.

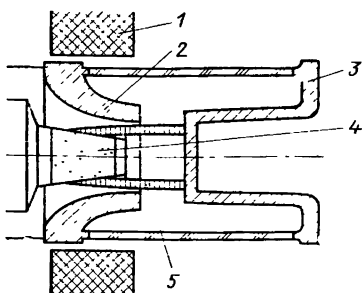
Разряд в тиратроне не может быть погашен подачей отрицательного потенциала на сетку: он гаснет либо при переполусовке анода в течение времени, достаточного для восстановления прочности, либо при падении прямого тока до небольшого значения, порядка 1 % максимального импульсного тока.

Для преодоления этого недостатка — потери управляемости после поджига — были разработаны таситроны — тиратроны с более мелкими отверстиями в сетке и повышенной эмиссией катода [33]. Таситроны труднее поджигаются, их пусковой ток больше, чем у тиратронов той же мощности, но зато они могут быть погашены под напряжением, в связи с чем их рабочая частота доходит до сотен килогерц. В то же время использование таситронов с тиратронным подмодулятором, без принудительного гашения, вряд ли оправдано.

Поскольку для деионизации тиратрона, особенно после мощного импульса тока, необходимы десятки микросекунд, лучше в течение этого времени не подавать на него положительное напряжение. Амплитуда выброса обратной полярности, приводящего к распылению анода и металлизации внутренних стенок, не должна быть большой. Поэтому, если нужно обеспечить надежную длительную работу тиратрона в напряженном режиме, не пожалейте времени на диагностику, не обольщайтесь тем, что схема сразу заработала: тиратрон на плохо отлаженной схеме можно «загнать» за несколько часов. Выбирайте варианты восстановления напряжения на тиратроне в соответствии с рабочей частотой: при низкой частоте проще

Рис. 4.24. Импульсный высоковольтный модулятор — инжектрон [35]:

1 — магнитная система; 2 — управляющий электрод; 3 — коллектор (анод); 4 — катод; 5 — полый электронный пучок



всего — через резистор; при достаточно высокой — через рекуперирующий дроссель, а при особенно напряженном режиме, быть может, следует вести подзаряд с принудительной задержкой во времени с помощью регулирующей лампы, второго тиратрона и т. п.

Импульсные модуляторные лампы — это электровакуумные приборы с большой эмиссией катода, обычно тетроды с правой характеристикой [35]. Их особенность — анод тщательно скруглен, удален от второй сетки на значительное расстояние и выведен через верх баллона; он не имеет других креплений внутри лампы. Мощные, серийно выпускаемые в СССР лампы ГМИ-2Б допускают анодное напряжение до 32 кВ, ток до 90 А, а при очень коротких импульсах и больше; анод этой лампы рассеивает до 900 Вт тепловой мощности. Изготавливают также гораздо более мощные лампы ГМИ-29 с импульсным током до 200 А и рассеиваемой мощностью до 10 кВт.

Модуляторные лампы являются, конечно, самыми гибкими коммутаторами, способными наиболее полно удовлетворить требованиям нагрузки. Одна из распространенных ошибок при работе с ними — когда их уподобляют тиратрону, т. е. считают, что чем больше подан импульс на сетку, тем лучше. Избыток положительного напряжения на сетке, особенно при индуктивной нагрузке, ведет к тому, что анодное напряжение падает ниже напряжения экранной сетки, ток перебрасывается на экранную сетку, резко ее перегружая. Следите, чтобы анодное напряжение в момент импульса не оказывалось ниже экранного!

Ток управляющей сетки у модуляторных ламп составляет 7—10 % анодного. Большая емкость «сетка — катод» и высокие требования к крутизне переднего и заднего фронтов открывающего импульса вынуждают разрабатывать для управления этими лампами мощные подмодуляторы.

В импульсной технике применяют также лампу с магнитным полем — инжектрон (рис. 4.24). В этом трехэлектродном приборе параллельное оси магнитное поле формирует при положительном напряжении на управляющем электроде цилиндрический электронный луч, достигающий анода при очень малом токе на управляющий электрод: 1—2 % анодного тока. Инжектроны изготавливают на рабочее напряжение до 350 кВ и ток до 300 А [35].

Игнитроны — это газоразрядные приборы с холодным ртутным катодом [33]. Они заполнены парами ртути. Игнитрон пробивается с помощью поджигающего электрода, опущенного в ртутный катод,

и может пропускать импульсный ток до 100 кА. Фронт тока у него хуже, чем у тиратрона, так как давление ртутных паров недостаточно, и возрастает только в момент разряда. Восстанавливается электрическая прочность у игнитрона дольше, чем у тиратрона.

Благодаря большому импульсному току, никак не разрушающему жидкий ртутный катод, а также простой схеме поджига игнитроны применяют в технике физического эксперимента, например, как коммутаторы мощных импульсных осветительных ламп. Ток этих ламп достаточно большой, а требования к фронту импульса не очень велики, так как из-за собственной теплоемкости светящегося газа — ксенона — лампа даже при очень крутом фронте тока все равно не может выйти на максимальную яркость быстрее чем за сотни наносекунд.

Другое применение игнитронов — получение мощных импульсных магнитных полей, т. е. включение в конденсаторные батареи катушек, создающих эти поля. Использование длинных (длящихся около миллисекунды) импульсов дает возможность проводить такие же исследования в полях до 500 кЭ (50 Тл), как и в стационарных полях, но с гораздо более простой и менее энергоемкой аппаратурой. Промышленное, пока еще не полностью освоенное, применение импульсных токов и магнитных полей — магнитная штамповка и сварка. Игнитроны и их разновидность — экзитроны, в которых постоянно горит вспомогательная ртутная дуга, широко используются в мощной электротехнике для выпрямления переменного тока и обратного инвертирования постоянного тока в переменный. Для сверхдальних линий электропередач требуется проводить такое преобразование при напряжении более миллиона вольт, так что физикам в разработке высоковольтных коммутаторов есть чем заняться.

Искровые разрядники. Искровой разряд долгое время был единственным способом быстрой коммутации высоких напряжений. Во многих случаях применение искрового разрядника и в настоящее время — одно из самых простых и удовлетворительных решений. Раньше из-за простоты чаще всего применяли самодельные открытые разрядники с воздушным промежутком. Их и сейчас используют в некоторых случаях, например в генераторах импульсного напряжения и в шаровых вольтметрах, однако разрядники закрытого типа, содержащие специально подобранные газовые смеси и электроды, имеют гораздо более высокие параметры, например более короткий фронт импульса. Немаловажным преимуществом закрытых разрядников является бесшумная работа, а также возможность их расположения в среде масла или другого электропрочного диэлектрика. Советская промышленность производит большое число типов этих приборов [36].

Искровой разряд развивается в газе, находящемся при достаточно высоком давлении — от ста и более миллиметров ртутного столба. Возникновение пробоя связано со стримерным механизмом размножения электронных лавин и происходит достаточно быстро. Чем выше давление и меньше расстояние между электродами, тем короче время полного развития разряда — время коммутации.

У специальных разрядников-обострителей типов Р48, Р43 и Р49, наполненных водородом при давлении 35—40 ат, время коммутации составляет 3 нс при напряжении пробоя 100, 150 и 240 кВ соответственно [36].

Искровые разрядники — пока единственные приборы, позволяющие коммутировать столь высокое напряжение за такое короткое время.

Частотные свойства и коммутируемая мощность у искровых разрядников не так уж плохи. Те же типы разрядников позволяют работать на частоте до 50 и даже до 200 Гц и коммутировать энергию до 2 Дж в каждом импульсе. Мгновенная готовность искрового разрядника к работе также может представлять в некоторых случаях определенный интерес. Помимо двухэлектродных, «неуправляемых» разрядников выпускают также трехэлектродные разрядники с промежуточным поджигающим электродом. Эти разрядники схожи с тиратроном по схемному включению: в интервале от U_{\min} до U_{\max} они поджигаются импульсом на управляющий электрод; при $U > U_{\max}$ начинается пробой без поджига.

У искровых разрядников холодные электроды и пробой в них начинается после появления в зоне большой напряженности хотя бы одного электрона. Поэтому разряд запаздывает при быстром приложении напряжения. Время запаздывания искрового разряда обычно намного больше времени развития уже начавшегося разряда. Для ликвидации этого эффекта в разрядник вводят β -радиоактивные препараты, чаще всего ^{63}Ni , обладающий достаточно большим периодом полураспада. Искровые разрядники широко применяют в различных схемах защиты от перенапряжений. Для успешной работы в этом качестве разрядник должен пробиваться быстрее, чем напряжение достигнет опасного значения и произойдет аварийный пробой в слабом месте конструкции.

Некоторые типы высоковольтных разрядников, в том числе разрядники-обострители, дающие фронт импульса до 3 нс, можно эксплуатировать только в масле или газе под давлением, иначе пробой наступит снаружи, а не внутри разрядника. Это удобно, так как высоковольтные трансформаторы также обычно помещают в электропрочную среду.

Тиристоры в меньшей степени, чем другие описанные ранее коммутаторы, относятся к элементам высоковольтной техники. Основное их назначение — регулирование и преобразование напряжений в силовых устройствах и устройствах автоматики. Однако широкое распространение тиристоров и удобство работы с ними позволяют применять их в импульсной высоковольтной технике. Тиристор представляет собой как бы полупроводниковый тиратрон. При отсутствии тока через управляющий электрод тиристор заперт вплоть до максимально допустимого напряжения на аноде.

При подаче на этот электрод положительного импульса тока, составляющего обычно меньше одного процента рабочего тока тиристора, тиристор открывается и остается открытым, пока через него течет прямой ток. При переполюсовке анода тиристор вновь переходит в непроводящее состояние. Наличие тока управляющего электрода при переполюсовке нежелательно, так как это увеличивает обратный ток [24]. Особенности тиристоров состоят в том, что они допускают ограниченную скорость нарастания тока и на-

пряжения, существенно меньшую, чем у тиратронов, а время восстановления электрической прочности у них больше. Серийные, невысокочастотные тиристоры имеют время нарастания прямого тока около 5 мкс. Если при этом ток нарастает до максимального значения, например, 100 А, а режим включения повторяется, например, 1000 раз в секунду, то стартовые потери, связанные с большим произведением UI на тиристоре в момент переключения, могут стать основными. Чтобы уменьшить эти потери, в анод тиристора включают дроссель с насыщающимся сердечником, который в момент переключения существенно уменьшает протекающий ток. Разумеется, первоначальный фронт тока в нагрузке при этом также несколько ухудшается. Это не сказывается на работе инверторов, но ухудшает, например, режим поджига тиратронов с помощью тириستоров.

После переполюсовки тиристор должен вновь стать управляемым. Обычные типы тириستоров в холодном состоянии имеют время восстановления около 25 мкс, а при рабочей температуре — до 75 мкс; выпускают также тиристоры с малым временем восстановления — 10—15 мкс.

Тиристор можно выключить под прямым напряжением. Для этого в его анодную цепь включают источник ЭДС, например импульсный трансформатор, и искусственно переполюсовывают тиристор на время, большее времени восстановления. Эта операция, совершаемая под напряжением, требует определенных энергетических затрат, так как коммутатор должен принять на себя ток, протекающий через тиристор.

Следует иметь в виду, что слишком резкое нарастание напряжения на аноде запертого тиристора может его открыть за счет емкостной связи между анодом и управляющим электродом.

При соблюдении некоторых мер предосторожности тиристоры можно использовать в качестве вполне надежных элементов не очень высоковольтных установок.

Нагрузка импульсных устройств

Вольт-амперная характеристика нагрузки играет первостепенную роль при проектировании импульсного устройства.

Простейшая вольт-амперная характеристика — линейная. Она характерна, например, для импульсных ксеноновых ламп, работающих в дуговом режиме. Представление, что дуга имеет падающую характеристику, при больших токах, особенно у инертных газов, неверно. Характеристика у них в этой области почти линейно нарастающая, что позволяет прикладывать к импульсной лампе напряжение в несколько киловольт.

Многие экспериментаторы стремятся получить с помощью усовершенствования импульсной лампы как можно более короткий импульс света. Но это задача скорее физическая, а не электронная. В самом деле, газ — светящееся тело в лампе — имеет определенную конечную теплоемкость и при мгновенном отключении питания он остывает постепенно. Сделать массу газа исчезающе ма-

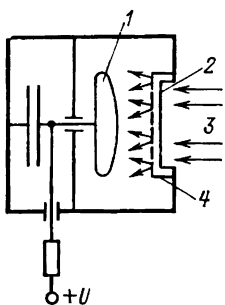


Рис. 4.25. Схема поперечного импульсного разряда с предыонизацией газа электронным пучком:

1 — анод; 2 — фольга; 3 — электронный пучок; 4 — сетка, защищающая фольгу при пробоях

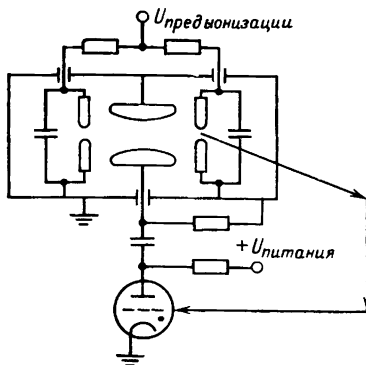


Рис. 4.26. Схема поперечного разряда с предыонизацией газа ультрафиолетовым излучением вспомогательного разряда

лой нельзя — он становится прозрачным и плохо излучает, а кривизна переднего фронта также связана с теплоемкостью нагреваемой среды. Поэтому, помимо оптимизации электроники нужно оптимизировать среду: например, использовать более тяжелые пары ртути, которые имеют лучшее соотношение между излучательной способностью и теплоемкостью, чем ксенон; форма и размеры светящейся части также очень важны.

Известно, что при медленном повышении тока тлеющий разряд переходит в дуговой, и падение напряжения в столбе разряда резко уменьшается. В то же время при коротком импульсе газ не успевает нагреться до температуры, при которой играет роль термическая ионизация, и поэтому при очень большой плотности тока 100 А/см^2 и более разряд в холодном газе короткое время остается тлеющим. Падение напряжения в столбе такого разряда может достигать десяти — двадцати киловольт на метр, а в случае поперечного разряда при большом давлении может почти достигать искрового потенциала.

Если в момент подачи импульса напряжения в объеме газа было достаточное количество свободных электронов, то при высоком давлении разряд может короткое время оставаться равномерным, в то время как в статическом случае он при таком же давлении будет искровым. Создание предыонизации — одно из важных условий протекания импульсного разряда; особенно трудно это достигается в случае электроотрицательных газов. Часто поэтому применяют пучок быстрых электронов. Возникшая в газе значительная проводимость используется для вложения энергии от дополнительной конденсаторной батареи (рис. 4.25) [56].

Эта схема широко используется в лазерной технике, прежде всего для таких лазеров, как CO_2 , CO , HF и эксимерных лазеров.

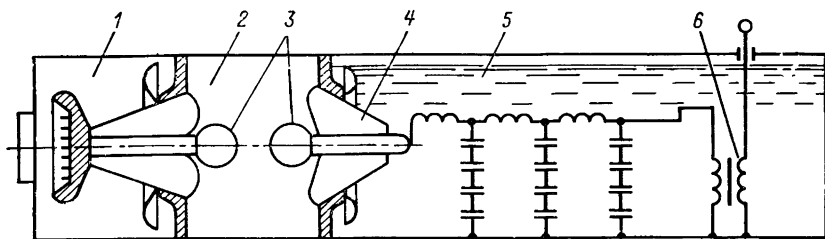


Рис. 4.27. Поперечный разрез импульсной электронной пушки с острым катодом:

1 — вакуумная камера; 2 — азот, 10 ат; 3 — искровой разрядник-обостритель; 4 — полиэтилен; 5 — масло; 6 — импульсный трансформатор, $\tau \approx 10^{-5}$ с

Еще чаще используют более простую схему с поперечным разрядом, предыонизация в которой осуществляется с помощью ультрафиолетового света от небольших боковых разрядов, несколько опережающих главный разряд (рис. 4.26).

Внутреннее сопротивление разряда подчас бывает слишком низким, сравнимым с сопротивлением коммутирующих и конденсаторов, а индуктивность нагрузки тоже ограничивает скорость вложения энергии.

Поэтому изготовление и обеспечение устойчивой работы модуляторов, работающих на низкоомную нагрузку типа поперечного разряда, представляет собой сложную задачу. Пока эта задача удовлетворительно решена только для невысоких частот повторения, порядка ста герц. При больших частотах самые мощные тиратроны и электроды разрядного промежутка не выдерживают длительной работы. Для продольного разряда дело обстоит гораздо лучше. Здесь при сопротивлении нагрузки 30—100 Ом удастся создать надежные модуляторы с частотой до 20—40 кГц как на тиратронах, так и на лампах. Нарастание тока можно обеспечить за время 20—30 нс, а всю длительность импульса — за 100—200 нс. Разумеется, для обеспечения таких параметров коммутатор, конденсаторная батарея и нагрузка должны быть смонтированы с минимальной индуктивностью.

Простой, хотя и нелинейной нагрузкой является проводящий вакуумный диод: магнетрон, электронная пушка. Закон трех вторых делает сопротивление такой нагрузки зависящим от тока; как правило, сопротивление вакуумного диода достаточно велико и КПД вложения энергии получается хорошим. На рис. 4.27 представлен поперечный разрез электронной пушки с острым катодом.

Особое место как нагрузка мощных импульсных устройств занимает плазма термоядерных установок, т. е. горячая плазма, отжатая от стенок магнитным давлением. Накачка энергии в плазму производится несколькими электротехническими способами, не считая лазерного. Самым старым, но не потерявшим своего значе-

ния способом является прямой омический нагрев, который в последние годы широко применяется в токамаках. В этом варианте плазма представляет собой виток вторичной обмотки индуктивного накопителя. В момент размыкания первичной цепи запасенная магнитная энергия в количестве около 100 Дж в расчете на 1 кг магнитопровода начинает перекачиваться в плазму. Если бы КПД перекачки был высоким, то проблема освоения термоядерной энергетики была бы, видимо, чисто технической. Запас энергии магнитопровода мощного токамака более чем достаточен для нагрева плазмы до термоядерных температур.

Однако проводимость плазмы почти не зависит от плотности и сильно зависит от температуры [37]. При $2 \cdot 10^7$ К водородная плазма проводит ток лучше меди. Это — одно из основных препятствий на пути к овладению термоядерной энергией; ясно, что по мере возрастания электропроводности плазмы выделяемая в ней энергия будет, начиная с некоторого момента, падать, а, кроме того, время ее выделения увеличится, значит, возрастут потери. Поэтому вложение энергии в горячую плазму — одна из сложнейших экспериментальных и теоретических задач нашего века.

Заканчивая эту главу, автор еще раз советует физикам, создающим высоковольтную технику, стараться использовать максимальное количество проверенных решений. Электротехника накопила огромный опыт работы с высокими напряжениями, этот опыт позволяет создавать высоковольтные установки, обладающие достаточной долговечностью и надежностью.

Выход из строя высоковольтного оборудования, его хроническая ненадежность резко замедлят темп Ваших исследований. Поэтому, как и полагается в электротехнике, рассчитав установку с необходимым запасом на нужное напряжение, Вы должны оговорить ее предельные параметры и попросту наказывать любого «рекордсмена», попытавшегося их превысить. Доведение установки до предельных параметров допускается лишь тогда, когда темой являются разработка и испытание нового высоковольтного оборудования, если же оно предназначено для обеспечения экспериментов, то должно обладать необходимым запасом прочности.

ГЛАВА 5

ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА

5.1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

Физикам приходится иметь дело с двумя видами вакуумных систем: во-первых, собственно вакуумными, в которых в процессе работы необходимо поддерживать возможно более низкое давление, и, во-вторых, замкнутыми или проточными герметичными системами, выполненными с соблюдением правил вакуумной гигиены, но рабочее давление в которых не равно нулю, а газовая среда может

быть самой различной, в том числе содержащей такие агрессивные газы, как фтор.

Перечислим основные трудности, возникающие при создании вакуумных систем.

1. Не существует стенок вакуумной камеры, которые не выделяли бы остаточные газы.

2. Все разборные уплотнения в той или иной степени негерметичны.

3. Органические прокладки пропускают одни газы, и выделяют другие.

4. Все насосы в той или иной степени являются источниками загрязнения вакуумной системы.

В этом по виду очень пессимистическом перечислении автор сформулировал, по его мнению, четыре главные заповеди создателя хороших вакуумных систем. Пятая — оптимистическая заповедь гласит: хорошую (для данных условий) вакуумную систему создать можно. Эта заповедь отнюдь не тривиальна. Ее нельзя с той же степенью уверенности высказать в отношении систем высокого давления или высокого напряжения. Но автор почти не знает случаев, чтобы именно вакуумные трудности остановили бы прогресс термоядерных исследований, ускорительной, лазерной техники и т. д.

Вакуумная часть установки в конструктивном отношении подчас является главной ее частью. Серьезные ошибки, допускаемые при создании вакуумной системы, требуют для своего устранения больших переделок; в то же время сейчас, если учесть накопленный опыт, имеется полная возможность создавать хорошие вакуумные системы без единой ошибки и выводить их сразу, без доводки, на расчетные параметры [38, 39].

Рабочая камера системы может иметь самую различную форму. Иногда, и это облегчает задачу, размеры камеры не слишком жестко определены, например в случае напылительных установок или даже камер лазеров с электронным пучком. В других случаях, например у ускорителя с жесткой фокусировкой, размер камеры продиктован внешними устройствами — полюсами магнитной системы. В этом случае вакуумная проводимость самой камеры, т. е. ее способность пропустить через свое сечение откачиваемый газ, может оказаться недостаточной. При создании камер значительных размеров следует избегать прямоугольной геометрии: для камеры такой формы необходимы более толстые стенки, они деформируются при откачке и выглядят неэстетично. Гораздо лучше цилиндрические камеры, крышка которых по возможности не плоская, а выпуклая.

Через неподвижный фланец (дно) вакуумной камеры внутрь вакуумного объема вводятся по возможности все необходимые электровводы, штоки управления и т. п. К этой же части присоединяется и вакуумный агрегат. Для удобства работы желательно, чтобы вся остальная часть камеры (колпак) легко убиралась, например поднималась вверх с помощью противовеса (рис. 5.1). Рас-

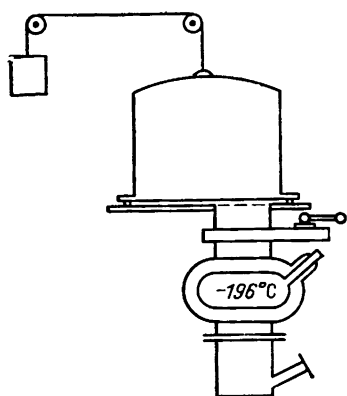


Рис. 5.1. Схема вакуумной камеры с колпаком, поднимающимся вверх с помощью противовеса

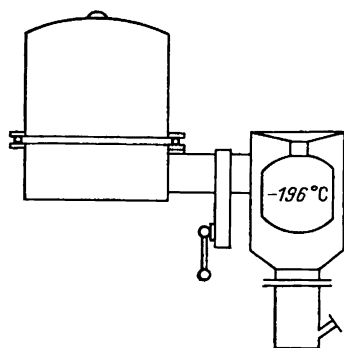


Рис. 5.2. Схема вакуумной камеры с боковым расположением насоса

положение вакуумного агрегата, как показано на рис. 5.1, не всегда удобно, так как создает тесноту на нижнем фланце, поэтому часто располагают вакуумное оборудование сбоку (рис. 5.2).

Такое расположение облегчает размещение и обслуживание вакуумной системы, намного улучшает доступ к неподвижному фланцу, но в камере монтаж и юстировка аппаратуры затрудняются из-за необходимости делать высокий борт, обеспечивающий нужную скорость откачки.

Для того чтобы облегчить сопряжение основного объема с вакуумным агрегатом, некоторые отечественные промышленные конструкции снабжаются верхним и боковым фланцами для включения агрегата снизу или сбоку.

Теперь обсудим расположение крупных узлов и элементов трассы. Следом за основным экспериментальным объемом обычно ставится затвор — большой вентиль высокого вакуума, рассчитанный на всю производительность откачки. Его проходной диаметр может достигать у рядовых установок 200 мм, у крупных — 500 мм и более. Высокий вакуум можно получить и без затвора, а так как отечественная промышленность хорошие конструкции затворов (отдельно от агрегатов) пока не производит, понятно желание некоторых экспериментаторов обойтись без этого конструктивно сложного узла. При получении особо высокого вакуума, порядка 10^{-8} мм рт. ст., сам затвор, содержащий смазанные детали и неметаллические уплотнения, почти непрогрываемый, является источником натекания. В то же время он совершенно необходим на установках среднего вакуума, порядка 10^{-6} мм рт. ст., часто открываемых на атмосферу.

Если в установке используется масляный диффузионный насос, то приходится ставить и азотную ловушку. В этом случае работа без затвора очень затруднительна, так как запуск насоса и размо-

раживание ловушки могут сильно загрязнять вакуумный объем. Тем не менее существуют простые приемы пуска и остановки насосов, сводящие это загрязнение к минимуму. О них будет сказано при описании работы насосов. Турбомолекулярные насосы менее всех нуждаются в охлаждаемых ловушках и соответственно в затворах. Поэтому они выпускаются промышленностью без этих устройств, в то время как паромасляные насосы снабжаются и ловушками, и затворами.

Охлаждаемые ловушки выполняют две функции: во-первых, не пропускают в систему пары масла и другие конденсирующиеся газы из насоса и, во-вторых, как правило, в несколько раз повышают производительность откачки по конденсирующимся газам, конечно, понижая производительность (обычно примерно вдвое) по газам не конденсирующимся. При использовании паромасляных или парортутных насосов установка охлаждаемых ловушек практически является обязательной, так как повышает вакуум на порядок. Средняя молекулярная масса остаточных газов при использовании охлаждаемых жидким азотом ловушек также существенно уменьшается.

Высоковакуумные насосы в отличие от других узлов системы изготавливаются только промышленностью следующих основных типов: паромасляные, парортутные, турбомолекулярные, ионно-сорбционные и криогенные. Их конструктивные и эксплуатационные особенности будут описаны. Затвор, ловушка и насос высокого вакуума должны иметь сравнимую производительность откачки, определяющую их габариты. Трасса низкого вакуума или форвакуума, имеющая намного меньшее сечение, заканчивается форвакуумным насосом, который создает в помещении значительный шум, а подчас мешает и своей вибрацией. Автор поделится опытом, как в экспериментальном помещении избавиться от шума форвакуумных насосов.

Для предварительной откачки установки используется обычно тот же самый форвакуумный насос, сообщаемый с экспериментальной камерой с помощью вентиля форвакуумной откачки. Поскольку при этом давление на входе насоса может быть любым, вплоть до атмосферного, трасса форвакуумной откачки должна отсекается от насоса высокого вакуума, который в это время, отсеченный с обеих сторон, работает «сам на себя». Если откачка длится более 10 мин, то к насосу высокого вакуума со стороны форвакуума следует присоединить ресивер, помогающий ему продержаться, пока длится форвакуумная откачка установки.

Хорошим средством поддержания великолепного «безмасляного» форвакуума (порядка 10^{-3} мм рт. ст.) является угольная ловушка, охлаждаемая жидким азотом (рис. 5.3).

Если система оснащена такой ловушкой, то после ее откачки до 0,5 мм рт. ст. можно отключать форвакуумный насос, включать ловушку и наслаждаться тишиной, в то время как вакуум быстро достигнет 10^{-3} мм рт. ст. Не следует использовать угольные ловушки при постоянном притоке в систему водорода, неона и особенно

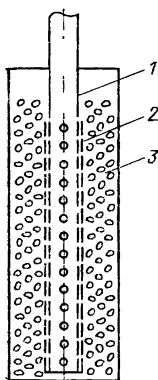


Рис. 5.3. Угольная ловушка для поддержания форвакуума:

1 — трубка с отверстиями; 2 — мелкая сетка; 3 — уголь

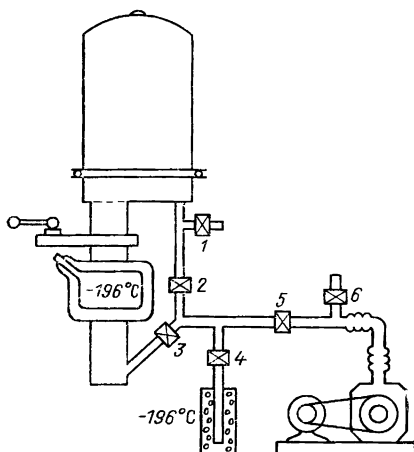


Рис. 5.4. Обычная схема коммуникаций системы высокого вакуума

гелия, так как эти газы она сорбирует плохо. Во всех остальных случаях ловушку без тренировки нагревом и откачкой можно использовать в течение нескольких недель, а повторная ее тренировка занимает не более получаса. При отключении форвакуумного насоса следует помнить, что он не должен долго оставаться под вакуумом в остановленном состоянии; его следует отсечь от системы и сообщить с атмосферой.

Нормальное состояние вакуумной системы — откачанное. Напуск в систему воздуха следует производить только тогда, когда ее нужно вскрывать, например это не следует делать при уходе в отпуск. Напускать воздух лучше через фильтр от пыли. Еще лучше напускать в систему сухой азот, что делается очень просто: на атмосферный патрубок надевается резиновый шланг, а его свободный конец опускается в дьюар со свежим (без кислорода!) жидким азотом. После кратковременного, периодического открытия вентиля очень легко подобрать режим спокойного заполнения системы испаряющимся жидким азотом, что существенно уменьшает адсорбцию воды на поверхностях. Все элементы и соединения обычной системы высокого вакуума показаны на рис. 5.4.

Трасса откачки обычно присоединяется к нижнему фланцу, поэтому не забудьте прикрыть ее редкой сеткой, чтобы потом не доставать из вакуумной системы упавшие болты. Прикрывать трассу сверху «грибком», а не сеткой значит уменьшать производительность откачки и занимать лишнее место на нижнем фланце.

Необходимость установки высоковакуумного затвора уже обсуждали. Большие затворы, как правило, несимметричны по прочности и выдерживают давле-

ние на кляп 1 ат только с одной стороны. Эта сторона, конечно, должна быть обращена к рабочему объему. Тренировка ловушки, имеющей объем 1—2 л, производится через одну-две недели либо откачкой ее до $\sim 0,2$ мм рт. ст. в течение получаса при комнатной температуре, либо, лучше, откачкой и дополнительным разогревом до 200°C . Внутренний патрубок ловушки обязательно должен быть поверх просверленных отверстий обернут мелкой сеткой (см. рис. 5.3), иначе адсорбент — уголь или цеолит — обязательно разлетится при обезгаживании всей системы. Начинаящим физикам следует еще раз напомнить, что форвакуумный насос после отключения нужно открыть на атмосферу вентилем 6 (рис. 5.4). Вентили 1 и 2 служат для форвакуумной откачки и напуска воздуха в рабочий объем. Не следует откачивать рабочий объем форвакуумным насосом слишком долго — это загрязняет его парами масла; пока есть заметный поток воздуха — пары уносятся им, а когда он прекращается (ниже $0,1\text{--}0,2$ мм рт. ст.), нужно сразу же перекрывать форвакуумную откачку вентилем 2 и открывать затвор. Если гидравлическое сопротивление от насоса высокого вакуума и до ловушки или форвакуумного насоса сделано небольшим, то диффузионный насос «захлебнется» лишь на десятки секунд и быстро откачает рабочий объем. Вентиль 3 перекрывается при обезгаживании ловушки, а перекрытие вентилей 4 позволяет работать без ловушки. При прорыве воздуха в систему ловушка может адсорбировать его в количестве двадцати своих объемов, т. е. после отогрева давление в ней будет до 20 атм. В этом случае ее нельзя закрывать и оставлять отогреваться: нужно сразу же ее откачать при постепенном отогреве. Вибрирующий форвакуумный насос от системы отделяют сильфоны. Такое решение правильно для больших насосов, а при использовании малых насосов с диаметром патрубка до 20 мм предпочтительнее короткий отрезок резинового шланга.

Теперь о расположении форвакуумного насоса. Располагать его прямо в блоке с установкой следует только, если она передвижная, например если это теческатель. В случае стационарной установки насос по многим причинам лучше удалить и избавиться от шума. Противошумные ящики мало помогают, так как герметичными их не сделаешь — насос и мотор перегреваются, а с вентиляционными отверстиями они снижают шум недостаточно. Лучше насос убрать в отдельное помещение или расположить его в коридоре, в специальных нишах, если они предусмотрены.

Если по условиям техники безопасности или из-за габаритов все это сделать нельзя, можно воспользоваться следующим советом. Насос устанавливается на улице, около здания или на балконе, под простым навесом. Амортизаторы и отражательный щиток защищают ближайшие окна от его шума. Для обеспечения работы зимой часть масла (треть или половина) заменяют трансформаторным или веретенным маслом, а на одной из фаз внутри помещения устанавливают контрольный амперметр, не боящийся перегрузки при пусковом токе двигателя. С разжиженным маслом насос пускается даже при -40°C и дает вакуум до 10^{-3} мм рт. ст. благодаря низкой упругости паров холодного масла. Если насос не пустился и ток не упал до безопасного значения через 15—20 с, то необходимо его выключить, чтобы не сжечь обмотки двигателя, и разобраться, в чем дело. Разумеется, длинные коммуникации

для обеспечения нужной скорости откачки должны иметь достаточный диаметр, а все управление насосом — находиться поблизости от установки.

Отдельно следует сказать о линиях форвакуумной откачки, охватывающих целое здание или лабораторию. В организации, где работает автор, тоже есть такие линии. Опыт их эксплуатации, по мнению автора, свидетельствует об их недостаточной эффективности, хотя обеспечить их работу удается. Во-первых, такие системы не только не экономят электроэнергию, но и перерасходуют ее в несколько раз по сравнению с эквивалентным количеством индивидуальных постов откачки. Во-вторых, требуется создавать две линии — одну для откачки от атмосферы до 1 мм рт. ст. и вторую для поддержания форвакуума. В-третьих, совершенно необходимой оказывается автоматика отключения линии при резкой порче вакуума и т. д. Аналогия с централизованным электроснабжением, к которой часто прибегают, с физической точки зрения несостоятельна. В электросети мы миримся с колебаниями напряжения $\pm 5\%$; следуя этой аналогии, мы должны мириться с «вакуумом» на уровне 5% от 760 мм рт. ст. или около 30 мм рт. ст.

5.2. МАТЕРИАЛЫ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

Если бы стенки, аппаратура и уплотнения камеры были идеальными, т. е. не были бы источниками газов и паров, то давление в ней экспоненциально падало бы со временем вплоть до предельного значения, характерного для данного типа насоса. Поскольку скорость откачки насосов высокого вакуума редко бывает ниже 100 л/с, а объем системы редко превышает 1 м³, то согласно простой оценке падение давления вдвое должно происходить в течение нескольких секунд, а до предельного вакуума — в течение одной минуты.

Начинающие физики очень нервничают, когда в действительности все получается совсем не так. Обычно, собрав новую систему и убедившись в ее исправности, после включения всех насосов получают вакуум около 10^{-3} мм рт. ст., который быстро, в течение 10—30 мин, достигает значения 10^{-4} мм рт. ст. и затем начинает мучительно медленно улучшаться. Это происходит при использовании как паромасляных, так и очень совершенных турбомолекулярных насосов. Причина основных трудностей получения высокого вакуума — газовыделение с поверхности (а часто и из объема) применяемых материалов.

Простые количественные соображения покажут сейчас, что газовыделение часто сводится к постепенному удалению адсорбированных геометрической поверхностью установки 20—50 мономолекулярных слоев газов.

Оценим скорость этого процесса. Пусть откачка происходит со скоростью 200 л/с при давлении 10^{-5} мм рт. ст. Тогда массовая скорость откачки, например, водяного пара составит:

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{18 \cdot 200 \cdot 10^{-5}}{760} \approx 2 \cdot 10^{-6} \text{ г/с.}$$

На 1 м² поверхности, при 50 атомных слоях ($\sim 100 \text{ \AA}$), будет находиться $10^4 \text{ см}^2 \cdot 10^{-6} \text{ см} = 10^{-2} \text{ см}^3 = 10^{-2} \text{ г}$ водяного пара.

Время удаления такого количества адсорбированных газов при вакууме 10^{-5} составляет $10^{-2}/(2 \cdot 10^{-6}) = 5000 \text{ с} \approx 1,5 \text{ ч}$. На самом деле по мере улучшения ва-

куума массовая скорость откачки падает, и при вакууме 10^{-6} мм рт. ст. время удаления такого же количества адсорбированных летучих веществ составит уже 15 ч. Из проделанной оценки следует, что за разумное время практически невозможно обезгазить установку при высоком вакууме. Либо мы блокируем газо-выделение, охлаждая всю установку, что, как, правило, нецелесообразно, либо мы обезгаживаем установку при сравнительно низком вакууме, т. е. при сравнительно высокой массовой скорости удаления газов. Для ускорения процесса обезгаживания чаще всего прибегают к прогреву всех основных деталей и корпуса установки.

Свойства основных материалов, применяемых в вакуумной отечественной и зарубежной технике, достаточно подробно описаны в [39—41]. К числам, характеризующим газо-выделение материалов, следует относиться как к оценочным, но общая характеристика особенностей материалов, даваемая в этих работах, по мнению автора, вполне правильна (табл. 5.1).

Т а б л и ц а 5.1 Скорость газо-выделения различных материалов

Материал	Скорость газо- выделения, л·мкм рт. ст / (с·м ²)
Конструкционная сталь, не обезгаженная прогревом	0,7—4
Конструкционная сталь, полированная после длительной откачки	0,02
Нержавеющая сталь, не обезгаженная прогревом	0,01—1
Нержавеющая сталь, обезжиренная, после длительной откачки	$2 \cdot 10^{-3}$
Нержавеющая сталь после длительного прогрева и откачки	$5 \cdot 10^{-8}$ — $3 \cdot 10^{-7}$
Латунь обезжиренная	1
Латунь протравленная и обезжиренная	0,01—0,1
Дюралюминий обезжиренный	1—5
Дюралюминий протравленный и обезжиренный	0,04—0,4
Медь обезжиренная	0,08—0,4
Медь, протравленная и обезжиренная	$6 \cdot 10^{-3}$ — $8 \cdot 10^{-2}$
Хромированные и никелированные поверхности, не обезгаженные прогревом	10^{-3}
Алюминий полированный, обезжиренный в спирте, после длительной откачки	10^{-3}
Эластомер типа витон после длительной откачки	1
Витон после нескольких часов прогрева при 150 °С и длительной откачки	10^{-3}
Фторопласт после длительной откачки	$3 \cdot 10^{-3}$
Резина вакуумная после длительного прогрева под вакуумом при 80 °С и последующей откачки	0,05—0,1

Металлы

Нержавеющая сталь. Одним из лучших материалов для изготовления деталей вакуумных установок является нержавеющая сталь 1X18H10T. Прокат из этой стали беспорист и газонепроницаем даже в очень тонких листах, имеет достаточно хорошую поверхность, устойчивую к коррозии и агрессивным средам, которую можно использовать без дополнительной обработки. Детали из нержавеющей стали легко свариваются между собой; швы получаются с чистой поверхностью и хорошего качества, как правило, газонепроницаемые, что очень важно,

так как в случае сложных установок позволяет существенно уменьшить число трудоемких проверок швов.

Эта сталь достаточно прочна, $\sigma_{вр}=55$ кг/мм², очень пластична, $\delta=40$ %. Прочность и пластичность сохраняются в интервале от гелиевых температур до 800 °С, конечно, при меньших напряжениях. Иногда недостатком нержавеющей стали является ее низкая теплопроводность, которая в несколько раз меньше, чем у малоуглеродистой конструкционной стали. Впрочем, нередко это ее качество является достоинством, особенно в криогенной технике. Коэффициент расширения нержавеющей стали $18 \cdot 10^{-6}$ 1/град, совпадает с коэффициентом расширения меди. Нержавеющая сталь паяют твердыми припоями с применением специальных флюсов и оловянными припоями с ортофосфорной или соляной кислотой.

Нержавеющая сталь 1X18H10T немагнитна и поэтому применяется для изготовления камер ускорителей, масс-спектрометров и других установок с сильными магнитными полями; ее низкая электропроводность позволяет подчас без больших потерь на токи Фуко пропускать магнитное поле до нескольких сот герц, например, при отделении по вакууму ротора электродвигателя от статора.

Нержавеющая сталь — плохой материал для трущихся поверхностей. В таком случае в конструкцию из нержавеющей стали лучше поставить бронзовый вкладыш. При нечастом использовании трущейся пары можно в контакте с нержавеющей сталью использовать либо бронзу, либо хорошо закаленную сталь.

Это замечание особенно существенно при конструировании вентилей, где трущиеся пары плохо смазываются и должны выдерживать подчас многие тысячи циклов перемещения.

Из нержавеющей стали изготавливают наиболее надежные сильфоны, и необходимость их сварки с фланцами является подчас основной причиной использования нержавеющей стали в конструкциях вентилей. Обходить это обстоятельство путем применения менее надежных решений не следует, нужно лишь умело конструировать такие узлы. Примеры конструктивных решений будут даны в следующих параграфах. Малоуглеродистую сталь Ст20 или Ст30 также можно использовать для создания вакуумных систем, если к этому вынуждают экономические соображения или габариты установки. При хорошей, квалифицированной работе сварщиков аппаратура из обычной стали может иметь такие же параметры, как и аппаратура из нержавеющей стали. Следует иметь в виду, что хорошо обезжиренная в вакууме, особенно при прогреве, обычная сталь при вскрытии установки на атмосферу довольно легко ржавеет, поэтому установку лучше держать под вакуумом. Ржавчину нужно удалять скребками, металлической щеткой и пылесосом, хуже — шкуркой (из-за частиц клея) и совсем уж плохо тряпкой с керосином, особенно техническим. Если установка снабжена прогревом, то эти замечания не очень существенны.

Медь, несмотря на отличные вакуумные свойства, редко используют в качестве материала для корпусов вакуумных установок, исключая аноды генераторных ламп. Она мягка, быстро теряет прочность при нагреве, трудно сваривается из-за высокой теплопроводности. Из нее изготавливают большое количество внутренних деталей установок, особенно электровводы. Медные трубки иногда применяют для охлаждения или прогрева корпусов вакуумных установок, хотя их пайка по стали не легче, чем пайка нержавеющей трубок. Иногда внутри вакуумных установок с сильным током медные трубки используют сразу по трем назначениям: для подачи тока, для охлаждения электроконтакта (перехода

медь — графит или медь — вольфрам) и для обеспечения небольшой упругости электрических контактов в целях термокомпенсации. Если такие узлы правильно сконструированы, они работают совершенно надежно. Иногда медь используют как припой для соединения стальных деталей. Такую пайку в вакуумной печи можно выполнять без флюса, если сталь не содержит много хрома.

Очень широко распространены медные уплотняющие прокладки. Обычно их изготавливают из листовой меди, отжигают и травят в кислоте для удаления окиси. Некоторые лаборатории хорошо освоили сварку «встык» медной проволоки и с помощью такой, весьма совершенной, технологии делают прокладки. Преимущество применения медных прокладок — отсутствие газовыделения и возможность сильного прогрева; недостатки — большая сила сжатия фланцев, необходимая для уплотнения, полное отсутствие упругости, заставляющее переносить упругость на фланцы, например с помощью применения тонких стяжных шпилек из высококачественной закаленной стали. Замечание об упругости уплотняющих фланцев очень существенно и поэтому в дальнейшем будет повторено.

Качество и точность уплотняющих поверхностей в случае применения медных прокладок должны быть высокими. Эти поверхности следует обрабатывать после приварки фланцев к установке или делать фланцы так, чтобы деформации при сварке были минимальными. Повторное использование медных прокладок нежелательно, но допустимо после дополнительного отжига и очистки.

Алюминий и его сплавы иногда применяют при изготовлении вакуумной аппаратуры, особенно корпусов больших плоских вакуумных затворов, но в целом алюминиевые сплавы не следует использовать для создания корпусов вакуумных систем там, где применяется сварка. Сварные швы лучше получаются на основе мягких сплавов алюминия, а сварка прочных сплавов часто бывает ненадежной. Естественно, применение фланцев из мягких сплавов алюминия типа АД1 не следует рекомендовать. Выигрыш в массе аппаратуры за счет использования алюминия не так велик из-за малой прочности сварных швов и низкого модуля Юнга, что делает этот материал менее пригодным из-за потери устойчивости под действием внешнего давления. Алюминий достаточно стоек к коррозии, включая такой газ, как фтор. Исключением являются пары и соединения более тяжелых галогенов: хлора и брома, так как хлорид и бромид алюминия весьма летучи. Реагирует алюминий также с некоторыми металлоорганическими соединениями, например с диметилртутью.

Окисная пленка, образующаяся на алюминии, является весьма рыхлой и сильно увеличивает его адсорбционную способность. Прогрев алюминия и его сплавов выше 200 °С под нагрузкой недопустим, так как прочность этих материалов быстро падает с ростом температуры. Мягкие сплавы алюминия очень плохо переносят трение, поэтому соединять конструкции из этих сплавов можно только шпильками или сквозными болтами. Твердые сплавы, такие, как Д-16Т, трение переносят лучше и могут использоваться для корпусов вентилей, фланцев и др. Алюминиевые трубки можно уплотнять с помощью развальцовки торца, однако эту технологию надо хорошо освоить.

Латунь применяют в вакуумной технике в качестве материала сильфонов и для изготовления внутренних деталей, гаек, мелких фланцев. В литературе отмечают высокую упругость пара и парциальное испарение цинка выше 150 °С. При умеренных температурах латунь вполне надежна и очень технологична, она является хорошей парой трения для стальных деталей, легко паяется мягкими припоями, при высокой прочности хорошо проводит тепло и ток и поэтому часто

используется для водоохлаждаемых электрических контактов. Болты из латуни могут способствовать охлаждению закрепляемых деталей.

Латунный припой является одним из основных твердых припоев благодаря его дешевизне, прочности и хорошей смачивающей способности. Им можно соединять детали из меди, стали, нержавеющей стали (со специальным флюсом), вольфрама, молибдена. Тантал латунным припоем не паяется, так же как и серебряным. Молибден и вольфрам гораздо лучше паяются медью и латунию, чем серебряным припоем.

Серебро и золото, конечно же, являются хорошими материалами для пайки и прокладок, однако из-за дороговизны и дефицитности их широко не используют, за исключением пайки металлокерамических электровакуумных приборов серебряным припоем.

Олово и свинец — основные компоненты большинства мягких припоев. Мягкий припой может достаточно надежно соединять детали из меди, латуни, никеля, стали, нержавеющей стали. Пайка производится под флюсом из $ZnCl_2$, а нержавеющей стали с применением H_3PO_4 или HCl . Мягкий припой выдерживает температуру до $+100^\circ C$, к охлаждению до азотных и гелиевых температур пайки этим припоем устойчивы только при использовании согласованных по температурному коэффициенту материалов и тонких кромок спаиваемых внахлест деталей. Лучше, если деталь с меньшим температурным коэффициентом будет внутренней. В качестве материала для прокладок применялся и иногда применяется свинец (проволока, реже лист). Сейчас в основном он вытеснен индием, однако свинцовые прокладки более устойчивы к кратковременному нагреву.

Индий — очень мягкий, устойчивый на воздухе металл с температурой плавления $+156^\circ C$. Применяется как материал для металлических прокладок. Проволоку из индия можно изготовить прямо в лаборатории с помощью выдавливания через калиброванное отверстие. Из чистых использованных уплотнений можно изготавливать проволоку повторно, сплавляя отходы в слитки. Сваривать индиевую проволоку, как медную, не нужно, она при нахлесте и так хорошо уплотняется в месте стыка. Недостатком индиевых уплотнений является чрезмерная мягкость индия. Под нагрузкой или при вибрациях прокладка легко может дать усадку, что приведет к течи. Индием хорошо уплотнять слабые стекла ($NaCl$, KRS и др.), особенно если их приходится охлаждать. Фланцы под индиевые уплотнения лучше делать тонкими и пружинящими, с жестким бортом для выравнивания усилий болтов.

Индий образует с оловом очень легкоплавкую эвтектику. Добавка в чистое олово около 20 % индия дает прочный, легкоплавкий, не окисляющийся и хорошо смачивающий припой.

Титан в лабораторной технике главным образом применяют как имеющий свойства геттера материал для электродов, как рабочее тело «титановых» — ионно-сорбционных насосов, как материал прессованных из порошка геттеров. Используется также как компонент припоя для пайки лейкосапфира и керамики [42]. Для этой цели применяются никелево-титановый и серебряно-титановый припои; некоторые электровакуумные заводы освоили пайку керамики и кварца мягкими припоями с добавкой титана.

Из титана изготавливают электроды некоторых металлокерамических ламп, что позволяет не вводить в них геттеры; коэффициент расширения титана совпадает с коэффициентом расширения алундовой керамики, что также способствует его использованию в металлокерамических приборах.

Вольфрам, молибден, тантал — эти тугоплавкие металлы редко являются материалом вакуумно-плотных объемов. Отечественная промышленность выпускает вакуумно-плотные трубки из «газофазного» вольфрама (прилагательное относится к технологии получения трубок). Технология электронно-лучевой сварки позволяет изготавливать из вольфрама и молибдена термостойкие контейнеры для экспериментальных исследований при высоких температурах. Тигли из монокристаллического вольфрама являются чрезвычайно стойкими к некоторым расплавленным металлам.

В основном вольфрам и молибден используют как материалы для электронагревателей и термоэмиссионных катодов. Они образуют карбиды и летучие окислы и поэтому реагируют не только с O_2 , но и с H_2O , CO_2 . Толстые вольфрамовые нагреватели с током в сотни ампер могут длительно работать в вакууме лучше 10^{-3} мм рт. ст. Вольфрам и молибден не реагируют с азотом и водородом, поэтому их можно использовать в восстановительной атмосфере, в печах для водородного отжига. Молибден обрабатывается резанием. Вольфрам хрупок, проволока из него подчас даже ломается. Однако при температуре красного каления, допустимой в течение короткого времени на воздухе, он становится ковким. Очистить вольфрам можно либо в растворе HF , либо гальванически — в растворе $NaOH$ под током. Тонкие молибденовые листочки (30 мкм) удается впаять в кварц, хотя коэффициенты расширения этих материалов и различны. Эти несогласованные, но достаточно надежные спаи являются основными для дуговых, а также импульсных кварцевых ламп [42]. Изготавливать такие спаи своими силами затруднительно и нецелесообразно. В любой оптической лаборатории достаточно ламп, вышедших из строя, чтобы воспользоваться их электродами.

По термостойкости тантал занимает промежуточное положение между вольфрамом и молибденом. Большим его преимуществом является хорошая обрабатываемость и мягкость. Тантал, в отличие от вольфрама и молибдена, хорошо сваривается точечной сваркой, в то время как вольфрам и молибден удастся сваривать только через никель. Электропроводность тантала ниже, чем у вольфрама и молибдена. Тантал образует нелетучий окисел и поэтому не очищается, как вольфрам и молибден, простым прокаливанием в вакууме. Он реагирует с водородом, что является крупным недостатком, так как не позволяет использовать его в печах с восстановительной атмосферой, даже как материал тепловых экранов.

Молибден и вольфрам хорошо паяются латунным припоем, а также медью (это гораздо лучше, если спай будет нагреваться). Тантал не паяется ни латунным, ни серебряным припоями.

Резина

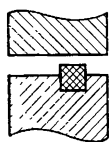
Это целый класс эластомеров, используемых для прокладок вакуумных уплотнений и изготовления гибких шлангов. Большим распространением в отечественной технике пользуются два сорта вакуумной резины: белая и черная, маслостойкая. Уплотняющее давление на резину составляет обычно не более 5 кг/см^2 , в то же время, в отличие от индия, резина сохраняет целостность и не вытекает из пазов при давлениях до 1000 кг/см^2 и более. Обычные сорта резины не следует эксплуатировать при температуре более $+60^\circ\text{C}$; кратковременно она может быть нагрета до 120°C , а в режиме обычного обезгаживания до 80°C .

Резина имеет рыхлую молекулярную структуру и впитывает масло, растворители, газы. Однажды, работая с аргонем при давлении до 5000 атм, автор применил в камере высокого давления тонкий шланг из вакуумной резины. После вскрытия установки оказалось, что шланг увеличился в объеме (!) раза в 2—3, соскочил с патрубков и потом очень долго «приходил в себя», испуская пропитавший его аргон несколько суток. Вакуумная резина довольно хорошо пропускает гелий, в том числе и тот, который используется при поисках течи, и эта ее особенность подчас надолго озадачивает экспериментаторов, ищущих течь, которой нет. Недавно полученная с завода, обычная вакуумная резина сильно пахнет, выделяя сложную смесь углеводов.

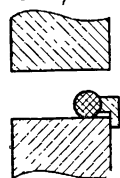
Поэтому свежая резиновая прокладка главного фланца не даст возможности откачать установку до приличного вакуума в первый день. Лучше всего резину поместить целиком в вакуумную камеру и обезгазить при $+90^{\circ}\text{C}$ в течение 10—15 ч [39].

Для этой цели можно воспользоваться стандартным вакуумным сушильным шкафом. Вакуума порядка 10^{-2} мм рт. ст., обеспечиваемого парой форвакуумный насос — угольная ловушка, будет вполне достаточно. При температуре около -30°C обычная резина теряет эластичность, однако если фланцы сделаны пружинящими, а прокладка не толстая, то она может держать вакуум вплоть до азотной температуры. Толстая резиновая прокладка или вакуумный шланг, одетый на оливку, при охлаждении жидким азотом могут треснуть. При использовании резиновых уплотнений лучше всего применять геометрию паз — плоскость, а резину делать выступающей из паза. Геометрия паз — выступ с уплотненной резиной несколько лучше в случае коррозионно-активных газов, но сложнее в изготовлении и требовательнее к постоянству толщины резины. Геометрия паз — плоскость допускает при диаметрах 200 мм и более самоуплотнение без применения стяжных болтов, что облегчает фланец и упрощает работу с установкой типа «колпак». Применяется также неплохое уплотнение плоскость —

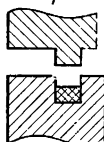
Паз — плоскость



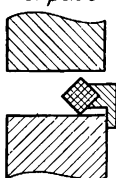
О-образное на оправе



Паз — выступ (для тефлона)



Квадратное на оправе



„Замок“ для небольших диаметров



О-образное в пазу

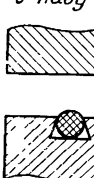


Рис. 5.5. Различные способы расположения резиновых прокладок. Уплотнения нижнего ряда точно удерживают зазор между фланцами

плоскость, причем резина квадратного или круглого профиля удерживается по диаметру специальным кольцевым вкладышем. Различные способы расположения резиновых прокладок показаны на рис. 5.5.

Большим распространением за рубежом пользуется эластомер витон на основе фторированных каучуков. В отечественной технике он также используется все шире, иногда под названием ИРП-2043 [39].

Витон часто выпускают в виде стандартных колец круглого сечения, которые удобно закладывать в паз подходящего профиля и уплотнять по плоскости.

Витон имеет гораздо более низкое газовыделение, чем обычная резина, причем из него, в отличие от резины, выделяются в основном азот, водород, вода и углекислый газ [39]. Витон допускает кратковременный прогрев до $+200^{\circ}\text{C}$ и относительно длительный до $+150^{\circ}\text{C}$. Холодостойкость витона не лучше, чем у обычной резины. Он теряет эластичность уже при небольших отрицательных температурах. Витон жестче, чем резина, и поэтому требует более тщательной обработки пазов и плоскостей для надежного уплотнения.

Очень широкий температурный диапазон применения от -60 до $+200^{\circ}\text{C}$ имеет кремнийорганическая силиконовая резина. Она не менее эластична, чем обычная резина, обладает небольшим газовыделением, но в большей степени пропускает газы внешней атмосферы. Выпускается она в листах, а также в виде непolyмеризованной массы, из которой в формах при $+200^{\circ}\text{C}$ довольно легко изготавливать детали любой конфигурации.

Тефлон

Тефлон — полимер тетрафторэтилена, обладает уникальными физическими и химическими свойствами и заслуженно пользуется репутацией отличного вакуумного материала. Этот материал исключительно химически стоек; на него не действуют никакие кислоты, включая HF, никакие щелочи и растворители. Его можно разрушить только термически: при температуре более 400°C он разлагается с выделением C_2F_4 и небольшого количества CF_4 .

Тефлон пластичен: уже при комнатной температуре его можно прокатывать, а прокатом стане в листы до 1 мм толщиной, а при повышении температуры пластичность возрастает. Поэтому тефлоновые уплотнения иногда дают течь после нагрева — при нагреве он расширяется и пластически деформируется, вытекая в зазоры, а при охлаждении сжимается и освобождает зазор между уплотняемыми деталями. В отличие от резины и витона тефлон лучше ставить в уплотнения замкнутого типа, например плоский зуб в паз, а если предполагаются циклы нагрев — охлаждение, то следует обеспечить упругость фланцев. Если все это сделано, то тефлоновые уплотнения надежно работают много лет. Газовыделение из тефлона очень мало, и, учитывая малую площадь прокладок, незаметно на фоне газовыделения стенок камеры. Тефлон, по сравнению с другими вакуумными материалами, обладает сравнительно малым ϵ , малым коэффициентом диэлектрических потерь и высоким пробивным напряжением.

Тефлон наощупь скользкий и имеет аномально низкий коэффициент сухого трения. Это позволяет использовать его для уплотнения подвижных штоков, где он применяется совместно с резиной, лучше силиконовой. Примеры этих конструкций будут приведены в следующем параграфе. Применять тефлон для вводов быстрого вращения нельзя — он шелушится и разрушается при большой скорости трущейся детали.

Оргстекло

Этот распространенный изоляционный материал нечасто применяется для деталей, расположенных в вакууме. Свежеприготовленные детали сильно гязят, но гажение постепенно прекращается, и автору удавалось получать вакуум 10^{-6} мм рт. ст. в трубе из оргстекла, которая использовалась в качестве ускорительной и выдерживала 500 кВ при длине 28 см. Оргстекло характерно тем, что при электрическом пробое по стенке изолятора не обугливается. Большой $\operatorname{tg} \delta$ не позволяет использовать его на высоких частотах, что отличает этот материал от полистирола. При длительном пребывании в вакууме, особенно под нагрузкой, например в качестве смотрового окна, оргстекло покрывается сеткой трещин.

В пластинку из оргстекла можно легко «вварить» целый ряд медных проволок, сделав довольно надежный групповой вакуумный электроввод. Для этого сверлятся отверстия чуть меньшего диаметра, чем провод, а провод вводится в них горячим, прямо из-под жала паяльника. Впрочем, сейчас промышленность изготавливает стеклянные групповые вакуумные электровводы.

Стекло, кварц

Стекло является, видимо, старейшим вакуумным материалом. Его прозрачность и чистота, химическая стойкость и отсутствие запаха говорят о том, что газовыделение должно быть очень мало. На самом деле на поверхности стекла адсорбируется до 50 мономолекулярных слоев газа или до 2 л·мкм рт. ст./см² [39]. В основном стекло сорбирует пары воды и, в меньшей степени, CO₂ и N₂. При прогреве стекла в целях обезгаживания большая часть поверхностно сорбированных газов выделяется при 200 °C за 2—3 мин. Однако скорость диффузии растворенных в стекле газов весьма мала, и поэтому обезгазить стекло полностью нельзя — обезгаживается только внутренний слой толщиной несколько десятков микрон. При обезгаживании отечественных сортов стекла выделяется 0,3—0,6 л·мкм рт. ст./см² сорбированных газов.

Особое место среди различных сортов стекла занимает кварцевое стекло — плавный кварц SiO₂. Он имеет ничтожный коэффициент расширения, более высокую твердость и химическую стойкость. В то же время кварц больше, чем другие стекла, пропускает через себя легкие газы: гелий, водород, неон (табл. 5.2).

Таблица 5.2. Проницаемость плавленного прозрачного кварцевого стекла по отношению к гелию, неону, водороду в зависимости от температуры [43]

Температура, °C	He	Ne	H ₂	Температура, °C	He	Ne	H ₂
150	0,73	—	—	600	16,4	0,28	1,43
200	1,39	—	0,022	700	21,9	0,42	2,52
300	3,15	—	0,099	800	28,5	0,81	4,25
400	6,15	—	0,37	900	36,2	1,18	6,4
500	10,4	—	—	1000	45,4	1,63	10,0

Единица проницаемости равна проницаемости пластинки толщиной 1 мм и сечением 1 см², которая при разности давлений 1 мм рт. ст. пропускает

10^{-10} см³ газа, находящегося при нормальных условиях (0 °С, 760 мм рт. ст.).

Согласно данным табл. 5.2, экстраполированным к комнатной температуре и в соответствии с опытом автора, гелий за год примерно наполовину уходит из кварцевой ампулы диаметром 20 мм и толщиной стенки 1 мм. Таким образом, наполненные гелием приборы, предназначенные для длительной эксплуатации и хранения, из кварцевого стекла делать не следует. Особенно нужно помнить о газопроницаемости стекла к гелию при изготовлении стеклянных отпаянных дьюаров для жидкого гелия. Диффузия гелия внутрь полости этих дьюаров, естественно, выводит их из строя. По данным [43], пирекс также весьма «прозрачен» для гелия, а менее всего пропускает этот газ свинцово-боратное стекло.

Кварцевое стекло, благодаря очень низкому коэффициенту расширения, хорошо переносит большие перепады температур. Это позволяет изготавливать из него такие изделия, как мощные дуговые и импульсные лампы. Его высокая прозрачность в широком, в том числе инфракрасном диапазоне (до 5 мкм), уменьшает радиационный нагрев стенок лампы, а прочность кварцевого стекла до 800 °С не уменьшается.

Верхняя рабочая температура кварцевого стекла 800 °С. Изделия сложного профиля обязательно нужно отжечь для снятия внутренних напряжений. Это делается при 1100 °С в течение короткого времени — не более 20—30 мин, иначе кварцевое стекло может «расстекловаться» — перейти в мелкокристаллическое состояние с потерей прочности и прозрачности. Приобретя некоторые навыки, можно отжигать кварцевые изделия прямо в пламени горелки.

Кварцевое стекло легко выдерживает перепад температур в 200 °С и поэтому позволяет изготавливать двух- и трехстенные коаксиальные конструкции, охлаждаемые жидким азотом, например, для СО-, CF₄-лазеров и т. п.

Умение работать со стеклянной аппаратурой часто позволяет проводить эксперимент быстро и с небольшими затратами. Иногда от стеклянных конструкций отказываются, не умея впаять в них оптически точные окна, особенно кварцевые. Автору пришлось научиться это делать и, видимо, стоит описать технологию впаивки стеклянных и кварцевых окон. Впаиваемое стекло доводится по диаметру до свободной скользящей посадки по подходящей стеклянной трубе (крон впаивается в стекло № 23). В эту трубу внахлест впаивается труба меньшего диаметра так, чтобы стекло могло свободно лечь на предварительно притертый внутренний торец. После этого тщательно очищенное, в том числе по торцам, оптическое стекло укладывается в образовавшееся гнездо, а вся конструкция, установленная на вращающийся столик, медленно прогревается до температуры начала отжига стекла +350 °С. Когда прогрев закончен, пламенем горелки достаточно быстро размягчают участки верхней трубы напротив торца стекла и соединяют трубу с торцом нажимом графитовой палочки. Закончив обход круга, вновь прогревают весь спай и тут же кладут в печь на отжиг. Герметичность проверяют с помощью искрового течеискателя.

Из-за летучести SiO₂ вблизи температуры размягчения для впаивки кварцевых стекол приходится применять несколько более сложную технологию (рис. 5.6). Отличие состоит в том, что для полного предотвращения опыления кварцевого стекла применяется защита из второй кварцевой трубки, вложенной или впаянной в основную с зазором не менее 1 мм. На рисунке показан вариант, когда обращенная в вакуум часть основной трубы защищена постоянно впаянной трубкой меньшего диаметра (торец притерт к плоскости, в месте впаивания оставлено отверстие для откачки полости). Внешняя часть стекла защищается

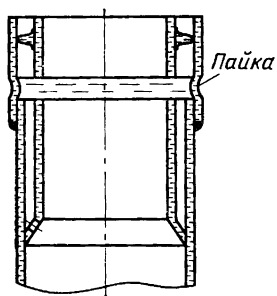


Рис. 5.6. Впайка кварцевых окон

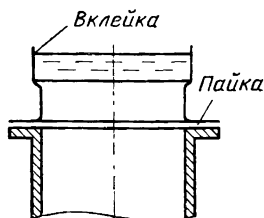


Рис. 5.7. Вклеивание оптического окна в переходный манжет

временно устанавливаемой вставкой, центрируемой небольшими выступами. Эта вставка после пайки убирается. Пайку кварца ведут после хорошего разогрева всего контура шва, вдавливая участки трубы в торец стекла графитовой палочкой. После окончания пропайки шва нужно весь шов хорошо прогреть для снятия напряжений.

Если оптическое окно впаять нельзя, например если это CaF_2 , BaF_2 и др., то стекло можно приклеить к притертому торцу патрубка. Окончательную притирку торца нужно выполнять самому, не полагаясь на стеклодув. Чем тоньше отформованный торец и впаиваемое стекло и чем ближе их температурные коэффициенты, тем большие перепады температур выдержит клеенное соединение. Если сильный нагрев не предполагается, то можно для приклейки воспользоваться эпоксидной смолой. Приклеенные непосредственно к стеклу оптические окна плохо переносят охлаждение до температуры жидкого азота из-за значительной разницы в коэффициентах расширения и растрескивания клея. Разницу в коэффициентах расширения можно обезвредить, применяя переходные манжеты из тонкой меди, не точеные, а изготовленные выдавливанием, толщиной 0,2—0,3 мм (рис. 5.7). Если клей не выдерживает охлаждения, то, нанеся на торец стекла и на кольцевую зону присоединяемого оптического окна методом напыления последовательно слой титана и серебра, можно затем выполнить пайку всего узла, например, оловянно-индиевым легкоплавким припоем. Разумеется, нагрев деталей нужно производить очень аккуратно, лучше в специально изготовленной кольцевой печи, соединения получаются абсолютно герметичные, прочные и долговечные.

Слабые гигроскопичные окна из KBr или NaCl часто требуют переполировки, поэтому их лучше клеить на фланец с помощью плицина, лучше черного. Стекло и притертый фланец нужно нагревать и охлаждать медленно. Такие окна, во избежание помутнения во влажной атмосфере, хорошо держать постоянно теплыми, градусом на десять теплее окружающей среды. Для этого достаточно закрепить около оптического окна постоянно включенные в сеть 36 В угольные сопротивления мощностью до 5 Вт.

Спаи стекла с металлом и керамикой подробно описаны в литературе, например в [42—44]. Физикам без особой надобности не следует экспериментировать с какой-либо новой технологией, как правило, эти спаи могут хорошо выполнить только профессионалы. Окна из лейкосапфира — чистого монокристал-

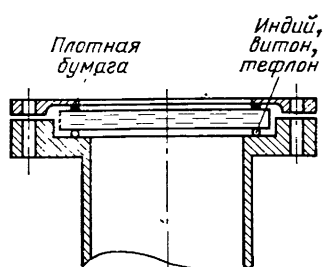


Рис. 5.8. Уплотнение окна в металлической оправе

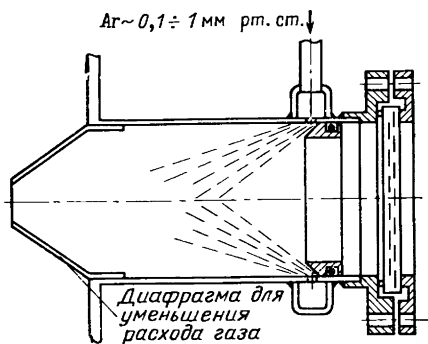


Рис. 5.9. Защита окна от напыления с помощью потока инертного газа

лического Al_2O_3 — могут вплавляться в металлические оправки с помощью серебряно-титанового и никель-титанового припоев. Эти пайки выполняются в вакуумных печах, и при хорошем исполнении они очень надежны. Крупные несогласованные спаи стекла с медью получить очень трудно, поэтому можно использовать такие спаи от вышедших из строя мощных генераторных и модуляторных ламп. Для спаивания между собой различных сортов стекла с разными коэффициентами расширения, особенно спаев кварц — стекло, применяют переходные стекла. Изготовление таких переходов и их правильная термообработка, из-за разной температуры отжига применяемых стекол, — большое искусство. Не следует производить пайку этих переходов ближе чем на два — три диаметра к несогласованному спаю. Ни в коем случае нельзя нагревать переход пламенем горелки. Некоторые организации в СССР изготавливают переходы кварц — стекло достаточно большого диаметра, однако использовать их нужно лишь в крайнем случае из-за недостаточной прочности и постоянной опасности возникновения трещин. Использование в кварцевой аппаратуре несогласованных вводов из молибденовой фольги гораздо надежнее.

Уплотнять различные окна, монтируемые в металлическую вакуумную аппаратуру, приходится очень часто. Наиболее просто уплотнять твердые окна из кварца и стекла. Если позволяет диаметр, то лучше уплотняющую прокладку располагать немного отступая от края (рис. 5.8); она не должна быть широкой. Прижимающий фланец должен нажимать на стекло также не по самому краю, а напротив прокладки. Прижимающий выступ на фланце следует притереть или наклеить на него кольцо из плотной бумаги. Не следует уплотняемое окно на всю толщину топить в углубление, так как его потом очень сложно оттуда извлечь, а выгоды от такого расположения никакой.

Смотровые окна для мощных электропечей могут сильно нагреться от поглощения инфракрасного излучения и даже треснуть. В этом случае кварц гораздо надежнее. Часто окна нужно защищать от напыления непрозрачных пленок со стороны вакуума. Если установка допускает ухудшение вакуума по инертному газу, то такая защита обеспечивается сдуванием потока оседающих атомов потоком инертного газа (аргона) (рис. 5.9). Очень небольшой расход инертного газа и ухудшение вакуума до 10^{-5} мм рт. ст. по аргону при скорости откачки 1000 л/с ведут к полной защите окна диаметром 40—50 мм. Уплотнение легко

ломающихся окон из монокристаллов типа BaF_2 и др. нужно производить осторожно, равномерно по кругу и медленно подтягивая уплотняющие винты. Лучше при затяжке винтов постоянно проверять вакуум и прекращать затяжку сразу после прекращения натечки воздуха. Следует помнить, что резиноподобные пластики обладают значительной остаточной деформацией, и поэтому быстрая затяжка болтов вызывает гораздо большие усилия в уплотняемом окне, чем медленная, при одной и той же окончательной деформации прокладки.

Если окна прогреваются или охлаждаются, то нужно обеспечить плавное изменение температуры по всему объему окна. Наиболее устойчивы к тепловым ударам кварц и лейкосапфир; теплопроводность последнего при низких температурах возрастает, превышая теплопроводность меди.

Керамика

В качестве границы раздела воздух — вакуум используется не очень много видов керамики. Изготовление керамических изделий — дело трудоемкое, поэтому их вместо стекла применяют чаще всего при значительных тепловых и механических нагрузках. Наиболее прочной и термостойкой керамикой является алундовая, в основном состоящая из Al_2O_3 с добавками от 1 до 10 % других окислов, иногда SiO_2 , для лучшей спекаемости. Алундовая керамика металлизруется пастой на основе порошка молибдена с помощью спекания при 1700°C в водородной атмосфере или вакууме. Металлизированные участки керамики хорошо паяются серебряным припоем (в вакуумных печах). Таким путем изготавливаются мощные тиратроны, трубки электронных ускорителей, СВЧ-лампы. Керамика, содержащая значительное количество SiO_2 (обыкновенный фарфор), гораздо менее термостойка, но прочна, химически устойчива, доступна и поэтому находит достаточно широкое применение. Керамические кольца и трубки используются в качестве электрических изоляторов, химических реакторов в плазмохимии при проведении реакций в СВЧ-разряде. Из отдельных керамических колец, чередующихся с металлическими электродами, склеивают трубки высоковольтных ускорителей.

Из окиси бериллия, обладающей очень высокой теплопроводностью и термостойкостью, изготавливают такие ответственные вакуумные изделия, как трубки мощных аргоновых лазеров. Керамика, содержащая мало SiO_2 в своем составе, меньше гидролизует с поверхности и легче обезгаживается, чем стекло. Трубки ускорителей и другие высоковольтные вакуумные изоляторы, как правило, должны быть очищены множеством пробоев, прежде чем они выйдут на номинальное напряжение. При пробое в вакууме может выделяться большая энергия $W = CU^2/2$, и керамический изолятор может разрушиться. Если для повышения электрической прочности наружной части трубки применяется сжатый газ (азот, SF_6 , фреон-12), то при разгерметизации трубки этот газ может проникнуть изпод прочного наружного колпака в вакуумную систему, разорвать насос и вызвать другие неприятности. В этом случае иногда предусматривают автоматическое отсечение наружных вакуумных частей ускорителя от внутренних с помощью прочного затвора или ставят на вакуумную систему предохранительный клапан.

Как правило, при конструировании вакуумных систем, содержащих керамику, следует рассчитывать на производимые промышленностью керамические изделия, полуфабрикаты, детали. Индивидуальные заказы на керамические изделия заводы принимают неохотно, а налаживать производство керамики в лабо-

ратории хотя и возможно, но весьма сложно и долго. Отечественная промышленность производит много типов алундовых изоляторов, впаиваемых в металлические патрубки. Можно приобрести керамические детали мощных тиратронов большого размера с нанесенным металлическим пояском, готовым к пайке. Никелированные металлические пояски паяются не только серебряным, но также и мягким припоем, что позволяет собирать крупные узлы, не помещающиеся в вакуумную печь, но такая пайка не всегда получается вакуумно-плотной. Из-за несогласованности коэффициентов расширения пайку керамических изделий следует производить к тонким медным патрубкам или к тонким листам меди по торцу, нельзя паять прямо к массивному металлу, кроме титана и молибдена.

5.3. СКОРОСТЬ ОТКАЧКИ ЧЕРЕЗ КОММУНИКАЦИИ

Достигнутый вакуум есть результат равновесия между скоростью откачки и скоростью натекания и газовыделения, поэтому скорость откачки, обычно измеряемая в литрах в секунду, подчас более важна, чем предельно достижимый данным насосом вакуум.

В вакуумной технике реализуются все три вида течения газа: турбулентное, ламинарное и молекулярное. Турбулентное течение мы количественно рассматривать не будем, так как оно существует лишь в первые минуты откачки.

При первичной откачке значительных объемов форвакуумный насос может выбросить в выхлоп много масла. Обычно на выходной патрубок одевают достаточно большой фильтр — уловитель масла, заполненный упругой металлической стружкой или сеткой с ячейкой около 1 мм, но не войлоком или фетром. Выхлоп насоса совершенно обязательно должен быть отведен в вытяжку или на улицу, подальше от окон.

После падения давления до нескольких миллиметров ртутного столба относительная скорость откачки уменьшается, так как течение газа становится ламинарным. Для потока массы газа через некоторое сечение справедливо соотношение

$$Q = PdV/dt,$$

где Q — массовый поток газа, мм рт. ст. · л/с; P — давление, мм рт. ст.; V — объем газа, ежесекундно пересекающий выбранное сечение, л.

Если поток Q линейно зависит от разности давлений между частями системы, а это верно для вязкостного (ламинарного) и молекулярного течений, то можно ввести понятие проводимости коммуникации $C = Q/\Delta P$, л/с. Проводимость C , л/с, длинного трубопровода в области вязкостного течения можно рассчитать по формуле [41]

$$C = \frac{\pi}{128} \frac{D^4}{\eta^i} \bar{P},$$

где D — диаметр трубопровода, см; η — вязкость газа; l — длина трубопровода, см; \bar{P} — среднее давление, мм рт. ст.

Для азота эту формулу можно привести с числовым коэффициентом:

$$C_{N_2} = 188D^3\bar{P}/l.$$

Вязкостный режим реализуется при $\lambda < D/100$. Зависимость C от среднего давления имеет определенный физический смысл. Как мы знаем из общего курса физики, вязкость газа не зависит от давления, поэтому при любом P скорость газа в коммуникации будет пропорциональна ΔP ; если P и ΔP совпадают, то скорость газа пропорциональна P , а массовый поток P^2 . Таким образом, при вязкостном режиме течения чем меньше давление, тем меньше и скорость откачки. Приведем некоторые сведения об относительной проводимости различных газов [41]:

Газ	Воздух	O ₂	H ₂	He	Ar	CO ₂	H ₂ O	Hg
C/C_{N_2}	0,96	0,86	2	0,89	0,79	1,2	1,9	0,75

Из-за малого размера атомов у гелия большая длина свободного пробега, а это увеличивает вязкость по сравнению с водородом.

Эти данные верны лишь при вязкостном течении, в диапазоне давлений $pD > 0,5$.

При $\lambda > D/3$, т. е. когда длина пробега молекул сравнима с диаметром трассы или больше диаметра вакуумной трассы, основной режим откачки вакуумных систем — молекулярный. Для вычисления проводимости, л/с, длинной круглой трубы при молекулярном режиме можно воспользоваться формулой

$$C_l = 3,8 (T/M)^{1/2} D^3/l,$$

где T — температура, К; M — молекулярная масса газа;
для азота при 20 °С

$$C_{lN_2} = 12,3D^3/l.$$

Эта формула не учитывает влияние концов трубы и дает бесконечную проводимость при нулевой длине, что, конечно, неверно. Более точная формула выглядит так:

$$C = C_l / \left(1 + \frac{4}{3} \frac{D}{l} \right);$$

для азота

$$C_{N_2} = 12,3D^3 / \left(l + \frac{4}{3} D \right).$$

Проводимость отверстия (диафрагмы) нулевой длины, л/с:

$$C = 3,64 (T/M)^{1/2} S;$$

для азота

$$C_{N_2} = 11,8 S,$$

где S — площадь диафрагмы, см².

Проводимость трубопровода кольцеобразного сечения (характерного для ловушки) при молекулярном потоке для воздуха при 20°C равна, л/с [38]:

$$C = 12,1K_1(D_1 - D_2)^2(D_1 + D_2)/L.$$

Значения коэффициента K_1 :

D_2/D_1	0	0,26	0,5	0,7	0,96
K_1	1	1,07	1,15	1,25	1,67

Проводимость длинного щелеобразного трубопровода $a \gg b$ для воздуха при 20°C, л/с [45]:

$$C = 30,9K_2ab^2/L.$$

Значения коэффициента K_2 :

L/b	0,1	0,2	0,4	0,8	1	2	3	4	10
K_2	0,036	0,068	0,13	0,22	0,26	0,4	0,52	0,67	0,94

Таким образом, для откачки со скоростью 1000 л/с диафрагма даже нулевой длины должна быть диаметром не меньше 10 см, а ведь элементы вакуумной трассы включены последовательно, поэтому при конечной длине диаметр должен быть существенно больше. Суммарную проводимость трассы C можно вычислить, если известны парциальные проводимости последовательно включенных элементов:

$$1/C = 1/C_1 + 1/C_2 + \dots + 1/C_n;$$

в число проводимостей C_i , естественно, включается и производительность насоса.

Самая распространенная ошибка при конструировании вакуумных систем — сильное уменьшение скорости откачки трассой, затвором, ловушкой по сравнению со скоростью откачки насосом. Потом жалуются на плохой насос, меняют в нем обычное масло на экзотическое, жгут это масло, а хорошего вакуума не получают. Производительность трассы высокого вакуума нужно уметь оценивать.

Подсчет проводимости азотной ловушки или охлаждаемой угловой решетки провести несколько труднее. Следует, однако, иметь в виду, во-первых, что проводимость падает как \sqrt{T} , и, во-вторых, при заданной площади поперечного сечения трассы ее проводимость максимальна именно при круглом сечении. Кольцевое или щелевое сечение дает меньшую проводимость. Более подробно все эти вопросы изложены в [38, 46]. Из изложенного следует, что внешний диаметр азотной ловушки должен быть существенно больше, чем диаметр насоса или затвора.

Большую роль играет правильный выбор диаметра форвакуумной трассы. Ее длина подчас достигает десяти и более метров. Иногда приходится наблюдать,

как неопытные экспериментаторы откачивают свою систему протянутым через всю лабораторию резиновым шлангом. Для малых насосов при длине трассы 2—3 м можно рекомендовать нержавеющую или медную трубку диаметром 15—20 мм, заканчивающуюся оливками и соединенную с форвакуумным и паромасляным насосами короткими отрезками резинового шланга. Для больших насосов от резинового шланга придется отказаться, амортизируя трассу одним или лучше двумя перпендикулярно расположенными сильфонами (один сильфон пропускает крутильные колебания). Если предполагается работать в режиме постоянного натекания, например при изучении истечения в вакуум неконденсирующихся газов, то форвакуумную трассу также необходимо рассчитать, учитывая максимальное давление на выходе высоковакуумного насоса, остаточное давление форвакуумного насоса и необходимый массовый расход.

В современной экспериментальной технике при проведении газодинамических экспериментов, связанных с истечением газа из сопл и т. п., выбросы газа в вакуум подчас столь велики, что обеспечить постоянную откачку не представляется возможным. Тогда выбирают путь «квазинепрерывной», кратковременной работы, т. е. с помощью быстродействующего затвора или рвущейся диафрагмы резко включают истечение газа в вакуумный объем как можно больших размеров и работают до допустимой порчи вакуума в нем или до прихода отраженной от его стенок ударной волны к месту истечения.

Нужно обратить внимание экспериментаторов на обеспечение хорошей проводимости трассы, ведущей к манометрической лампе. Подчас об этом не заботятся, даже ставят на этой трассе вентиль, что очень нежелательно, а потом скорость получения вакуума часто оказывается просто скоростью обезгаживания коммуникаций манометрической лампы. Стеклоянные лампы в ответственных установках надо защищать от возможных ударов и разрушения с помощью колпаков, а не ставить вентили, до которых все равно добежать не успеешь. Нельзя допускать, чтобы полимерные прокладки, уплотняющие ввод лампы, газили в ее малопроизводительную трассу — они должны газить в большой объем. Присоединение лампы с помощью куска вакуумного шланга недопустимо (кроме термопарных ламп в малоответственных случаях). Лучше всего припаивать «гребенку» из двух ионизационных и одной термопарной лампы к коваровому патрубку внутренним диаметром 12 мм, а этот патрубок уплотнять с помощью медной или тефлоновой прокладки.

5.4. ЭЛЕМЕНТЫ ВАКУУМНОЙ АРМАТУРЫ

В литературе описано множество изделий вакуумной техники. Автор мог бы добавить к этому множеству еще пару — другую «своих», быть может, в чем-то даже оригинальных конструкций. Но задача этой книги — дать представление о принципах, а не набор решений, и если уж и предлагать решения, то в небольшом количестве и достаточно проверенные. В вакуумной технике, помимо особо сложных задач, оригинальность, как правило, есть следствие незнания давно отработанных решений.

Разъемные уплотнения

Эти уплотнения встречаются в самых разнообразных ситуациях. Если вакуум высокий, то лучше применять малогазящие прокладки, но металлические прокладки применять сложнее и их следует ставить только при получении сверхвысокого вакуума, ниже 10^{-7} мм рт. ст., либо при высоких требованиях к температурному режиму. Хорошо обезгаженные резиновые прокладки не препятствуют получению вакуума до 10^{-7} мм рт. ст.; тем более удовлетворительны витоновые и тефлоновые прокладки. При диаметре проходного отверстия до 20 мм для соединения элементов можно пользоваться накидными гайками. При большем диаметре следует применять фланцы. Иногда, когда трудно точно рассчитать положение несимметричной конструкции при монтаже, применяют накидные вращающиеся фланцы, позволяющие уплотнить соединение в любом положении поворота вдоль оси. Стоит сформулировать несколько правил при конструировании разъемных уплотнений.

1. Температурное расширение прокладки пропорционально ее толщине. Не применяйте слишком толстые прокладки.

2. Не применяйте слишком широкие прокладки, это увеличивает необходимую силу стягивания фланцев, уменьшает способность прокладки переносить охлаждение.

3. Не применяйте при резиновых уплотнениях систему выступ в паз, а пользуйтесь уплотнением паз — плоскость.

4. Стремитесь обеспечить постоянное упругое стягивание фланца, особенно при металлической прокладке. Болты есть упругие элементы (особенно проходные). Не делайте их слишком большого диаметра, но и не ставьте их мало. Уделяйте внимание температурному коэффициенту расширения болтов, который при правильном выборе может скомпенсировать тепловое расширение прокладки. Например, уплотнение стальных фланцев, стянутое болтами из латуни или бериллиевой бронзы при тефлоновой прокладке, может быть хорошо скомпенсировано в широком температурном интервале.

5. При использовании уплотнений из металлической фольги обязательно предусматривайте на фланце центрирующие посадочные проточки, придающие ему правильное положение до соприкосновения с прокладкой.

6. Приваривать фланцы к корпусам следует через тонкую кромку для уменьшения их деформации. Проточка фланцев после приварки — дело трудоемкое.

Автор приводит некоторое количество схематических чертежей уплотнений с достаточно подробными подрисовочными подписями.

На рис. 5.10 показаны варианты уплотнений небольшого диаметра, до 25 мм, стягиваемые накидной гайкой. При хорошем доступе к месту затяжки (возможности применить хорошие ключи) уплотнения типа «а» можно использовать и с металлическими прокладками ромбического профиля. Эти уплотнения являются наиболее надежными. Уплотнение типа «б» дешевле, но может считаться надежным только при хорошо отлаженной развальцовке труб.

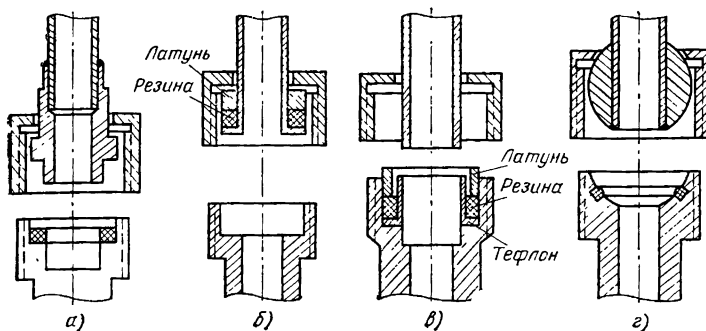


Рис. 5.10. Варианты уплотнений небольшого диаметра

Уплотнение «в» незаменимо для стеклянных трубок (толстых и прочных). При расслаблении гайки стеклянная деталь легко извлекается. Затяжку этого уплотнения надо производить осторожно, желательно при контроле вакуума. На рис. 5.10, г показано шаровое (с прокладкой) уплотнение, допускающее значительную угловую неопределенность. Задний торец нельзя делать плоским! На рис. 5.11, а показано соединение двух фланцев на резиновой или тефлоновой прокладке, а на рис. 5.11, б — то же соединение, но с вращающимся накидным фланцем, позволяющим изменять в расслабленном состоянии расположение уплотняемых патрубков. При проектировании установки не забудьте фланец с прокладкой сделать нижним, а если расположение плоскости фланцев вертикальное, то канавку нужно сделать слегка конусной, типа «ласточкин хвост» для удержания прокладки. Сравнительно простая форма фланцев, предназначенных для уплотнения листовой медной прокладкой, показана на рис. 5.12. Делать напротив зуба впадину в нижнем фланце можно, но не обязательно. Трудоемкость

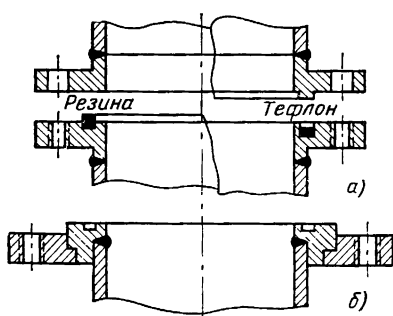


Рис. 5.11. Соединение фланцев с помощью резины или тефлона:

а — уплотнение фланцев резиновой прокладкой (паз — плоскость) или тефлоновой (паз — выступ); б — накидной вращающийся фланец

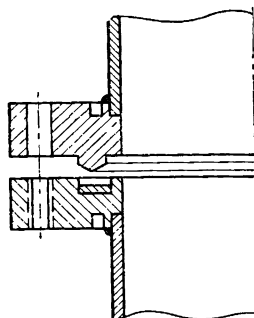


Рис. 5.12. Уплотнение большого диаметра с помощью медной листовой прокладки (толщиной 0,5—0,2 мм).

Болты для увеличения упругости используют нетолстые, из хорошей стали; фланцы массивные, зуб с углом при вершине 120° , слегка притупленный

и требования к соосности возрастают, а результат достигается тот же. Зуб не должен быть слишком острым.

Автор не берется рекомендовать оптимальную форму фланцев для уплотнений с индиевой проволокой. При горизонтальном расположении проволоку можно укладывать прямо между плоскостями, соединив стык внахлест. Можно также применять полукруглую канавку с глубиной $d/2$ (проволоки) или чуть больше. При вертикальном расположении плоскости фланцев прокладку следует утопить больше, чем на половину диаметра, а вместо нахлеста применить хорошо подогнанный косой срез. Тогда прокладка не будет выпадать при монтаже. Можно рекомендовать сдавливать индиевую прокладку так, чтобы она растекалась до значительной ширины, иначе, хотя вакуумная плотность и будет достигнута, устойчивость прокладки к циклическим нагрузкам при откачке и вибрациям будет невысокой.

Вентили и затворы

Уплотнение вентиля и затвора рассчитано на многократное действие. Кроме того, вентили и затворы имеют подчас весьма сложную кинематику, которая должна соответствовать требованиям вакуумной гигиены. Совершенно очевидно, что эти изделия промышленность должна производить точно так же, как и насосы, в достаточном ассортименте и количестве, однако пока приобрести хорошие вентили и затворы очень трудно. Может быть, замечание автора хоть в какой-то мере будет способствовать преодолению этого досадного пробела.

Вентили и затворы часто играют лишь роль «триггерного» элемента, т. е. от них требуется только поддержание положений «закрыто» и «открыто», но бывает необходимо с их помощью и регулировать проводимость вакуумной трассы, обычно при небольших диаметрах.

С точки зрения автора, не следует видеть принципиальную разницу между сальфонным и сальниковым исполнением вентиля. Сальники достаточно надежны как в вакуумной технике, так и в атмосфере агрессивных газов. Кстати сказать, в технике высоких давлений сальник — единственный тип уплотнения подвижного элемента. При использовании резино-тефлонового уплотнения с силиконовой резиной сальниковое уплотнение вполне надежно до $+100^{\circ}\text{C}$, а с пружинящим поджимом и больше. Недостаток сальника — значительное трение; его можно уменьшить, сведя к минимуму диаметр уплотнения. Выступление автора в защиту сальников не означает, что с его точки зрения они лучше сальфонов. Просто ими тоже можно пользоваться. Некоторые зарубежные фирмы изготавливают затворы с выдвигающимися на десятки сантиметров штоками приводов, работающие вполне надежно, однако все же следует в случае сальника предпочесть вариант вращения, а не продольного перемещения. Необходимость прогрева, особенно до 400°C , сильно усложняет конструирование надежных вентилях, и особенно затворов большого диаметра.

Вентиль удлиняет вакуумную трассу. Это незаметно на форвакууме, но в случае трасс высокого вакуума с большим диаметром именно этой причиной был вызван переход от вентилях к затворам.

При конструировании этого вакуумного оборудования встречается много моментов, упускаемых начинающими конструкторами и исследователями. Попытаемся изложить некоторые принципы конструирования.

Во-первых, определяют проходной диаметр и исходя из требований вакуумной гигиены — температурный режим работы. Затем выбирают подходящую пару кляп — седло, по возможности не прибегая к чисто металлическому варианту. Проходной диаметр и материал уплотнения позволяют определить силу давления кляпа на седло, а это, в свою очередь, диктует требования к приводу и коэффициенту редукции — перемещению кляпа за один оборот ручного управляющего устройства. При больших диаметрах приблизительное определение этого параметра подчас ведет к грубым ошибкам. Применение очень мощных штоков резко увеличивает трение, и манипулирование мощным затвором превращается в тяжелую физическую работу. Поэтому все резьбы и штоки следует делать возможно меньшего диаметра и с максимально крупной резьбой. Применение легкого изнашивающейся при ограниченной смазке мелкой резьбы совершенно недопустимо.

Выбрав схему и определив основные параметры кинематики, стараются оптимально скомпоновать всю конструкцию.

При этом следует учитывать:

- 1) технологичность изготовления корпуса, включая впайку седла в корпус, если она необходима;
- 2) удобство приварки сильфона к подвижной части (кляпу) и неподвижному фланцу;
- 3) устойчивость системы к возможным небольшим перекосам;
- 4) длительность сохранения смазки в узлах трения; узлы трения не обязательно должны прогреваться до температуры прогрева вакуумной части вентиля;
- 5) удобство ремонта и замены подвижной части вентиля без извлечения его корпуса из установки;
- 6) температурную согласованность всей конструкции.

Некоторые промышленные конструкции вентилялей имеют защиту от чрезмерного задавливания кляпа чересчур усердным персоналом. Создаваемые для своих целей вентили такой защиты иметь, по-видимому, не будут. Поэтому правильное пользование вентилями имеет почти такое же значение, как и хорошее их конструирование.

На рис. 5.17—5.19 представлено несколько достаточно проверенных конструкций вакуумных вентилялей небольшого проходного диаметра 3—50 мм. При большем диаметре следует переходить к затворам.

Последняя рекомендация относится к непрогреваемым системам. В случае прогреваемых систем разница между вентилем и затвором не очень заметна, так как при жестких уплотнениях необходима мощная кинематика, что и определяет габариты таких конструкций. Если установка прогревается до высокой температуры, более 150 °С, то самое простое — не ставить на главную трассу ни

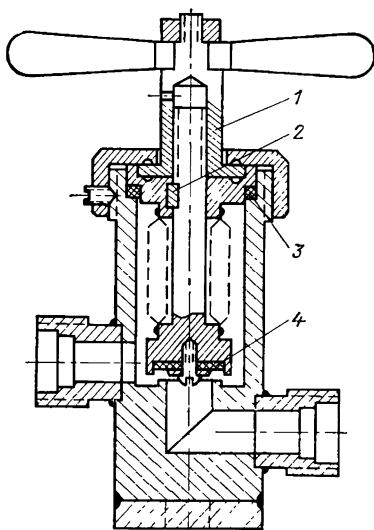


Рис. 5.13. Конструкция вентиля небольшого проходного диаметра:

1 — управляющая муфта (резьба левая); 2 — шпонка; 3 — прокладка (витон, тефлон); 4 — уплотнение кляпа (витон, тефлон)

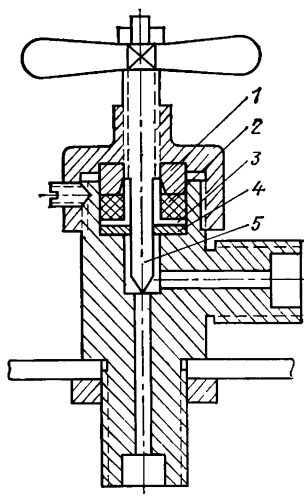


Рис. 5.14. Конструкция небольшого вентиля с сальниковым резино-тефლოновым уплотнением и вращающимся кляпом:

1 — нажимной вкладыш (латунь); 2 — обжимающая прокладка (резина); 3 — уплотняющая антифрикционная манжета (тефлон); 4 — шайба (закаленная сталь); 5 — кляп вентиля (закаленный и полированный)

вентили, ни затворы, а использовать турбомолекулярные или иные безмасляные насосы. Если же из-за каких-то соображений нельзя принять этот простой выход, например у термоядерных установок требуется после тщательного обезгаживания напуск рабочей смеси, а насосы при этом необходимо отсечь, то приходится конструировать вентили с медными уплотнениями диаметром до 200 мм и более. Автор такие конструкции видел; впечатление они производят внушительное, и конструировать их должны опытные специалисты, так что здесь мы таких конструкций касаться не будем [41]. Во всяком случае, если делать такие конструкции, вряд ли можно обойтись без большой водородной печи для пайки медных седел или кляпов в восстановительной атмосфере.

Если читатель интересуется всем разнообразием конструкций вакуумной арматуры, то можно обратиться к монографии [44], хотя, по мнению автора, там весьма некритично собраны как удачные, так и неудачные конструкции.

Корпуса вентиля и затворов имеют сложную форму. Уменьшить их массу и удешевить изготовление можно переходом от цельнофрезерованных к сварным, и особенно к литым изделиям. Вакуумно-плотное стальное и дюралевое литье имеют непростую технологию, и освоить ее может только завод. Поэтому здесь мы приводим чертежи вентиля с цельными или сварными корпусами.

На рис. 5.13 показана конструкция вентиля небольшого проходного сечения 10—20 мм, очень хорошо зарекомендовавшая себя в процессе многолетней эксплуатации значительных партий изделий. Достаточно мощный механизм перемещения кляпа позволяет изготавливать эту конструкцию с различными уплотнениями, вплоть до пары медь—сталь (седло медное, впаиваемое в нержавеющую сталь оловом, кляп стальной конический). Для того чтобы вентиль открывался в привычную—левую сторону, резьба на штоке кляпа должна быть левая. На рис. 5.13 изображен вариант с тефлоновым уплотнением. Он допускает длительный прогрев до 100 °С, не требуя подтяжки уплотнений после остывания. Лучше всего смазывать механизм подачи кляпа графитовой смазкой, сохраняющейся длительное время. Этот тип вентиля больше всего подходит для форвакуумных коммуникаций небольших и средних установок, для стендов приготовления и дозирования газовых смесей, в том числе агрессивных. При использовании сильфона из нержавеющей стали посадочным диаметром 16 мм этот вентиль выдерживает «под сильфон» давление до 100 ат, хотя его рабочее давление не должно быть больше 20—30 ат. В случае разгерметизации сильфона истечение агрессивных газов или натечка в вакуум происходят через большое гидравлическое сопротивление резьбы, что уменьшает неприятные последствия такой аварии. Вариант вентиля с уплотнением медь—сталь стабильнее сохраняет заданную малую проводимость и может применяться для достаточно тонкого дозирования. Чтобы кляп вентиля не заклинивался в закрытом состоянии, угол его конуса (от оси) делают не менее 30°. «Игольчатые» вентили очень тонкого регулирования с подачей кляпа без вращения обычно быстро начинают заклинивать, что затрудняет манипулирование, а иногда и опасно для установок. В этом случае лучше воспользоваться сальниковой конструкцией с вращающимся штоком—кляпом (рис. 5.14). Эта конструкция обладает минимальным люфтом, свободна от залипания; рабочая часть кляпа закаливается и очень чисто обрабатывается—шлифуется и слегка полируется. Корпус и седло изготовлены из обычной или из нержавеющей стали. Пояс штока, проходящий через резино-тефлоновое уплотнение, достаточно чисто полируется в направлении трения—поперек образующей. Этот вентиль выдерживает давление до 1000 ат с любой стороны.

При необходимости обеспечить большой проходной диаметр почти цельный корпус типа изображенного на рис. 5.13 оказывается слишком массивным и тяжелым. В этом случае можно применить вентиль с облегченной сварной конструкцией корпуса (рис. 5.15). Для уменьшения трения при закрывании вентиля здесь использована кольцевая канавка, заполненная шариками, однако это не обязательно. Для того чтобы смазка дольше сохранялась на резьбе, предусмотрен канал, выравнивающий давление под сильфоном с атмосферным. Как и в случае с вариантом рис. 5.13, если авария сильфона может представить значительную опасность (агрессивные газы), то этот канал лучше не делать или запрессо-

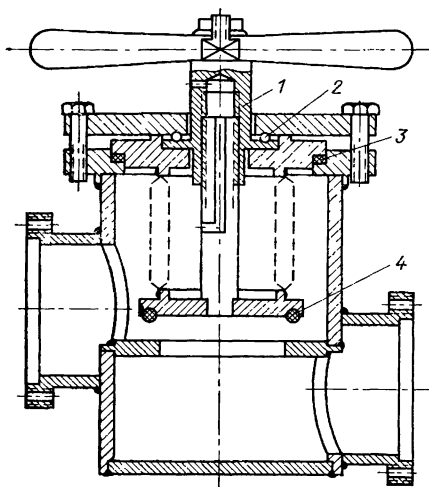


Рис. 5.15. Вентиль среднего проходного диаметра с облегченным корпусом:

1 — управляющая муфта (резьба левая);
2 — стальные шарики; 3 — прокладка (витон, тефлон); 4 — уплотнение кляпа (витон в пазу «ласточки хвост»)

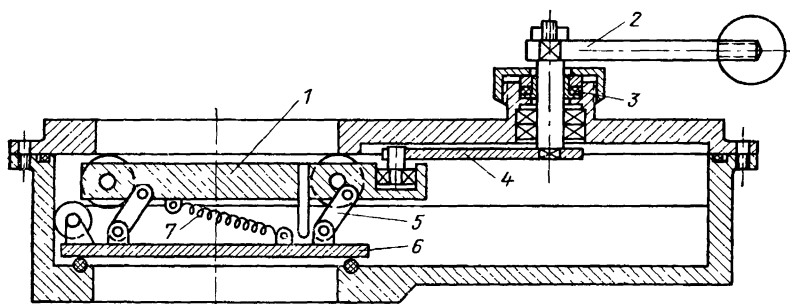


Рис. 5.16. Плоский вакуумный затвор с откатным кляпом

вать в него пробку с очень небольшим пазом для увеличения гидравлического сопротивления.

При проходном диаметре более 60—80 мм вентили обычного типа весьма громоздки, а общая эффективная длина их внутренней трассы становится сравнимой с длиной коммуникаций высокого вакуума. Поэтому при большем диаметре предпочтительнее использовать затворы, особенно плоские, с откатным запирающим устройством. Затворов такого и других типов также разработано много (рис. 5.16).

Внутри корпуса затвора, по боковым вытяжкам, свободно катается на четырех шариковых подшипниках каретка 1. Она перемещается вращением рукоятки 2 через резино-тефловое уплотнение 3 с помощью рычага 4 (изготовленным из хорошей стали и закаленным). К каретке подвешена на серьгах 5 заслонка 6. Дойдя до упора, притянутая в верхнее положение пружиной 7 заслонка начинает перемещаться вниз, выдавливаемая выпрямляющимися серьгами. Положение «закрыто» соответствует полностью выпрямленным и даже слегка перешедшим для устойчивости через вертикаль серьгам. В таком затворе в качестве прокладок можно применять только резину и витон. При использовании затвора этой конструкции существуют две сложности: обеспечить перемещение ка-

ретки без больших люфтов и перекосов (давление привода несимметрично) и, главное, обеспечить равномерный и оптимальный нажим кляпа на седло. Этого можно добиваться либо высокой точностью расчета и изготовления, либо, что проще, введением регулирующих элементов, изменяющих длину серег 5.

Регулирование необходимо производить в сборе, а вся конструкция должна быть достаточно прочной. Корпус затвора можно делать из жесткого дюралюминия Д16Т, но в крышку надо врезать закаленные накладки, препятствующие образованию ямок в местах давления шарикоподшипников. Конечно, затвор такого типа допускает прогрев не более чем до $+80^{\circ}\text{C}$, при использовании резиновых прокладок, и поэтому может применяться до 10^{-7} мм рт. ст.

В установках сверхвысокого вакуума нужно обходиться или без затворов большого диаметра, или делать их, как описано в [41].

При создании сложных стендов манипуляции с многочисленными вентилями отнимают много времени, а вероятность ошибок быстро нарастает. В таких случаях, и во многих ситуациях, например, связанных с техникой безопасности, желательно или даже необходимо иметь дистанционно и автоматически управляемые вентили. Такие конструкции разработаны и их выпускают некоторые зарубежные фирмы и отечественные предприятия. В частности, вакуумные агрегаты, выпускаемые в СССР, практически все оснащены моторным приводом затвора, который легко подключить к автоматике. В то же время малогабаритные вентили с автоматическим приводом встречаются пока редко. Для дистанционного управления вентилями используют три способа — электромагнитный, пневматический и моторный. Первые два способа могут обеспечить только крайние положения вентиля, а более сложный — моторный, может обеспечить и плавное регулирование потока. В случае применения электромагнитного способа прежде всего нужно отбросить всякие приблизительные оценки и честно посчитать силу, которую способен развить магнит. В закрытом состоянии на кляп действует сила пружины, необходимая для деформации уплотнения. В полностью открытом состоянии, которое должен удерживать магнит, пружина сжата еще сильнее, к ее силе добавляется сила сжатого сильфона; в крупных ventилях необходимо также учитывать силу атмосферного давления. Электромагнит начинает работать при зазоре в несколько миллиметров и кончает при нулевом зазоре, что сильно сказывается на сопротивлении магнитного контура и магнитном потоке.

Приведем здесь простой расчет силы притяжения магнитных полюсов, который может оказаться полезным при конструировании разнообразных магнитных систем.

Сила притяжения двух параллельных ферромагнитных поверхностей, между которыми существует однородное магнитное поле, равна [47]:

$$F = 4,055 \cdot 10^{-8} B^2 S,$$

где F — сила притяжения, кг; B — магнитная индукция в зазоре, Гс; S — площадь притягивающихся поверхностей, см².

Поскольку индукцию в зазоре больше 1,5 Тл получить трудно, то в расчете на 1 см² сила притяжения полюсов при насыщении железа (независимо от размера зазора) будет около 9 кг.

Теперь оценим магнитодвижущую силу, необходимую для достижения в зазоре магнитного контура заданной индукции B . Напряженность магнитного поля, Э, внутри соленоида длиной l равна $H=0,4\pi nI$, где n — число витков на 1 см длины; I — ток, А. Для замкнутой катушки ту же формулу можно записать в виде $H=0,4\pi NI/l$, где N — полное число витков катушки; l — ее длина, см. Магнитная индукция B в соленоиде с ферромагнитным сердечником будет равна $B=0,4\pi\mu NI/l$, где μ — магнитная проницаемость. Эта формула верна только в предположении независимости μ от H , на самом деле μ уменьшается при приближении к насыщению, но для расчета поля в зазорах это не ведет к большим ошибкам. При наличии в сердечнике длиной l и площадью S_l зазора (или двух зазоров) длиной δ и площадью S_δ сопротивление магнитного контура увеличится по отношению к его сопротивлению без зазора в отношении

$$(l/\mu S_l + \delta/S_\delta)/(l/\mu S_l).$$

Соответственно упадет магнитная индукция в сердечнике, а значение магнитной индукции в зазоре, если его площадь не равна площади сечения сердечника, кроме того, должно быть умножено на отношение S_l/S_δ . В результате получим

$$B = 0,4\pi \frac{NI}{l} \left(\frac{l/\mu S_l}{l/\mu S_l + \delta/S_\delta} \right) \frac{S_l}{S_\delta}.$$

Если магнитопровод по отношению к зазору обладает малым сопротивлением ($\mu \rightarrow \infty$), что обычно близко к истине при $\mu \sim 10^3$, то эта формула сильно упрощается:

$$B = 0,4\pi NI/\delta.$$

Получается, что поле в зазоре равно полю в длинном соленоиде, где на каждый участок длиной δ намотано N витков. Следовательно, вдали от области насыщения магнитопровода, если надо увеличить силу притяжения полюсов, выгоднее увеличить их площадь магнитными накладками. В то же время вблизи насыщения, когда μ мало, последние две формулы использовать нельзя, а применение магнитных накладок приводит к прямо противоположному результату: они уменьшают силу притяжения полюсов, поскольку индукция B в зазоре будет уменьшаться обратно пропорционально площади накладок, а сила притяжения на единицу площади пропорциональна B^2 .

При $\mu \sim 10^3$, ширине зазора несколько миллиметров и средней длине магнитного контура 10—20 см основную часть магнитного сопротивления представляет зазор, поэтому при постоянном рабочем токе в момент включения сила будет мала, а при исчезновении зазора ток и соответственно мощность будут избыточными по отношению к индукции насыщения. Поэтому практически все магнитные системы клапанов и прочих приводов со «схлопывающимся» зазором сейчас делают с переменной силой тока — большой в момент включения и сильно уменьшающейся по мере уменьшения зазора. Достигается это достаточно просто: ток используется переменный, а индуктивность обмотки магнита падает по мере увеличения зазора, следовательно, большой стартовый ток при большом

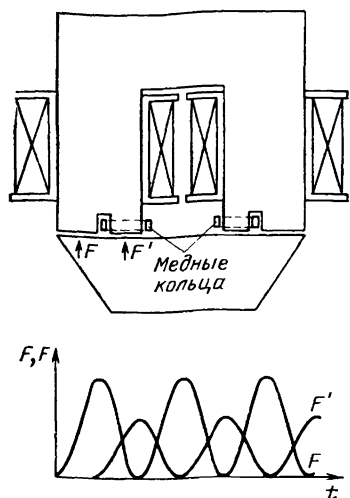


Рис. 5.17. Магнитный привод, управляемый переменным током. Сила F обусловлена главным магнитным потоком; F' — потоком, создаваемым короткозамкнутыми кольцами

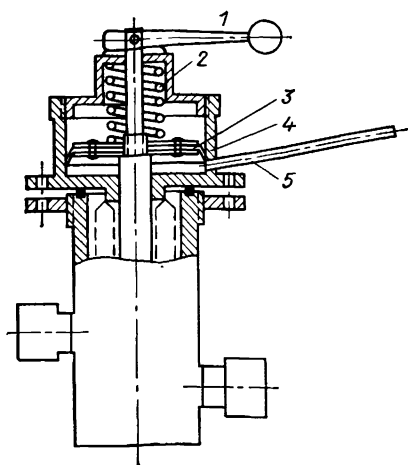


Рис. 5.18. Вентиль с пневматическим управлением:

1 — рукоятка ручного управления; 2 — пружина; 3 — самоуплотняющийся поршень (тефлоновая юбка между металлическими шайбами); 4 — цилиндр (внутренняя поверхность полирована); 5 — трасса подачи сжатого воздуха

зазоре резко падает при его исчезновении. Важным моментом является включение короткозамкнутых витков (медных колец) на часть сечения сердечника около зазора (рис. 5.17). Если их не использовать, то в момент прохождения тока через нуль якорь будет «отлипает» от статора, что приведет к неприятному гудению. Это иногда наблюдается у электрических контакторов, если полюса их магнитной системы плохо пришлифованы или в зазор попала грязь. Естественно, делать магнитную систему на 50 Гц можно только из листовой трансформаторной стали.

Иногда можно воспользоваться готовой системой электрических контакторов — пускателей, изготавливаемых у нас в достаточном количестве и ассортименте, или витыми сердечниками телевизионных трансформаторов.

Электромагниты хороши для открывания вентиля с не очень большим проходным сечением и мягким кляпом. Для более мощных конструкций, требующих большой силы давления на кляп, следует предпочесть пневматическое управление. Скорости перемещения при этом управлении уменьшаются, а силу давления кляпа на седло можно получить почти любую. При не очень большой силе давления на кляп (10—30 кг) можно использовать ту же одностороннюю кинематическую схему, что и при электрическом управлении: закрывает вентиль пружина, а пневматика работает против пружины. На рис. 5.18 показан вентиль с тефлоновым самоуплотняющимся поршнем. Такие вентили успешно эксплуатировались в течение нескольких лет, совершив не менее 10^4 циклов. Для управления этим вентилем необходим электропневмопреобразователь.

Быстродействующие клапаны

Использование метода разрывающихся диафрагм очень замедляет проведение экспериментов с газовыми потоками в импульсном режиме. Приходится сильно усложнять диагностическую аппаратуру, чтобы за один пуск снять какую-то зависимость. Работа в частотном режиме и просто ускорение экспериментов с импульсными потоками газа требуют создания быстродействующих клапанов, открывающих, например, сопло на время порядка миллисекунды.

Автору известны три подхода к этой задаче. Самый простой из них — открывать клапан электромагнитом и закрывать силой возвратных пружин, т. е. попросту увеличить быстродействие вентиля с электромагнитным управлением. Рассмотрим, как это сделать. Ясно, что нужно, во-первых, максимально ограничить перемещение клапана, во-вторых, по-возможности облегчить всю подвижную часть и, в-третьих, создать значительное, быстро возрастающее до максимума, притяжение управляющего электромагнита. Как уже говорилось, притяжение между стальными полюсами магнитной системы не превышает 10 кг/см^2 . Значит, нужно максимально увеличить площадь магнитной системы, по-возможности не увеличивая пропорционально массу ее подвижной части. Это можно сделать только при максимально тонкой подвижной части, а поскольку в ней замыкается магнитный поток статора, надо использовать большое количество чередующихся магнитных полюсов. Для примера на рис. 5.19 показаны две магнитных системы с одинаковой площадью полюсов: одна — двухполюсная, другая — шестиполюсная. Сразу видно, что якорь шестиполюсной системы существенно легче, к тому же она создает более равномерное распределение силы вдоль системы. Очень сильно увеличивать число полюсов нельзя, так как зазор между ними должен быть много больше зазора между полюсами и якорем; кроме того, закрепление довольно тонкого шихтованного пакета в подвижной системе также затруднительно. На рис. 5.20 показан разрез клапана с магнитным управ-

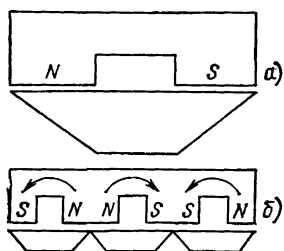


Рис. 5.19. Двухполюсная (а) и шестиполюсная (б) системы управления быстродействующим клапаном

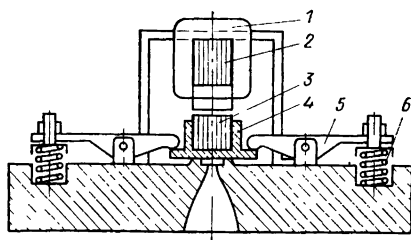
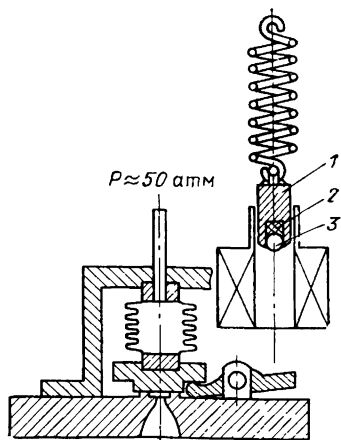


Рис. 5.20. Быстродействующий клапан с электромагнитным управлением

Рис. 5.21. Быстродействующий клапан с электромагнитным управлением и ударным механизмом

лением. Примем толщину пакета якоря 3 равной 4 мм, что эквивалентно толщине полюсов 2, равной 8 мм, а скважность расположения полюсов, видимо, может быть близка к $2/3 \approx 0,7$. Тогда на каждый квадратный сантиметр полюса придется масса якорного железа, равная 4,5 г. Пусть эта масса удвоится за счет кляпа, ребер жесткости и оборачивающих коромысел 5, тогда силе притяжения якоря 10 кг будет соответствовать масса, равная примерно 10 г. Половину силы мы должны «списать» на противодействие пружинам возврата 5, так как полное время открытия будет оптимальным в случае равенства скоростей открытия и закрытия клапана, а если требуется только максимальная скорость открытия клапана, то пружины возврата могут быть слабее.



В итоге, если рассматривать вариант с минимальным полным временем открытия, ускорение якоря и кляпа может составить 500 g. Перемещение кляпа на один миллиметр при таком ускорении произойдет за 0,6—0,7 мс, и полное время открытия будет около одной миллисекунды. Уменьшение открываемого зазора вдвое приведет к уменьшению времени только в $\sqrt{2}$ раз, то же можно сказать и об увеличении силы, и об уменьшении массы якоря. Поэтому время порядка 10^{-3} с можно считать характерным временем открытия клапанов с электромагнитным управлением.

Второй подход к конструктивному решению задачи быстрого открывания клапана состоит в использовании ударного механизма. Большими недостатками магнитного клапана являются: небольшая сила притяжения на квадратный сантиметр, не соответствующая прочности конструкции и наличие шихтованного, пластинчатого элемента — якоря, который не является силовой конструкцией: его самого нужно удерживать. Увеличить силу вплоть до прочностного предела можно с помощью ударного механизма. Некоторое неудобство состоит в том, что клапан нужно открывать вверх, а удар наносить удобнее тоже сверху. На рис. 5.21 схематически показано, как можно преодолеть это затруднение. Удар наносится синхронно двумя ударниками по оборачивающим коромыслам, другая сторона которых подбрасывает клапан. В такой конструкции можно реализовать всю прочность материалов и при той же массе, что и в случае магнитного варианта, получить эффективную силу 200—300 кг/см², а может быть и больше. Это даст сокращение времени открытия клапана в несколько раз. Для того чтобы и закрыть его так же быстро, нужна пружина с силой около 100 кг/см² и небольшой массой, приведенной к подвижному концу. Пневматическая пружина,

показанная на рис. 5.21, не обязательно является оптимальным вариантом, так как при достаточной жесткости (всего 1 мм хода) примерно такую силу от не очень массивной стальной пружины получить вполне можно. Нужно позаботиться, чтобы ударники не были массивными, так как это помешает быстрому обратному ходу. Механизм приведения ударников в действие может быть различным: пневматическим, или, что физикам привычнее, электромагнитным, как это и показано на рис. 5.21, конечно, условно. Автору пришлось самому сконструировать подобный механизм (с пневматическим ударником), и работал он вполне хорошо. Нужно только сразу исключить нержавеющую сталь как материал силовых элементов таких конструкций: она очень плохо переносит удары, легко расклепывается и гнется. В силовых элементах нужно использовать сталь типа 40Х, 65Г и другие хорошо закаливающиеся стали, причем детали обязательно подвергать закалке с отпуском при 350—400 °С.

Третий подход к созданию быстродействующих клапанов состоит в использовании диамагнетизма проводника в импульсном магнитном поле. Проще говоря, пластинка из хорошего проводника, если рядом с ней импульсно включается магнитное поле, силовые линии которого перпендикулярны ее поверхности, стремится за счет токов Фуко вытолкнуться из зоны магнитного поля. Магнитное поле в безжелезной импульсной катушке может быть и больше двух тесла, так что диамагнитная сила может быть в несколько раз больше силы притяжения стальных магнитных полюсов при более низком электрическом КПД. Автор не знаком с расчетом подобных систем и поэтому не может точно оценить область их применения. Скорее всего, они хороши при очень небольшой частоте, когда КПД не имеет значения.

Автору известна одна экзотическая разработка, когда клапан поворотной конструкции открывался с помощью стрельбы по коромыслу из малокалиберной винтовки. Этот клапан обеспечивал взятие проб на масс-анализ за время 10^{-4} с и работал совершенно удовлетворительно. Удивительнее всего то, что он был признан законным даже представителями службы техники безопасности. Так что иногда надо дерзать...

Для быстрого открытия узких щелей применяется также пьезокерамика, изменяющая длину при приложении электрического поля. Этот привод может действовать очень быстро, но перемещение будет составлять всего несколько микрон.

Рассчитать момент максимального открытия клапана по отношению к сигналу запуска достаточно трудно и вряд ли необходимо. Гораздо проще установить на клапане датчик положения, способный отобразить на экране осциллографа временную диаграмму открытия и дать сигнал другим, ведомым устройствам; такой датчик должен быть малочувствительным к помехам со стороны магнитного привода.

Уплотнение быстродействующих клапанов должно быть узким и малоупругим, для того чтобы обеспечить достаточный поток газа при минимальном открытии. Если не требуется абсолютная герметичность, то можно употреблять чисто металлические хорошо притертые поверхности: плоскость по плоскости, сфера по конусу или, как у клапана двигателя, конус по конусу с узким пояском касания. Если клапан работает редко и герметичность должна быть полная, то достаточно хорошо работает витоновая прокладка, аккуратно уложенная в паз, подпрессованная в нем, закрепленная от выпадения и отшлифованная так, чтобы над металлом выступало не более 0,5 мм.

Кинематические вводы

Есть два способа организации перемещения и вращения деталей в вакуумных камерах, камерах газовых лазеров и др. Можно передать перемещение непосредственно механически через уплотнение или сильфон, а можно косвенно: воспроизвести перемещение с помощью магнитных муфт, сельсинов и других управляемых электрически или гидравлически систем. Желая ознакомиться со всем многообразием способов перемещения деталей в вакууме и их конструктивного осуществления могут обратиться к [38, 39, 44, 48]. Здесь мы рассмотрим наиболее часто встречающиеся задачи и хорошо проверенные решения.

Ввод медленного вращения применяется для управления заслонками и т. п., а также для организации постоянного вращения при очень небольшой скорости — один оборот в несколько секунд. Самый простой вариант такого ввода: резино-тефлоновое уплотнение (рис. 5.22). Вращающийся шток следует полировать в направлении скольжения (точность его размеров не существенна по сравнению с качеством полировки). Следует предусматривать шайбы, защелкивающиеся кольца или другие элементы, предотвращающие продольное перемещение штока. Если, наоборот, нужно обеспечить продольное перемещение, то это же уплотнение пригодно для такой задачи, хотя и в меньшей степени. При использовании силиконовой резины уплотнение работоспособно от $+200$ (кратковременно) до -60°C . Резиновую прокладку в этом уплотнении не следует делать высокой, ее ширина должна быть соизмерима с высотой — иначе ее внутренняя часть при затяжке не напрягается, а затем позволяет уплотнению заметно ослабнуть. Нажимное кольцо не должно плотно зажимать все сечение резиновой прокладки. Лучше, если оно по внутреннему диаметру будет свободно на $1\text{--}2$ мм. Это освобождает у прокладки термокомпенсирующий объем и уменьшает градиент давления на шток, что важно в случае стеклянных трубок.

Вводы быстрого вращения нужно стремиться делать минимально возможного диаметра. Если в вакууме установлен на подшипниках ротор, не стремитесь вывести наружу конец вала диаметром, равным внутреннему диаметру подшипника. Раскрутить большой ротор можно закаленным штоком диаметром, например, 2 мм. Такой подход резко облегчает задачу ввода быстро вращающегося штока. Трение тефлона по металлу или трение по сухой резине здесь недопустимы. Можно использовать три подхода: трение смазанной резины, трение графит —

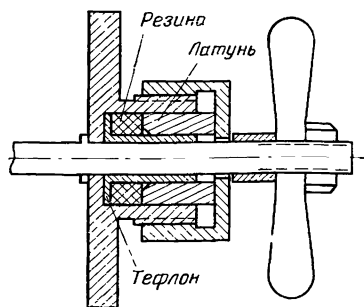


Рис. 5.22. Ввод медленного вращения с резино-тефлоновым уплотнением

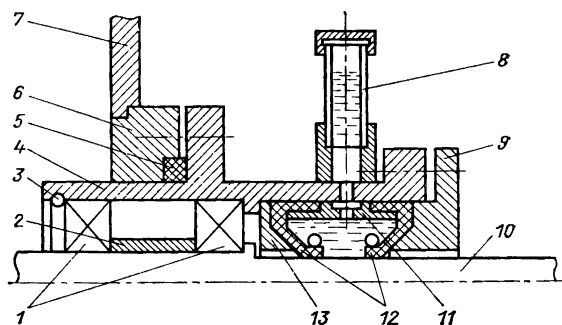


Рис. 5.23. Уплотнение вращающегося штока с резиновыми манжетами:

1 — подшипники; 2 — дистанционирующая втулка; 3 — фиксирующее кольцо; 4 — корпус ввода; 5 — прокладка; 6 — фланец камеры; 7 — стенка камеры; 8 — стеклянный патрубок; 9 — фланец, уплотняющий резиновые манжеты; 10 — вал; 11 — дистанционирующая прокладка между манжетами; 12 — резиновые манжеты с пружинными кольцами; 13 — подкладка под внутреннюю манжету

металл и лабиринтное уплотнение с дифференциальной откачкой. Трение смазанного вала о резиновую манжету широко применяется в технике (рис. 5.23). Так уплотняются, в частности, валы форвакуумных насосов. Сорта резины применяют специальные, поэтому лучше всего приобрести партию промышленных резиновых уплотнений подходящего диаметра, а потом уже конструировать под эти изделия нужный узел. Если уплотняется малый диаметр, то придется изготавливать резиновую манжету самим. Лучше всего отформовать ее из отпускаемой заводами непластифицированной резиномассы. Легче всего уплотнить таким образом ввод, пропущенный в камеру вертикально сверху. В этом случае масло наливается в воронкообразную чашку над уплотнением. Так еще в 50-х годах американские исследователи вращали подвешенные в вакууме большие роторы нейтронных селекторов, получая окружную скорость до 500 м/с. Недостатком масляных уплотнений является постоянное, хотя и незначительное проникновение масла в вакуумную систему. Если вакуум нужен только для уменьшения трения больших дисков, то это несущественно, так как здесь достаточно форвакуума. Если же вакуум требуется высокий, то проникновение масла через уплотнение и наличие в вакуумном объеме подшипников являются серьезной помехой.

Корпуса подшипников придется охлаждать, а сами подшипники заполнять малогазующей смазкой и закрывать плотным лабиринтным уплотнением (бесконтактным). При больших оборотах (10 тыс. об./мин и более) консистентная смазка не обеспечивает большой ресурс работы, лучше использовать подачу масла фитилем или небольшим масляным насосом. Применение дифференциальной откачки зоны подшипника даст возможность работать в высоком вакууме.

На рис. 5.24 показано простое контактное уплотнение сухого трения медь (латунь) — графит, позволяющее свести натечку воздуха к очень небольшому значению и избежать появления масла в системе. Если проходной шток тща-

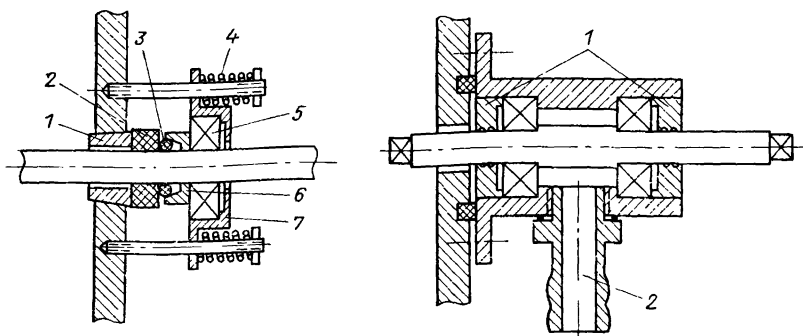


Рис. 5.24. Сухое уплотнение вращающегося вала с парой медь — графит:

1 — неподвижный вкладыш (медь, бронза); 2 — уплотняющая шайба (скользящая посадка по валу, меднографит); 3 — уплотняющее и нажимное резиновое кольцо; 4 — нажимные пружины; 5 — подшипник (скользящая посадка по валу); 6 — фигурная шайба; 7 — обойма нажимного подшипника

Рис. 5.25. Лабиринтное уплотнение вала с промежуточной откачкой:

1 — лабиринтное уплотнение (бронза, тefлоз, меднографит); 2 — промежуточная откачка (отдельным насосом)

тельно изготовлен и установлен и в вакууме, и в воздухе на безлюфтные опоры (радиально-упорные подшипники с нажимной пружиной), то биения штока могут быть не более 0,01 мм. Это позволяет изготовить сухое лабиринтное уплотнение с очень малым зазором и с помощью дифференциальной откачки (отдельным форвакуумным насосом) получить в форкамере достаточное разрежение. Статоры лабиринтного уплотнения можно изготовить в виде вкладышей из плотного меднографита от электрошетонок. Тогда их можно выполнить с нулевым зазором, так как касание вала не опасно (рис. 5.25).

Существует достаточно остроумный сильфонный ввод вращения. Его применяют редко, опыта конструирования такого ввода у автора нет. В [44] на рис. 5.10, б это уплотнение изображено неточно. Сильфон, работающий на изгиб, меньше всего деформируется, если его изгиб происходит как бы вокруг его геометрического центра.

Это условие учтено на рис. 5.26, попытки «выпрямить» эксцентрик и сделать его концевую часть параллельной оси привели бы к S-образному, вдвое более напряженному состоянию сильфона. Это замечание имеет более общий характер. Надо так располагать канематику перемещения, чтобы деформации сильфонов при нужном эффекте были бы минимальными.

Не все вводы вращения позволяют поддерживать вакуум в отключенной системе, что является недостатком. Еще одно замечание: нержавеющая сталь 1Х18Н10Т как пара трения годится разве что в резьбах под шток вентиля. Всегда лучше изготовить бронзовый вкладыш, чем заменять изношенный узел.

5.5. ЦИРКУЛЯЦИЯ ГАЗОВ В ГЕРМЕТИЧНЫХ КОНТУРАХ

Развитие некоторых областей техники, в том числе мощных газовых лазеров, потребовало создания довольно мощных циркуляционных потоков разнообразных газов, иногда весьма агрессивных.

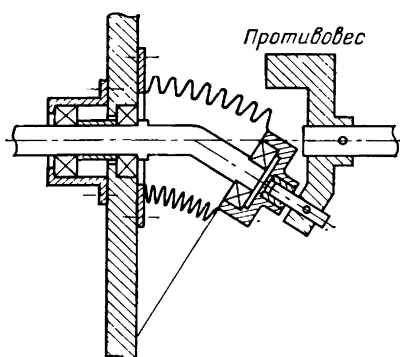


Рис. 5.26. Ввод вращения с использованием эксцентрика и сильфона

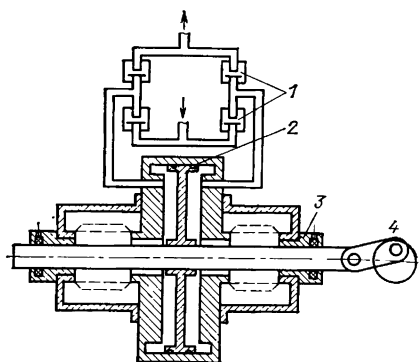


Рис. 5.27. Бесконтактный поршневой компрессор:

1 — прыгающие пластинчатые клапаны; 2 — поршень (зазор между поршнем и цилиндром $\sim 0,05$ мм); 3 — скользящий подшипник (бронза), поперечное положение подшипника регулируется; 4 — привод

Мощные CO_2 - и CO -лазеры в настоящее время трудно представить без громоздких компрессоров и холодильников; к тому же приближается техника эксимерных лазеров.

Иногда, например, в некоторых CO - или SF_4 -лазерах циркуляционный контур должен поддерживаться при очень низкой температуре. Возникающие здесь задачи для современной техники не являются слишком сложными, но экономное их решение требует хорошей инженерной культуры.

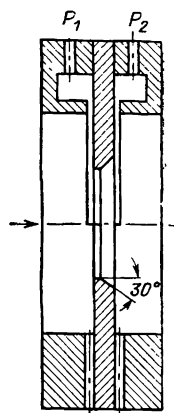
Если гидравлическое сопротивление контура относительно велико, то следует применять компрессор с большой степенью сжатия. Простейшими выпускаемыми промышленностью компрессорами такого типа являются двухроторные насосы ДВН (насосы Рутса) производительностью от 5 до 1500 л/с (см. § 5.8).

Недостатком роторного компрессора является наличие резино-масляного уплотнения вала. При высоких требованиях к чистоте газов или наличию реагирующих с маслом и резиной агрессивных газов, например фтора, лучше такие уплотнения не применять.

В таких системах хорошо зарекомендовал себя бесконтактный поршневой компрессор с прыгающими клапанами (рис. 5.27). Поршень этого компрессора ходит на штоке внутри цилиндра с зазором около 0,05 мм на сторону. Четыре клапана работают с использованием небольшой пружины и силы тяжести. Компрессор при диаметре поршня 200 мм и ходе 20 мм обеспечивает производительность до 4 л/с. Мощность привода и двигателя зависит от давления и необходимой степени сжатия. Компрессор гигиеничен и бесшумен, ресурс сильфонов позволил в лаборатории автора эксплуатировать такой компрессор несколько лет без переборки с наработкой не менее десяти тысяч часов. Недостатком компрессора

Рис. 5.28. Расходомерная шайба:

P_1 — давление до шайбы; P_2 — давление после шайбы; направление потока газа показано стрелкой



являются толчки потока, однако включение ресиверов или двух блоков со сдвигом на 90° почти ликвидирует их.

В случае поперечной прокачки газа в лазерах и в случаях, когда газодинамическое сопротивление контура весьма мало, можно для циркуляции обойтись герметизированным вентилятором, работающим от асинхронного двигателя. Степень сжатия вентилятора можно повысить, заключив его в трубу и установив рядом с лопастями направляющую решетку, препятствующую общему закручиванию газового потока. В атмосфере CO_2 -лазеров обычные трехфазные электродвигатели работают вполне нормально.

В ряде случаев в циркуляционных контурах успешно используют так называемые вихревые компрессоры, степень сжатия которых в несколько раз выше, чем обычных центробежных; однако роторы таких компрессоров представляют собой достаточно сложные детали. Обычно главная часть гидравлического сопротивления контура сосредоточена не в «активной» его зоне, например не в лазерной камере, а в коммуникациях и теплообменниках. Расчет гидравлического сопротивления коммуникаций при турбулентном режиме потока сложен, хотя и описан в специальной литературе [49]. Применение чрезмерно малого диаметра коммуникаций, как всегда, опаснее, чем увеличение их длины. Сделать производительный теплообменник можно только, не покусившись на габариты.

Расход газа через сечение обычно измеряется с помощью так называемой расходомерной шайбы (рис. 5.28). Это устройство создает перепад давления, оцениваемый по теореме Бернулли. Расход газа $Q = c \sqrt{\Delta P}$ — таково приближенное правило ($\Delta P \ll P$) [49]. Определить константу c легко, если имеются ресиверы достаточного объема, однако ее проще рассчитать. При экспериментах с истечением газодинамических струй в вакуум скорость прокачки для обеспечения стационарного режима часто оказывается недостаточной. Обычно при этом идут на проведение экспериментов в квазистационарном режиме. Роль откачного агрегата играет большой вакуумный ресивер, а эксперимент проводится путем резкого открытия сопла, разрыва мембраны и т. п.

5.6. ВАКУУМНАЯ ГИГИЕНА ОТПАЙНЫХ ПРИБОРОВ, ГЕТТЕРЫ, ТЕРМОКАТОДЫ

В практике физического эксперимента изготовление отпайных конструкций встречается реже, чем оно того заслуживает. Отпайный прибор, например полый катод для спектроскопических иссле-

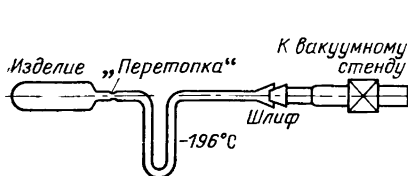


Рис. 5.29. Соединение отпаваемого изделия с вакуумным стендом

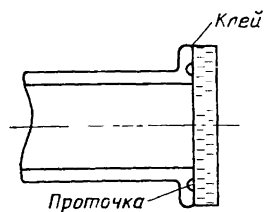


Рис. 5.30. Способ приклейки окна, исключающий попадание клея в объем прибора

дований, фотоэлемент с металлическим фотокатодом, лазерная трубка, еще не производимая промышленностью, позволяет отсоединиться от громоздких вакуумных стендов, повысить качество вакуума или газовой атмосферы, понизить уровень фона улучшением экранирования, намного увеличить долговечность прибора. Для овладения техникой изготовления отпавных изделий нужно иметь в лаборатории, как минимум, следующее оборудование: вакуумный стенд с возможностью дозирования инертных и других газов, стенд должен давать вакуум до 10^{-5} мм рт. ст.; кислородно-газовую или, еще лучше, водородно-кислородную горелку; печь для обезгаживания изделий под откачкой, или набор нихромовой проволоки, керамической соломки, асбеста или каолиновой ваты и стеклоленты для укладки печи прямо поверх изделия. Совершенно необходимы газопоглотители — геттеры. В лабораторных условиях это или порошок (таблетки из порошка) циркония, гафния, титана или промышленные таблетки (кошечки) геттерных сплавов, которые можно достать на заводах электровакуумных приборов. Барьерные геттерные сплавы и смеси применять не следует — это гораздо сложнее и не лучше, чем таблетки циркониевого или титанового порошка. Настоящая промышленная технология изготовления и очистки деталей отпавных приборов хорошо описана в [50]. Обеспечить в лаборатории вакуумную гигиену в той же степени, что и в промышленности, практически невозможно, однако при некотором навыке получаются изделия со свойствами ничуть не хуже промышленных. Автору удавалось изготавливать ртутные моноизотопные кварцевые лампы, содержащие всего несколько миллиграммов изотопа ртути при длине 60—70 см и имевшие ресурс работы несколько тысяч часов.

Ни в коем случае не следует соединять отпаваемое изделие со стендом с помощью даже короткого отрезка резинового шланга. Соединение можно сделать таким, как показано на рис. 5.29. Простая петлевая ловушка с жидким азотом полностью блокирует органические пары и конденсирующиеся газы от насоса, а за ней расположена «перетопка» — специально утолщенная и суженная часть трубки, которую нужно отпаять после завершения всех опе-

раций подготовки. Подготовка изделия к отпайке состоит в следующем: изделие собирается с соблюдением правил вакуумной гигиены, насколько это возможно в лаборатории. Детали обезжириваются и обессоливаются в дистиллированной воде. Протирать их нужно очень осторожно, чтобы не оставить волоски хлопка. Плохо, если в изделии остаются галогенные соли, прежде всего NaCl. Поэтому вести сборку руками, даже чистыми, не следует, нужно пользоваться перчатками, пинцетами и т. п. Если изделие можно греть целиком до достаточно высокой температуры (300—400 °C), то лучше так и сделать, поместив его в печь или обмотав нагревателем. Греть изделие, особенно стеклянное, горелкой — почти наверняка потерпеть неудачу. Обезгаживать изделие и тренировать геттеры нужно спокойно, часто в течение целого рабочего дня. Впрочем, небольшие кварцевые изделия, благодаря их высокой термостойкости, можно обезгаживать и горелкой. Если у изделия есть клееные части, окна Брюстера, мощные электровводы и т. п., то помимо тщательного продумывания их конструкции, сопряжения термических коэффициентов нужно постараться обеспечить обезгаживание прогревом всего изделия под откачкой, а клееные части греть до допустимой для них температуры. Органический клей не должен попадать в зону газового разряда или электронных и ионных лучей. Если это случится, то даже очень небольшое его количество, подвергнувшись радиолизу или ультрафиолетовому фотолизу, непременно испортит вакуум в приборе. Если клеивается шлиф, то смазывать клеем (очень немного, колечко) нужно только ближайшую к наружной стороне часть. Хороший способ приклейки плоского стекла показан на рис. 5.30 (этот же рецепт годится и для шлифа). Обычно клей достаточно долго газит, но если эпоксидную смолу смешать с порошком ZrO_2 или нитрида бора и нанести очень тонким слоем, то газовыделение можно сильно уменьшить. Существуют специальные весьма термостойкие герметики.

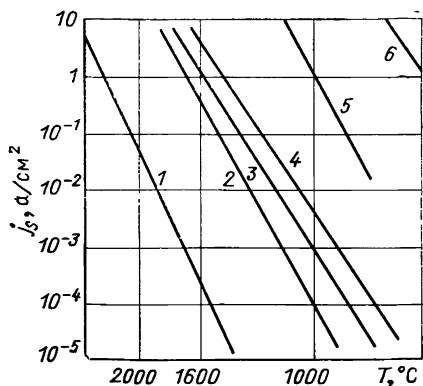
Если отпайваемое изделие во время работы нагревается, то склеиваемое место нужно располагать по возможности в нижней части прибора и не близко к источникам нагрева, например подогреваемым мощным катодам.

Газопоглотители (геттеры), так как их готовят в атмосфере, содержат на своей поверхности сорбированные газы и слои окислов и сразу после откачки, конечно, такие газы, как кислород, углекислый газ, азот, не поглощают. Для того чтобы сделать геттер активным, нужно прогреть его в вакууме. Поверхностно сорбированные газы десорбируются при 100—200 °C, но пленка окислов при этой температуре не «растворяется» в металле. Для того чтобы кислород пленки продиффундировал внутрь зерна геттера, обнажив активные атомы металла, нужно прогреть геттер до 600 °C (до темно-красного каления). Сделать это можно либо наружным нагревателем через кварцевую или коваровую ампулу, или, лучше, смонтировав геттер на внутреннем нагревателе. В промышленных приборах геттеры нагревают либо вместе с анодом, либо располагают их вблизи катода.

Оптимальная рабочая температура геттера для поглощения разных газов различна. Для кислорода она максимальна — окись обратно не диссоциирует. Для азота температура несколько ниже, а для водорода (гидридов) температура, при которой они обратно диссоциируют, невысока (200—400 °C) и зависит от степени насыщения геттера водородом. Поэтому лучше иметь в приборе несколько геттеров с рабочей температурой (распределением температур) от 150 до 500 °C. Но это оптимум, а хорошо тренированный геттер поглощает атомарные газы (H, N, O), если они появляются при работе прибора, очень активно. Молекулярные газы, особенно такие, как CO или CH₄, поглощаются много хуже, поэтому геттеры работают лучше при наличии в приборе электронных токов. Если радиолампа работает в режиме дежурного накала, то это может привести к ухудшению в ней вакуума, значительной потере управляемости по первой сетке. После включения анодного тока вакуум обычно быстро восстанавливается. В связи с этим можно дать рекомендацию: не держать лампы слишком долго в режиме дежурного накала и после хранения или длительного перерыва в работе не подавать сразу на мощные высоковольтные лампы все напряжение. Нужно в течение 10—30 мин после разогрева катода поднимать напряжение (у открытой по первой сетке лампы, при наличии анодного тока). Таким образом можно своевременно улучшить вакуум в лампе и избежать пробоев. Если изготовленный прибор содержит место склейки (такими местами являются обычно окна Брюстера в лазерных трубках и сильноточные электроводы), то при хранении вакуум или качество атмосферы в приборе обычно портятся. Примером являются промышленные гелий-неоновые лазеры. Тренировка прибора внутренним током, проходящим вблизи геттеров, обычно достаточно быстро восстанавливает качество вакуума или инертной атмосферы.

Чистые инертные газы, особенно неон, имеют очень низкое пробивное напряжение. Поэтому даже небольшое загрязнение инертной атмосферы сильно повышает пробивное напряжение, и газоразрядный прибор перестает пробиваться от своего источника питания. Для тренировки такого прибора приходится последовательно с нормальным источником питания включать дополнительный, пользоваться трансформатором Тесла и т. п. Наличие страт в газовом разряде и блеск его цвет — надежный признак присутствия молекулярных газов.

При изготовлении вакуумных приборов и работе с вакуумными установками часто приходится изготавливать термокатоды. Кривые



зависимости плотности тока эмиссии катодов из различных материалов от температуры приведены на рис. 5.31. Наибольшую температуру при заданной эмиссии имеет вольфрамовый катод, наимень-

Рис. 5.31. Зависимость тока эмиссии различных термокатодов от температуры [31]:

1 — вольфрам; 2 — торированный вольфрам; 3 — окись тория; 4 — гексаборид лантана; 5 — вольфрам-бариевый L-катод; 6 — оксидный (BaO) катод

шую — оксидно-бариевый. В [50] достаточно подробно описаны технология приготовления и механизм работы катодов, здесь мы лишь коротко приведем основные сведения.

Вольфрамовый катод — один из самых распространенных благодаря своей простоте и относительной нетребовательности к качеству вакуума. Он также наиболее устойчив к большой напряженности электрического поля и ионной бомбардировке по сравнению с другими катодами. Вольфрамовой проволоке легко придается нужная форма при нагреве на воздухе до темно-красного каления.

Для не очень толстой проволоки рабочая температура не должна превышать 2200°C , если срок службы около 1000 ч. При проведении экспериментов, когда срок службы несуществен, рабочая температура может быть много выше, до 3000°C , а ток эмиссии может достигать 5 А/см^2 . В таком форсированном режиме вольфрамовый термокатод достаточно экономичен — до 30 мА/Вт , однако в отпаянных приборах с большим сроком службы, например, в высоковольтных кенотронах, его экономичность много меньше: около 2 мА/Вт . При изготовлении газоразрядных приборов следует иметь в виду, что ток газового разряда может во много раз превышать эмиссию термокатода, превышение тем больше, чем больше давление газа. Например, у ксеноновых ламп высокого давления рабочий ток достигает $50\text{—}100 \text{ А}$, в то время как их штывевой вольфрамовый катод обеспечивает эмиссию около одного ампера, не более. Наличие в газовом разряде паров металла, например ртути, существенно увеличивает эмиссионную способность катода. Именно поэтому ртутные дуговые лампы обходятся сравнительно не очень мощными катодами. Температура самонакаливающегося катода может поддерживаться на нужном уровне с помощью следующего механизма: если эмиссия катода при поджиге разряда или в процессе работы оказывается недостаточной, около него возникает катодное падение потенциала, и ускоренные в этом потенциале ионы, бомбардируя катод, нагревают его до нужной температуры, при которой эмиссии хватает, и катодное падение потенциала исчезает. На рис. 5.32 показана зависимость тока, нагревающего прямую вольфрамовую проволоку до температуры 2200°C , от диаметра проволоки. Проволока, свернутая в спираль до той же температуры, нагревается при несколько меньшем токе. На рис. 5.33 показана зависимость температуры от тока для вольфрамовой проволоки диаметром 1 мм.

Холодные вольфрамовые катоды импульсных газоразрядных приборов имеют совсем другой — взрывной механизм эмиссии [51]. При этом обязательно испаряется малая порция вещества катода. Выход из строя импульсных газоразрядных ламп происходит не прямо из-за износа катода, а из-за растрескивания опыленной парами вольфрама стенки лампы под действием нагрева при поглощении собственного излучения.

Широко распространены катоды из торированного вольфрама. Содержащийся в проволоке такого катода торий медленно диффун-

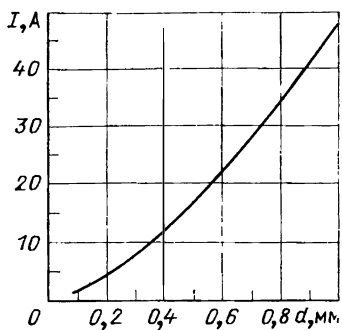


Рис. 5.32. Зависимость тока, нагревающую прямую вольфрамовую проволоку до 2200 °С, от ее диаметра

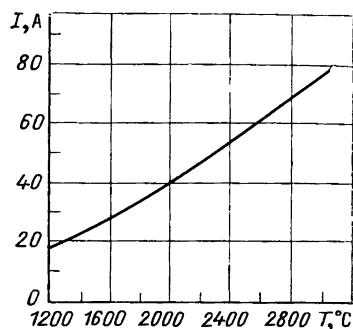


Рис. 5.33. Зависимость температуры вольфрамовой проволоки диаметром 1 мм от тока

дирует к поверхности, повышая ее эмиссионную способность. Этот катод более экономичен, чем вольфрамовый, дешев и технологичен на том же уровне. Его предельная рабочая температура ниже, чем вольфрамового катода, но предельная эмиссия выше.

По не очень понятным причинам не получил достаточного распространения катод из гексаборида лантана. У него хорошие эмиссионные характеристики, малая чувствительность к загрязнению атмосферы прибора. Очевидный недостаток этого материала — необходимость применения косвенного подогрева при достаточно высокой рабочей температуре — до 1500 °С и выше. Перегрев нагревателя в этом случае оказывается таким, что проще получить эмиссию прямо с него, если он изготовлен из торированного вольфрама.

В промышленности наиболее широко используется оксидно-бариевый катод, обладающий уникальной эмиссионной способностью, достигающий до 50 А/см² в импульсном режиме. В непрерывном режиме эмиссия этого катода, обычно реализуемая у промышленных изделий, составляет не более 0,1 А/см², т. е. не больше, чем у вольфрамового катода. Но рабочая температура оксидного катода 800—900 °С, а излучательная способность мала, поэтому он наиболее экономичен. К тому же его слабое красное свечение вызывает очень малые фотоэлектронные токи сеток, а сами управляющие электроды можно располагать на расстоянии лишь в десятки микрон от такого катода.

Во многих книгах написано, что оксидный катод нельзя применять в неотпаянных системах при не очень хорошем вакууме. Это не совсем так. Обычно в неотпаянных системах ставят эксперименты, и ресурс катода требуется небольшой. Десятки часов при вакууме лучше 10⁻⁵ мм рт. ст. оксидный катод проработать может.

Этот катод представляет собой смесь окиси бария (активный компонент) со стабилизирующими окислами кальция или стронция. Подложка промышленных катодов — никелевая фольга с 1—2 % магния. Магний, испаряясь из никеля, вос-

становливают окись бария и активирует катод. Окись бария и окись кальция гидролизуются во влажной атмосфере, и поэтому рабочая эмульсия готовится и наносится в виде карбонатов BaCO_3 и т. д. Затем, в вакууме, карбонаты при первичном нагреве, называемом активацией катода, разлагаются с выделением CO_2 и CO , после чего катод на атмосферу выносить уже нельзя.

В экспериментальной технике оксидный слой можно либо наносить на хорошо подготовленные поверхности, например на вольфрамовую проволоку, обвитую спиралью из тонкой молибденовой проволоки с принудительным шагом, либо приобретать подходящие готовые катоды на электровакуумных заводах. Эти катоды изготовляют в неактивированном состоянии и снабжают подогревателями. Активация таких катодов заключается в их медленном прогреве при хорошей откачке. При необходимости открыть систему лучше напустить в нее вначале сухой азот, а катод на воздухе держать недолго, по возможности в сухой атмосфере.

5.7. ИЗМЕРЕНИЕ НИЗКИХ ДАВЛЕНИЙ

Диапазон давлений, который нужно измерять, простирается до 10^{-10} мм рт. ст. и даже ниже. Поэтому нет и не может быть универсального датчика для всего вакуумного диапазона. Автор не будет здесь излагать кочующее из книги в книгу описание манометра Мак-Леода, который экспериментаторы почему-то не торопятся изготовлять. В настоящее время производится достаточно много приборов для измерения вакуума [52]. В диапазоне от одного до десятков миллиметров ртутного столба лучше всего зарекомендовали себя изготавливаемые одним из заводов СССР дифференциальные оптические манометры ОМ, схема действия которых показана на рис. 5.34. Эти манометры изготовляют со шкалой от 10 до 300 мм рт. ст. Самые чувствительные из них ОМ-10 позволяют измерять давление до 0,1 мм рт. ст.

Образцовые мановакуумметры с трубкой Бурдона в качестве чувствительного элемента — гораздо более грубые приборы, позволяющие измерять давление с погрешностью до ± 1 мм рт. ст., если очень аккуратно вести считывание, предварительно определив условный нуль прибора, зависящий от атмосферного давления, путем откачки до форвакуума. Для измерения небольших давлений вполне пригодны также дифференциальные масляные манометры (рис. 5.35), которые легко изготавливаются стеклотрубами. Плотность масла примерно в 15 раз меньше, чем у ртути, поэтому эти манометры могут измерять разность давлений с погрешностью 0,1 мм рт. ст., но они боятся агрессивных газов. У масляного манометра, при его откачке от атмосферного давления, возникнет значительное газовыделение из масла. Для ускорения обезгаживания можно слегка постучать по колену манометра деревянной палочкой. Хранить масляный манометр лучше под откачкой, тогда он всегда готов к работе. Для меньших давлений от 1 до 10^{-3} мм рт. ст. наиболее распространен термопарный вакуумметр, чувствительным элементом которого является термopа, нагреваемая нитью с током [52] (рис. 5.36). Этот датчик при подборе двух диапазонов то-

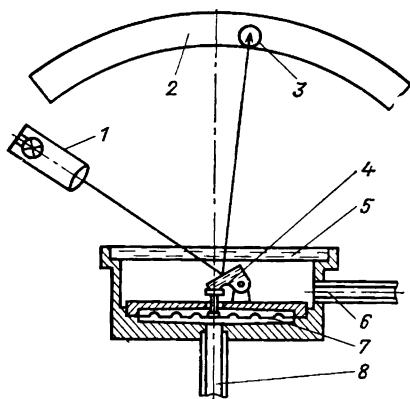


Рис. 5.34. Схема действия манометра с оптическим отсчетом типа ОМ:

1 — осветитель, 2 — шкала; 3 — оптический отсчет; 4 — подвижное зеркало; 5 — стекло; 6 — «нулевое» давление; 7 — мембрана (бериллиевая бронза); 8 — измеряемое давление

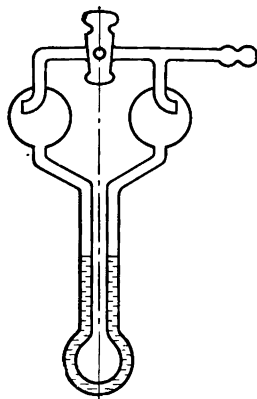


Рис. 5.35. Дифференциальный масляный манометр

ка позволяет измерять давление от 1 до 10^{-3} мм рт. ст. с погрешностью $20\text{--}30\%$; его показания, разумеется, зависят от теплопроводности газа, т. е. он в несколько раз завышает давление водорода и гелия и занижает давление тяжелых газов. Если при малых давлениях, когда $\lambda > D$ (λ — длина свободного пробега, D — характерный размер), измеряется вакуум в горячей или криогенной камере, а манометр находится при комнатной температуре, то давление

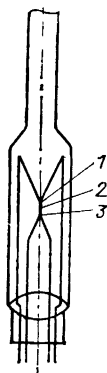


Рис. 5.36. Схема термпарного чувствительного элемента вакуумметра:

1 — нагреватель; 2 — переключатель; 3 — термопара

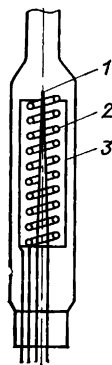


Рис. 5.37. Схема ионизационной манометрической лампы:

1 — катод (торированный вольфрам); 2 — сетка, ускоряющая электроны; 3 — коллектор ионов

в горячем или холодном объеме равно $P = P_{\text{маном}} \sqrt{T_{\text{камеры}}/T_{\text{комн}}}$ [52]; разумеется, плотность газа будет подчиняться обратной зависимости.

Давление ниже 10^{-2} мм рт. ст. измеряется обычно с помощью ионизационных манометров, датчиком у которых являются манометрические лампы нескольких типов [38]. Принцип действия у всех у них одинаков — измерение тока положительных ионов, образующихся в межэлектродном пространстве под действием потока электронов (рис. 5.37). Реже (в теченскателях, например) применяют датчики давления с пеннинговским разрядом в магнитном поле.

При вакууме ниже 10^{-3} мм рт. ст. большую роль играет выравнивание давления в колбе манометрического датчика и в изучаемом объеме. Детали и электроды колбы датчика, особенно после вскрытия на атмосферу, довольно долго «газят», освобождаясь от адсорбированных газов. Если датчик соединен с вакуумным объемом достаточно длинной непрогреваемой трассой с уплотнениями, то даже при космическом вакууме в объеме вакуум в датчике может быть очень долго не лучше 10^{-5} мм рт. ст. Поэтому датчики для сверхвысокого вакуума часто располагают прямо внутри камер, а для выносных датчиков нужно всегда заботиться о чистоте и пропускной способности соединительной трассы. Показания ионизационных манометров зависят от рода газа. Чем больше молекулярная масса газа и чем меньше его потенциал ионизации, тем больше такой манометр завышает его давление. Определить соответствующий пропорциональный множитель можно, проведя градуировку датчика, например по кривой упругости паров изучаемого или похожего вещества.

Очень часто мало знать общее давление остаточного газа в объеме: нужно знать состав остаточной атмосферы. Например, в термоядерных экспериментах остаточный водород не опасен, гелий — не очень опасен, а тяжелые атомы очень вредны. Долговечность катодов электровакуумных приборов зависит не столько от степени вакуума, сколько от восстановительного характера остаточной атмосферы, отсутствия в ней атомов галогенов и органических молекул.

Поэтому в экспериментах часто применяют чувствительные масс-спектрометры ограниченного разрешения, позволяющие измерять парциальное давление атомов и молекул вплоть до 10^{-10} — 10^{-12} мм рт. ст. За рубежом для этой цели широко применяются весьма совершенные квадрупольные масс-спектрометры. В СССР также выпускают несколько типов чувствительных масс-спектрометров с небольшими по размерам датчиками. Среди них следует упомянуть квадрупольный (или монополюсный) масс-спектрометр и импульсный времяпролетный прибор. Включение этих или подобных им приборов в вакуумную систему позволяет работать с вакуумом на качественно более высоком уровне, т. е. вести борьбу только с компонентами, опасными и вредными для эксперимента.

5.8. ВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ

Вакуум во всех системах, кроме космических, создается насосами.

В огромном диапазоне изменения давления от атмосферного и до 10^{-7} мм рт. ст. резко меняются требования к устройствам откачки, поэтому нет возможности создать один тип насоса, обеспечивающий получение высокого вакуума сразу от атмосферы. В лабораторной практике применяют две основных функциональных разновидности насосов: форвакуумные и высоковакуумные. Чаще всего откачка ведется двумя последовательно включенными насосами, до 0,01 мм рт. ст. давление понижается с помощью механических форвакуумных насосов, скорость откачки этих насосов относительно небольшая, 2—10 л/с. Механическая часть этих насосов работает в масляной ванне, благодаря которой исключаются перетечки воздуха в вакуум через зазоры между деталями. Обычно на одном валу располагаются две последовательные ступени откачки.

Доля паров воды, откачиваемых форвакуумным насосом, подчас близка к 100 %. Сильное сжатие этих паров перед их выбросом в атмосферу ведет к конденсации части пара и загрязнению масла водой. Для уменьшения этого эффекта некоторые насосы изготавливаются по газобалластной схеме. Дополнительный балластный клапан служит для напуска некоторого количества воздуха после отсоединения полости от вакуума, чтобы уменьшить степень сжатия откачиваемого газа и предотвратить нежелательную конденсацию этих паров в полости. Разрежение и скорость откачки у газобалластных насосов несколько ниже, однако они без конденсации откачивают пары воды давлением до 17,6 мм рт. ст. [39]. Насосы, изготавливаемые по этой схеме, нельзя применять для сжатия и возврата в газогильдеры ценных газов, например гелия, так как к ним будет подмешан воздух.

Предельный вакуум форвакуумного насоса зависит от упругости паров масла — его сорта и температуры. Иногда, желая снизить шум, насос вместе с мотором помещают в звукоизолированный, например пенопластовый, кожух. При этом не учитывают, что даже малый насос потребляет около 0,5 кВт электроэнергии, превращающейся в тепло. Двигатель и масло насоса перегреваются, вакуум ухудшается, срок службы агрегата падает, к тому же вся конструкция весьма пожароопасна. Поэтому правильнее располагать форвакуумные насосы или в коридоре, рядом с лабораторией, или, еще лучше, на улице, под козырьком. При этом на зиму масло надо на одну треть разбавить трансформаторным, а ток одной из фаз двигателя контролировать в момент пуска амперметром. Тогда насос пускается при температуре до -40°C . Выхлоп форвакуумного насоса содержит пары масла, поэтому выходной патрубок необходимо соединить с вытяжным шкафом или вывести на улицу, подальше от окна. Это замечание особенно справедливо при работе с течеискателями.

В дополнение к форвакуумным насосам в последние годы все

более широко используют двухроторные насосы Рутса (рис. 5.38). Два тщательно рассчитанных и изготовленных ротора специальной формы вращаются синхронно и синфазно со сдвигом по фазе 90° . Форма их сечения такова, что они все время почти касаются друг друга (зазор — десятые доли миллиметра). Таким образом, за один оборот без учета перетечек такой насос перекачивает весь свой внутренний свободный объем. Степень сжатия весьма велика — более десяти но падает при повышении давления и сопротивления контура из-за перетечек. Недостатком такого насоса является необходимость строго синхронного вращения роторов, что достигается применением шестерен, шумящих при больших оборотах. Видимо, этот недостаток может быть преодолен совершенствованием конструкции. Установка мотора с пониженным числом оборотов позволяет избавиться от шума ценой снижения производительности.

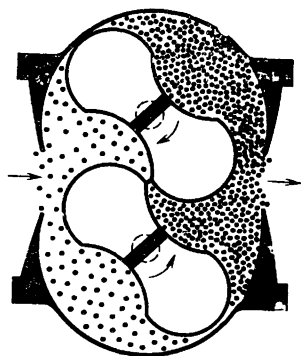


Рис. 5.38. Принципиальная схема насоса Рутса

Благодаря отсутствию масла в полости и трения поверхностей частота вращения роторов достаточно высока, и производительность откачки, отнесенная к габаритам, у насосов Рутса приблизительно на порядок больше, чем у форвакуумных насосов. Предельный вакуум у них также лучше — 10^{-3} мм рт. ст.; предельное давление на входе — до 50 мм рт. ст.; степень сжатия — около 100. В СССР эти насосы выпускают производительностью до 1500 л/с отдельно или в блоке с форвакуумными насосами.

Если форвакуумный насос дает плохой вакуум, это может быть следствием либо неисправности (например, клапанов одной из ступеней), либо плохого качества и загрязнения масла. Включите на вход насоса через короткие коммуникации охлаждаемую жидким азотом стеклянную ловушку и затем термопарную манометрическую лампу.

Посмотрите вакуум вначале без охлаждения ловушки, а затем с охлаждением, если вакуум в обоих случаях плохой — насос неисправен, а если при охлажденной ловушке вакуум удовлетворительный — все дело в качестве масла. Скорее всего, насосом качали пары органических растворителей или слишком много воды; могли его и «промыть» бензином или другим растворителем, а слить из него растворитель полностью нельзя. В таком случае нужно дать насосу поработать, откачивая вакуум, пока он не разогреется, и у разогретого насоса сменить масло, возможно, не один раз.

Когда форвакуумный насос откачивает газы давлением более 20—50 мм рт. ст., он обычно выбрасывает через выхлоп масляный туман и теряет масло.

Для уменьшения этих потерь, особенно когда нужно часто откачивать значительные объемы от атмосферного давления, на вы-

хлопе насоса устанавливают фильтр: вертикально расположенный сосуд, заполненный металлической стружкой или крупной сеткой с ячейкой 1—2 мм.

Масло, уловленное фильтром, должно стекать обратно в насос.

Из насосов высокого вакуума чаще всего используют простые, надежные и недорогие диффузионные пароструйные насосы [38]. В СССР выпускают достаточно много типов таких насосов, ни в чем не уступающих зарубежным образцам. Скорость откачки насосов колеблется от 20 л/с до десятков тысяч литров в секунду. В основном они выпускаются в металлическом исполнении и с водяным охлаждением, но есть насосы с воздушным охлаждением и есть цельностеклянные, для стеклянной аппаратуры.

Рабочей жидкостью таких насосов, как правило, является специальное «диффузионное» масло ВМ-3; реже в тех же типах насосов применяют более устойчивое к окислению кремнийорганическое масло, не портящееся при кратковременном прорыве атмосферы в горячий насос, еще реже применяют полифенилметилсилоксановый продукт ПФИС-1, дающий более высокий вакуум при увеличении мощности нагревателей насоса. Выпускают также специальные типы ртутных пароструйных насосов, отличающихся от предыдущих формой и размерами сопл и кипяtilьника. Начиная физикам подчас кажется, что получение хорошего вакуума зависит от применения особо выдающегося масла, насоса и т. п. На самом деле для получения вакуума до 10^{-7} мм рт. ст. большинство насосов и отечественных масел вполне пригодны. Современные паромасляные насосы имеют на дне кипяtilьника фракционирующий лабиринт; масло при испарении движется по нему от края к центру, и в центральный паропровод, идущий к верхнему соплу, попадают наиболее труднолетучие его фракции.

Выпускаемые у нас вакуумные агрегаты часто имеют слабые азотные ловушки, не прогреваются и потому вакуум лучше 10^{-6} мм рт. ст. получить на них трудно, однако те же насосы, снабженные хорошими азотными ловушками, с применением прогрева системы могут дать вакуум на порядок выше. Только что собранная система и насос с только что залитым свежим маслом никогда не дают высокого вакуума. Надо подождать: это уже описано нами в начале главы.

Для минимального загрязнения установки парами масла и постепенного улучшения его качества следует соблюдать простые правила эксплуатации паромасляных насосов. Затвор, сообщающий азотную ловушку и установку, должен быть закрыт всегда, когда ловушка разморожена. Размораживание ловушки нужно проводить при работающем форвакуумном и недавно выключенном, но еще не остывшем диффузионном насосе. Контроль как высокого вакуума, так и форвакуума должен быть предусмотрен как в объеме установки (над затвором), так и в верхней части ловушки (под затвором).

Это позволит оценивать вакуум, даваемый насосом при ра-

боте «на себя» и контролировать конец оттаивания ловушки. Мощность нагревателя диффузионного насоса должна быть не намного (на 20 %) больше минимально необходимой для начала его работы на залитом в него сорте масла. Наконец, для предотвращения случайного перегрева и порчи масла охлаждающую воду следует подавать до включения насоса, а прекращать подачу — после его остывания до 60 °С, дальше ждать его охлаждения не имеет смысла.

Слив воды необходимо визуальнo контролировать: вода — нардное достояние и не нужно лить ее в 10 раз больше, чем требуется. Если она нагревается на 5 °С, это нормально. Подчас разумному ограничению подачи воды препятствуют гидрореле защиты: поставьте на выходе из системы, за гидрореле, ограничивающий вентиль и им, а не только входным вентилем, отрегулируйте нужный расход воды.

Если присутствие паров масла совершенно недопустимо, иногда применяют парортутные насосы. Эти насосы в сочетании с азотными ловушками дают вакуум до 10^{-8} мм рт. ст., а при особо тщательной работе и выше. При откачке значительных количеств газа ртутные насосы выбрасывают в форвакуум много ртутных паров, поэтому применять их для откачки объемов, куда постоянно поступают неконденсирующиеся газы, не следует. Для улавливания ртутного пара на выходе этих насосов целесообразно устанавливать ловушку, наполненную тонкой алюминиевой стружкой. Как правило, учитывая токсичность ртути, применять эти насосы не следует.

Наиболее совершенными, но и наиболее дорогими насосами высокого вакуума являются турбомолекулярные насосы. Они откачивают вакуумный объем с помощью быстровращающегося ротора (20—40 тысяч оборотов в минуту), снабженного десятью и более ступенями сжатия, исполненными в виде роторных и статорных лопаточных дисков. Действие турбомолекулярного насоса в принципе аналогично действию осевого турбокомпрессора, но имеющего форму лопаток, оптимизированную к большой длине свободного пробега. Преимуществами этого насоса являются: возможность отказа от азотной ловушки и вакуумного затвора, возможность быстрой откачки объема от атмосферы до высокого вакуума, отсутствие на входе заметного количества паров масла даже у оставленного насоса. В то же время при получении высокого вакуума в стационарных условиях, когда фактор времени не очень важен, а азотные ловушки не представляют проблемы, эти насосы, учитывая сложность их приобретения и эксплуатации, не имеют особых преимуществ. Во всяком случае, приобретя такой насос, вы сразу после начала откачки вакуумной камеры опять-таки получите вакуум не лучше 10^{-5} — 10^{-6} мм рт. ст., и только прогрев позволит достаточно быстро пойти дальше.

Во многих случаях очень неплохие результаты дают криогенные сорбционные насосы — набор охлаждаемых сорбентов, обычно активированного угля, цеолита и палладированного силикагеля

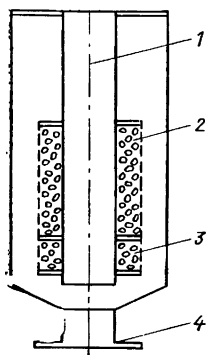


Рис. 5.39. Схема сорбционного насоса:

1 — стакан для заливки жидкого азота (в рабочем режиме) и размещения нагревателя (при обезгаживании); 2 — активированный уголь и цеолит; 3 — палладированный силикагель (для откачки водорода); 4 — фланец подключения к откачиваемому объему

(для откачки H_2) (рис. 5.39). Насос снабжается электрическим нагревателем для обезгаживания и объемом для заливки жидкого азота. Преимущества такого насоса: простота, активное поглощение даже химически весьма инертных газов, кроме гелия и неона, возможность расположения насоса прямо внутри рабочей камеры, если его обезгаживание не слишком вредно для установки. Конечно, если установка работает в режиме постоянного натекания газов, применение сорбционного насоса ограничивает ресурс непрерывной работы.

В настоящее время выпускается ряд типов сорбционных (геттерных) и ионно-сорбционных насосов. В сорбционных насосах атомы химически активных газов: O_2 , N_2 , H_2 связываются в нелетучие соединения непосредственно химически активным металлом. Чаще всего титаном, образующим устойчивый окисел и достаточно термостойкие нитрид и гидрид.

Пленка титана должна все время обновляться, поэтому он распыляется термически или, чаще, с помощью электрического разряда, горящего в вакууме в магнитном поле.

Сорбционные насосы плохо откачивают инертные газы. Ионно-сорбционные насосы мощным потоком электронов ионизуют остаточные газы. Ионизация и диссоциация молекулярных газов повышают скорость откачки. Насосы этого класса плохо работают при давлении более 10^{-2} мм рт. ст., поэтому применять их вместо пароструйных насосов рискованно. Одно из решений состоит в том, что вакуумная камера откачивается с помощью форвакуумного и небольшого паромасляного насоса (с азотной ловушкой и вентилем) до давления порядка 10^{-4} мм рт. ст., после чего включается непосредственно подсоединенный к камере ионно-сорбционный насос, а паромасляный насос отсекается от камеры.

Эти насосы обеспечивают в прогреваемых системах вакуум до 10^{-10} мм рт. ст.

Целесообразность применения специальных насосов для получения особо высокого вакуума можно достаточно уверенно оценить, анализируя ожидаемое газовыделение и геттерные механизмы экспериментальной аппаратуры. Например, если Вы изучаете испарение химически активного металла или для других целей испаряете такие металлы, как титан, цирконий, лантаниды и многие другие, то зачем испарять еще и титан в насосе? Вакуум в таких случаях будет определяться балансом газовыделения и геттерной способности самого объекта исследования.

5.9. ПОИСК ТЕЧЕЙ В ВАКУУМНЫХ СИСТЕМАХ

Очень хотелось бы вообще не писать этот печальный параграф, но пока будет вакуум, физикам и инженерам придется искать течи и в новых, и в работающих системах. Перед тем как набраться решимости искать течь, следует убедиться, а есть ли она? В откачанной до форвакуума установке после отключения откачки с некоторой скоростью портится вакуум. Это может быть следствием как теч, так и газовыделения.

Прикиньте с часами в руках скорость повышения давления после перекрытия откачки, вновь включите форвакуумную откачку и идите обедать. Через час повторите этот «эксперимент». Если скорость возрастания давления уменьшилась раза в 2 или больше — просто продолжайте откачку. Если изменение скорости невелико — постройте график $P(t)$. При линейном характере нарастания давления вплоть до 20 мм рт. ст. (больше упругости паров воды) — в установке течь. Разумеется, если скорость роста давления очень велика, вся эта первичная диагностика не требуется. Теперь рассмотрим оптимальную тактику поиска и устранения течи. Если течь очень велика (установка не откачивается ниже нескольких миллиметров ртутного столба), то обычно можно услышать шипение воздуха, всасываемого внутрь, например, там, где Вы забыли поставить прокладку. Ничуть не зазорно прослушать установку стетоскопом (при отключенном насосе). Если таким путем крупную течь найти не удалось — в установку напускается воздух и дается небольшое избыточное давление — около 100—200 мм рт. ст., а экспериментатор вооружается кистью средней величины и хорошо пенящимся мыльным раствором в мисочке. Мыльный раствор наносится на сварные швы и другие «подозрительные» места установки. Часто течь не замечают из-за сильного избыточного давления и плохого раствора, сильная струйка воздуха разрывает плохую пленку раньше, чем будут образовываться пузыри. Пузыри над сильной течью будут образовываться в момент проведения по ней кистью с раствором. Особенно сложны для поиска и устранения течи в сосудах азотных ловушек. Бывает, что в мастерских плохо проверяют баллон ловушки перед его заваркой в объем. Если есть подозрение на течь внутри баллона ловушки — заткните его резиновой пробкой со вставленным отрезком трубки и откачайте полость до форвакуума. Если вакуум в системе улучшится, а натекание сильно замедлится — значит, имеется течь во внутреннем объеме и ловушку придется ремонтировать в мастерской.

Никогда не замазывайте, не найдя течи, все швы установки замазкой Рамзая и аналогичными материалами. Поиск течи в спокойной обстановке — дело не очень долгое.

Найдя крупную течь, устраните ее временно, хотя бы пластилином (по месту), и продолжите поиск других течей, а затем вновь откачайте установку.

Таким путем обычно удастся в течение одного рабочего дня обнаружить до нескольких крупных течей в установке и, временно

устранив их, получить нормальный форвакуум. Дальше необходимо капитально устранить обнаруженные течи. Если в сварке трещина — это место необходимо тщательно переварить, заклеивать и запаивать трещину оловом не следует. Если течь точечная, то можно ее запаять оловянным припоем с помощью горелки или залить, разделав под углубление, глифталевым лаком.

После откачки установки до 10^{-1} мм рт. ст. можно включать насос высокого вакуума.

Масляный диффузионный насос при первом включении вначале несколько ухудшит вакуум за счет обезгаживания масла, а затем установка будет откачана до вакуума лучше 10^{-3} мм рт. ст. Признаками течи в откачанной установке являются слабое улучшение вакуума при заливке азота в ловушку и очень быстрое падение вакуума при закрывании затвора. Если есть подозрение, что в установке остались небольшие течи, то нужно применить гелиевый течеискатель.

Этот наиболее чувствительный течеискатель по принципу действия является простым масс-анализатором, настроенным на массу ^4He .

Ионы с относительной массой 4 а. е., кроме гелия, нет, поэтому фон по этой массе очень мал; кроме того, гелий легко проникает сквозь малейшие течи (и даже сквозь резиновые прокладки).

Течеискатель включают, по возможности, прямо в главный объем установки через минимальное гидравлическое сопротивление, не через длинный резиновый шланг. Вакуумная часть установки при поисках течи должна работать; в таком режиме высокая скорость откачки позволяет избежать длительного «захлебывания» течеискателя после попадания гелия в установку. Когда нужно добиться предельной чувствительности, главный затвор откачки прикрывается или совсем закрывается, если течеискатель справляется с откачкой. При «захлебывании» течеискателя открывание затвора в несколько секунд очищает установку от гелия.

Поиск течи ведут обычно сверху вниз. Вначале грубо оценивается местоположение течи, например, во фланце в целом. Фланец окружают полиэтиленовой пленкой, как пакетом, и внутрь вдувают порцию гелия. Если есть течь, то ищут уже по контуру уплотнения. Помните, что резина пропитывается гелием и пропускает его!

Последовательно проверяют все уплотнения, швы, а в случае применения труб или листов из обычной стали течи подчас бывают и прямо через стенку.

Если остается сомнение, есть течь или нет, то самый лучший способ — обезгаженную установку поставить «на натекание». Подсчитаем, какое натекание в установку является допустимым для достижения нужного вакуума. Пусть, для примера, объем установки 100 л, скорость откачки 200 л/с, а требуемый вакуум 10^{-6} мм рт. ст. За одну секунду в такую установку может натекать не более чем $2 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. и за $14 \text{ ч} \approx 5 \cdot 10^4 \text{ с}$ (от вечера и до утра) в нее может натечь примерно $5 \cdot 10^4 \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 0,1$ мм рт. ст. воздуха. Такое натекание можно обнаружить с помощью термопар-

ного вакуумметра, если отсечь установку на ночь, а утром перед измерением залить в ловушку азот для конденсации выделившихся H_2O и CO_2 . Если проверяемая на натекание часть системы не имеет ловушки, то можно охладить участок поверхности трубы или кожуха установки с помощью «нашлепки» из тряпичной ветоши или ваты, политой жидким азотом: она и сыграет роль ловушки.

Течи в стеклянных и кварцевых изделиях обнаруживаются с помощью искрового течеискателя (трансформатора Тесла). Установку откачивают до давления не более десяти миллиметров ртутного столба, включают течеискатель, регулируют его внутренний искровой зазор до получения хорошей мощной искры длиной около 20 мм (когда щуп подносится к металлическим предметам). После этого приступают к поискам течи, проводя щупом вблизи подозрительных мест: тройников, спаев и др. При наличии течи искра перестает «растекаться» по поверхности стекла и как бы прилипает к месту течи, прорываясь через течь в вакуумный объем. Искровой течеискатель позволяет грубо оценить вакуум в стеклянном объеме. При давлении больше 1 мм рт. ст. при поднесении щупа к поверхности стекла светится именно газ, а стенки не светятся, слышен сильный шум искры, растекающейся по стеклу. При вакууме около 0,1 мм рт. ст. начинают интенсивно светиться (под действием ускоренных электронов) внутренние стенки стекла или кварца, особенно в местах спаев и попадания люминесцирующих примесей. От 0,1 до 0,01 мм рт. ст. свечение постепенно ослабевает, шум искры резко уменьшается. Около 10^{-3} мм рт. ст. разряд в приборе плохо виден даже в затемненном помещении.

При работе с искровым течеискателем старайтесь не касаться щупом стекла и не держать его долго на одном месте — стекло может треснуть. Особенно аккуратно проверяйте несогласованные спаи. Искровой течеискатель не позволяет обнаруживать течь во впаях электродов и соединениях ковар — стекло. При подозрении, что эти места могут течь, их можно закрасить глифталевым лаком и оценить результат. Если установка не греется больше чем до 100°C , то заклеенная течь не возобновится.

Определенной известностью пользуются так называемые галоидные течеискатели. Они работают по обращенному принципу: в систему подается избыточное давление либо галогенсодержащего газа, либо воздуха с примесью паров галогенсодержащего вещества (SF_6 , CF_2Cl_2 , пары CCl_4).

Через течи галогенсодержащий газ выходит в атмосферу. Щуп галоидного течеискателя содержит раскаленный (на воздухе) платиновый катод, эмиссия которого сильно зависит от наличия атомов галогенов. Таким образом, при поднесении щупа к течи галогенсодержащие молекулы разлагаются на платиновом катоде, и его эмиссия возрастает. Галоидные течеискатели просты, портативны и особенно хороши для поисков течей в длинных трассах с невысокой пропускной способностью. К сожалению, щупы течеискателей этого типа часто теряют чувствительность, по-видимому, из-за загрязнения платиновой проволоки.

РАБОТА С ЯДЕРНЫМИ ИЗЛУЧЕНИЯМИ

С ядерными излучениями так или иначе сталкиваются большинство физиков-экспериментаторов. Для обнаружения и исследования этих излучений выпускается широкий ассортимент серийных приборов и разрабатываются такие уникальные установки, как большие жидководородные пузырьковые камеры или аппаратура для изучения потоков солнечных нейтрино.

Свойства ядерных излучений достаточно хорошо известны, и работа с ними обычно не требует новых подходов, однако нелишне отметить, что, например, спектрометрические полупроводниковые детекторы вошли в практику лишь в течение последнего десятилетия.

Относительная легкость выделения и регистрации различных ядерных излучений содержит в себе опасность «потери бдительности» со стороны исследователей; задачи иногда решаются хуже, чем позволяют имеющиеся возможности. Поэтому оптимальным, как и в других случаях, является широкий подход, рассматривающий первоначально задачу в целом и уже затем дифференцирующий ее на элементы с учетом их взаимосвязи.

6.1. ИСТОЧНИКИ ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Рассеянное фоновое излучение

На поверхности Земли, в обычных зданиях основными источниками фона являются космическое излучение и излучение природных радиоактивных изотопов. Первичное космическое излучение в основном состоит из протонов (93 %) и α -частиц (6,3 %). Вторичное излучение, которое достигает поверхности Земли, состоит из μ -мезонов, быстрых электронов и позитронов, π -мезонов, нейтронов, протонов.

Общий поток космического излучения создает в воздухе на уровне моря 1,63 пар ионов/(см³·с). В других веществах количество пар ионов будет соответственно пропорционально тормозной способности, в частности в твердых и жидких сцинтилляционных детекторах среднее количество возбужденных центров будет около тысячи в секунду на 1 см³.

Это количество возникает не статистически равномерно, как если бы появление каждого иона или кванта люминесценции было независимым событием, а в виде треков — ионизированного вещества вдоль пути частицы. Поэтому если детектор излучения имеет небольшой объем и регистрирует каждую заряженную частицу, как это бывает в случае гейгеровского счетчика, то предсказать количество отсчетов такого счетчика по его объему можно довольно точно, но если детектор регистрирует только определенные порции ионов или фотонов люминесценции, то уровень космического фона будет сильно зависеть от порога чувствительности, так как тормоз-

Рис. 6.1. Зависимость интенсивности космического излучения от глубины погружения детектора в единицах водного эквивалента [31]

ная способность у разных космических частиц совершенно различна.

Плотность потока заряженных частиц космического излучения на уровне Земли через единичную сферу площадью сечения 1 см^2 равна $2,41 \times 10^{-2} \text{ 1/(см}^2 \cdot \text{с)}$, а жесткой, в основном мюонной, компоненты после фильтрации через 15 см свинца — $1,68 \cdot 10^{-2} \text{ 1/(см}^2 \cdot \text{с)}$.

Плотность потока космических (вторичных) нейтронов на уровне моря составляет [53]: для медленных нейтронов с $E < 0,4 \text{ эВ}$ $2,3 \cdot 10^{-3} \text{ 1/(см}^2 \cdot \text{с)}$ и для более быстрых, $E > 0,4 \text{ эВ}$, $4,2 \cdot 10^{-3} \text{ 1/(см}^2 \cdot \text{с)}$.

Интенсивность космического излучения независимо от земных факторов флуктуирует на несколько процентов и падает по мере погружения в толщу земли или под водную поверхность (рис. 6.1). Для существенного ослабления космического фона толщина свинцовой защиты должна быть большая — десятки сантиметров.

Основная часть космического излучения на уровне моря — μ -мезоны большой энергии — обладает высокой проникающей способностью, а мягкая компонента — электроны и γ -излучение, конечно, снимается как атмосферой, так и защитой, но вновь «воспроизводится» под действием μ -мезонов.

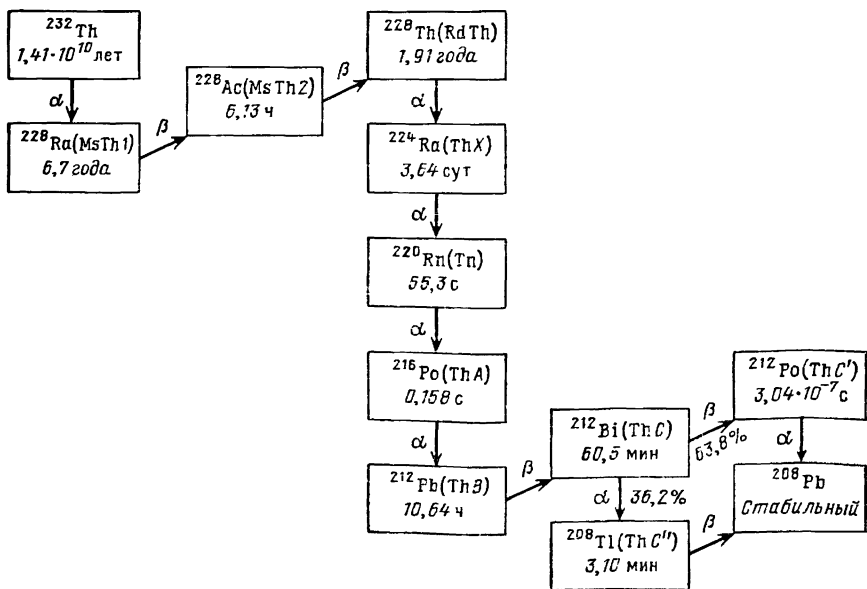
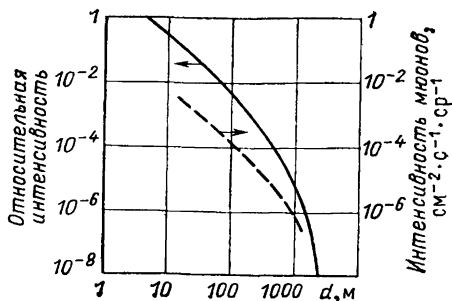


Рис. 6.2. Ториевая серия ($4n$) [31]

Первичных радиоактивных нуклидов существует в заметных количествах всего четыре: ^{238}U , ^{235}U , торий и ^{40}K . Кроме того, в атмосфере из ^{14}N при захвате космических нейтронов образуется ^{14}C с периодом полураспада около 5 тыс. лет. Углерод ^{14}C окисляется в атмосфере до CO_2 и вступает в биологический круговорот. Отмершие организмы более не пополняются ^{14}C , и его концентрация в их остатках падает, чем и пользуются археологи при датировке не очень отдаленных эпох.

В результате цепочек распада тяжелых радиоактивных элементов до изотопов свинца с ними сосуществуют относительно короткоживущие радиоактивные продукты распада * (рис. 6.2—6.5). В зависимости от способа получения и времени хранения образцы урана и тория могут содержать большее или меньшее количество дочерних продуктов и иметь различную удельную радиоактивность.

Кроме природных радиоактивных нуклидов сейчас в результате деятельности атомной промышленности всегда есть вероятность

* К сожалению, до сих пор часто употребляют устаревшие названия этих нуклидов типа «Радий С», «Мезоторий» и др.

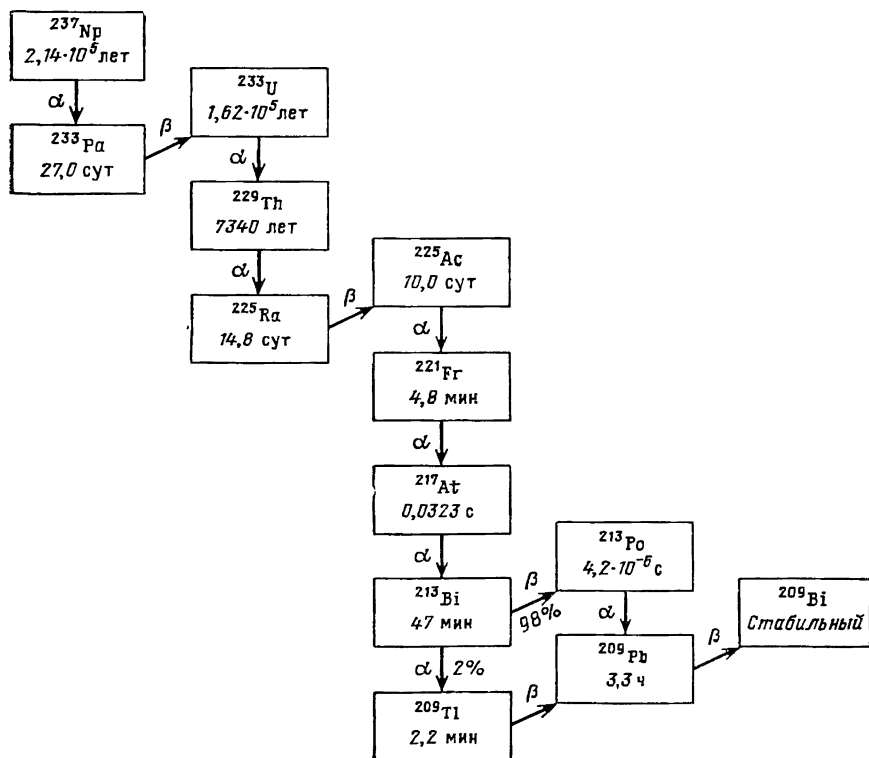


Рис. 6.3. Нептуниевая серия (4n+1) [31]

встретиться со слегка радиоактивными материалами. Поэтому при изготовлении тяжелой и дорогой защиты и регистрирующего оборудования следует тщательно проверять идущие на их изготовление компоненты. Следует также проверять радиоактивность стекла, которое почти всегда содержит калий. Один из осколков деления $^{88}\text{Kг}$, имеющий большой период полураспада, полностью не улавливается при химической переработке ядерного топлива и постепенно накапливается в атмосфере.

При проведении работ, связанных с точным измерением потоков излучений, прежде всего следует позаботиться об уменьшении фона как от посторонних источников, так и от того объекта, который используется в эксперименте. Ускорители частиц во время работы испускают γ -излучение, рассеянные частицы другого сорта и энергии. Ядерные реакторы в нейтронных пучках испускают мощные потоки γ -квантов, причем отношение нейтронной и γ -активности меняется в зависимости от мощности реактора и т. д.

Обычно удается подобрать наиболее чувствительный к нужному типу излучения детектор, применить селективную защиту. Методов регистрации одного и того же типа излучений, например α -частиц, много. Иногда, когда регистрируемое излучение не содержит

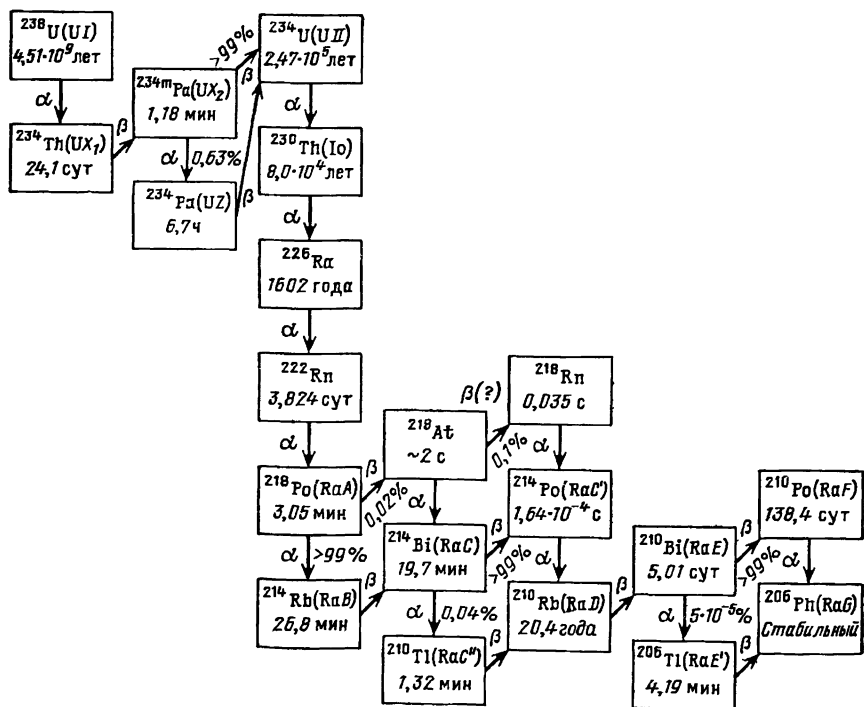


Рис. 6.4. Уран-радиевая серия (4n+2) [31]

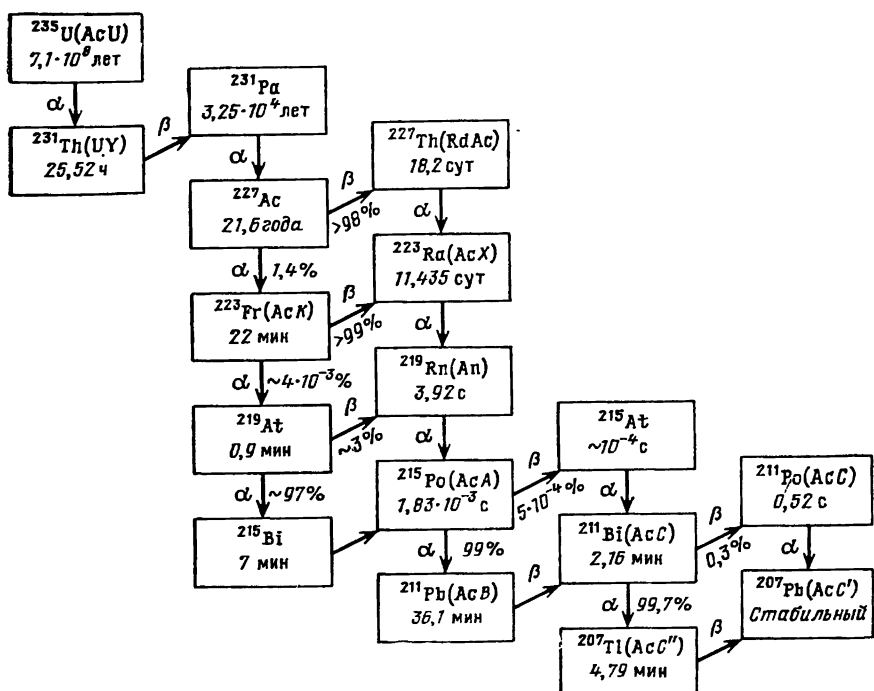


Рис. 6.5. Уран-актиниевая серия (4n+3) [31]

примеси других излучений, можно воспользоваться разными методами. В других случаях лучше сравнить их и выбрать оптимальный в конкретных условиях.

При работе с открытыми источниками детекторы излучений и защитные домики загрязняются, и фон намного возрастает.

Чистой работе способствует продуманное конструирование, доступность деталей детектора очистке, изготовление их из материалов, которые можно мыть с применением химических реактивов.

В работе с излучениями точность во многом определяется статистикой, поэтому автоматическое ведение счетного эксперимента в течение длительного времени очень облегчает дело. Такие эксперименты — первоочередные объекты комплексной автоматизации — от смены образца и до регистрации результатов [56].

Радиоактивные препараты

Радиоактивные препараты используются либо как источники радиоактивности, либо потому, что их излучение является мерой изучаемых процессов. Состав, размер и степень активности используемого препарата определяются поставленной задачей.

Регистрирующая ядерные излучения аппаратура обладает очень высокой чувствительностью. Некоторые начинающие физики и инженеры иногда впадают в крайность: с трудом привыкают к присутствию радиоактивных препаратов на рабочем месте, подчас горючат ненужную защиту, которая намного затрудняет работу и реально не только не уменьшает, но и увеличивает облучение из-за путаницы и усложненного манипулирования. Большая часть экспериментаторов здраво подходит к опасности открытых источников и гигиене работы, однако следует помнить, что формальные дозиметрические критерии при работе с источниками, кроме γ -источников и нейтронных, не всегда достаточны. Источник подчас тщательно рассматривают, кладут под микроскоп и т. д. В этих условиях открытые β -препараты могут дать заметные дозы облучения на кожу лица и глаза, что особенно недопустимо при длительной работе с ними. Щитки на лицо не всегда удобны, поэтому в дополнение к ним следует иметь на столе обыкновенную стойку со слегка наклонным (от себя) стеклом, за которым и работать с β -препаратами. Пробег α -частиц в воздухе не более 5 см; α -источники нельзя подносить к глазам. Открытые источники легко становятся причиной загрязнений кожи, одежды, оборудования. Чтобы этого не было, с ними нужно обращаться как с гирями от точных весов: они должны быть или в своем закрытом пенале, или в аппаратуре; брать их следует только пинцетом, для чего у края источника желательно иметь бортик. Не делайте глухих углублений в пенале или матрице, из которых источник нужно выковыривать или вытряхивать, перевернув держатель. У гнезда всегда должен быть боковой шлиц или отверстие в дне, позволяющие удобно взять источник.

Если источников много, то работать с ними нужно таким образом, чтобы не обнажать все, когда нужно взять один.

Регистрирующая аппаратура, особенно полупроводниковые детекторы и сцинтилляторы, портятся от излишнего облучения, поэтому в рабочей позиции препарат должен быть только тогда, когда измеряется его активность.

Активность некоторых препаратов: ^{14}C , трития, инертных газов, измеряется при заполнении ими прокачанных пропорциональных счетчиков [54, 55]. В этом случае важно создать вакуумно-дозировочный стенд с учетом требований к чистоте газов. Примеси электроотрицательных газов: галогенсодержащих, O_2 , H_2O , сильно изменяют счетную характеристику аппаратуры. Поэтому нужно подобрать такие процессы очистки применяемых смесей, которые, очищая ее от мешающих компонент, не поглощали бы изучаемые компоненты. Наличие «памяти» у очищающих устройств к предыдущим порциям вещества также необходимо проверить.

При исследовании α -активных препаратов очень часто измеряют активность не интегрально, а с помощью спектрометров, что позволяет идентифицировать нужный нуклид. Наиболее простые α -спектрометры — это высококачественные кристаллы германия, о работе с которыми будет сказано ниже. Потери энергии α -частиц в препарате, даже если в среднем он нанесен тонким слоем, могут быть значительными. Равномерность нанесения α -активного вещества на подложку и

получение воспроизводимых препаратов требуют большой аккуратности и «технологической дисциплины», тщательной очистки подложки, точного соблюдения режимов нанесения и сушки, термообработки. α -активные препараты чаще всего бывают открытыми, и радиоактивное вещество может рассеиваться в атмосфере помещения. Попадание α -активного вещества внутрь организма очень опасно и не всегда может быть своевременно обнаружено, поэтому при сколько-нибудь значительной активности лучше с этими источниками работать под тягой или в перчаточном боксе.

Если работа ведется с чистым α -излучателем актиноидного ряда, необходимо учитывать, что, хотя при приготовлении препарата он может и не испускать других излучений, через некоторое время в результате накопления продуктов распада в нем появятся и другие виды излучателей. Свежеочищенный уран, в форме любого соединения, гораздо менее радиоактивен, чем его руда, содержащая то же его количество, но плюс к этому и все равновесное семейство. Уран, пролежавший несколько лет, также накапливает продукты распада.

Важным исключением является ^{238}Pu ($T_{1/2}=86$ лет), который после α -распада дает ^{234}U , тоже α -излучатель с существенно большим периодом распада $2,47 \cdot 10^5$ лет. Поэтому ^{238}Pu в течение всего своего времени распада остается чистым α -излучателем и благодаря этому находит применение в качестве источника тепловой энергии для поддержания работы имплантированных микроэлектронных стимуляторов, в космической технике и в других случаях.

Источников β -излучения существует очень много: к ним относятся практически все осколки деления и большинство нуклидов, становящихся радиоактивными при захвате нейтрона. Эти источники при значительной энергии β -частиц не могут быть чистыми β -излучателями, не испускать γ -излучение. Тормозное излучение испускаемых препаратом быстрых электронов может давать значительный γ -фон. Исключением являются нуклиды, испускающие β -частицы с небольшой энергией; такие излучатели могут считаться достаточно чистыми от γ -излучения [31].

Средняя энергия электронов, испускаемых тяжелыми ядрами, близка к $1/3 E_{\text{макс}}$ (максимальной энергии) для легких ядер $\bar{E} \approx 1/2 E_{\text{макс}}$. Энергетическая форма β -спектра с трудом может служить для идентификации излучающего нуклида. Электроны поглощаются не на определенной глубине, как тяжелые заряженные частицы, а претерпевают многочисленные отклонения, в результате чего пучок электронов рассеивается в веществе и частично даже отражается от него. Количество дошедших до определенной глубины электронов изменяется по закону, приведенному на рис. 6.6. Экстраполированный пробег R_0 связан с энергией электронов E формулой:

$$E = 1,92 (R_0^2 + 0,22R_0)^{1/2}, \text{ верной при } E \geq 0,05 \text{ МэВ.}$$

В случае непрерывного спектра β -частиц поглощение выглядит несколько иначе: на определенном отрезке оно близко к экспоненциальному, хотя на самом деле быстро достигает 100 %.

В [31] приводится приближенная формула для оценки слоя половинного ослабления β -электронов:

$$d = 0,095 Z E_{\text{макс}}^{3/2} / A,$$

где d — толщина слоя половинного ослабления, г/см²; Z и A — заряд и массовое число материала мишени; $E_{\text{макс}}$ — максимальная энергия, МэВ.

Источники γ -излучения наиболее многочисленны; кроме чистых α -излучателей все радиоактивные нуклиды либо непосредственно, либо через тормозное излучение испускают γ -излучение. γ -Излучение ядер имеет вид линейчатого спектра, состоящего из очень узких линий. Эти линии уширяются за счет вычитания энергии отдачи свободного ядра, а также за счет эффекта Доплера. В кристаллических телах при малой энергии γ -квантов иногда удастся создать условия, при которых энергия отдачи γ -кванта передается всей кристаллической решетке. Это резко сужает регистрируемую ширину линии, в результате чего удастся наблюдать резонансное поглощение γ -квантов. Этот эффект получил название эффекта Мёссбауэра.

Прецизионная γ -спектроскопия проводится только с помощью очень громоздких уникальных γ -спектрометров, в которых в отклоняющем и фокусирующем магнитном поле точно измеряется энергия выбитых из тонкого слоя электронов [58]. Имеются подробные атласы спектров γ -излучения [73]. По γ -спектрам можно расшифровать даже сложные смеси радиоактивных нуклидов, правда, при достаточно большой активности. Более простые, сцинтилляционные γ -спектрометры также позволяют неплохо регистрировать одну γ -линию на фоне других и идентифицировать нуклид.

Основной трудностью при измерении энергии γ -квантов с помощью сцинтилляционных спектрометров является сложная связь между энергией γ -кванта и амплитудой импульса.

Только при фотоэффекте γ -квант передает всю свою энергию электрону, и энергия электрона оказывается в этом процессе однозначно связанной с энергией γ -кванта (но не равной ей). При комптоновском рассеянии и образовании пар однозначной связи нет (в случае пар из-за последующей аннигиляции позитрона), поэтому в сцинтилляционных γ -спектрометрах стараются подобрать детектор с таким Z , чтобы сечение фотоэффекта было наибольшим (при малой энергии γ -кванта), или регистрируют эффект образования пар с некоторыми оптимизирующими ухищрениями [59].

Особенно большое распространение получил в качестве γ -источника ^{60}Co благодаря высокому сечению актива-

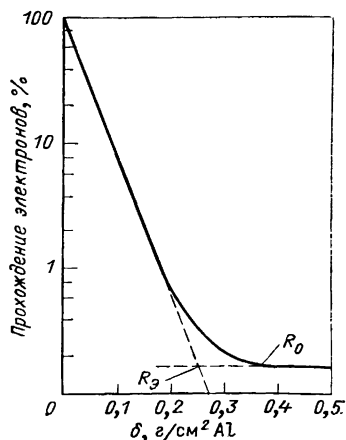


Рис. 6.6. Поглощение моноэнергетических электронов в веществе [37]. R_0 — максимальный пробог

ции ^{59}Co в нейтронном потоке ($20 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$), дешевизне сырья, оптимальной энергии γ -квантов (два кванта $E_\gamma = 1,17$ и $1,33 \text{ МэВ}$ испускаются одновременно) и сравнительно удобному периоду полураспада — 5,26 года.

Недостатком мощных γ -источников являются трудность защиты и операций по обслуживанию, сравнительно высокая опасность облучения при аварийных ситуациях или небрежности в работе.

Источники β - и γ -излучений применяют в различных областях техники: β -источники — для снятия статического электричества при производстве фотоматериалов, при измерении толщины тонких листов проката, для уменьшения времени запаздывания искрового разряда в специальных типах разрядников. Источники γ -излучения используют для дистанционного измерения уровня, например нефти в резервуарах, для оценки плотности горных пород (γ -каротаж скважин), в радиационной химии, биологии, медицине.

Чистые и почти чистые α - и β -излучатели применяют для изготовления светосоставов и специальных источников света, например сигнальных дорожных знаков, аварийного освещения.

Важным типом источников излучений, уже десятки лет используемым в физике, являются нейтронные источники [60]. Генерация нейтронов источниками основана на двух типах ядерных реакций: α - n и спонтанного деления. В реакциях α - n используются обычно бор и бериллий. У бора, в зависимости от энергии α -частиц источника, выход нейтронов колеблется от 15 до 100 на 10^6 α -частиц, а у бериллия — от 40 до 200 на 10^6 α -частиц [31]. Нейтроны генерируются немонотонноэнергетические, так как α -частицы вступают в реакцию с разной остаточной энергией; максимум энергетического распределения нейтронов приходится на 3—4 МэВ, так что спектр нейтронов источника несколько жестче спектра нейтронов деления. Поместив нейтронный источник в парафин, можно получить поток тепловых нейтронов, а применив, например, висмутовую защиту источника, избавиться от его γ -излучения. Если в качестве источника α -частиц используется ^{239}Pu или ^{210}Po , то γ -излучение и так очень невелико [31].

Ускорители заряженных частиц

Ускорители для ядерной физики — то же, что источники света для оптики, — без них исключительно трудно изучать сложный мир ядерных превращений.

Сейчас накоплен огромный опыт ускорения различных заряженных частиц, от электронов до тяжелых многозарядных ионов.

Помимо задач ядерной физики ускорители электронов широко используют для получения конвертированного излучения: рентгеновских и оптических квантов, нейтронов.

В последнее время большое научное и практическое значение приобрело синхротронное излучение быстрых электронов. Мощные пучки электронов, выведенные из ускорителей, используются для

проведения радиационно-химических процессов, инициирования лазерной генерации, нагрева термоядерных мишеней.

Ускорители делят на три класса: высоковольтные, линейные и циклические. В высоковольтных ускорителях частицы приобретают энергию под действием постоянной в течение времени ускорения разности потенциалов. За время ускорения одной частицы разность потенциалов между их электродами существенно не изменяется. В линейных ускорителях частицы также ускоряются на прямой траектории, но под действием так или иначе сопровождающего и ускоряющего их «бегущего» электрического поля. В циклических ускорителях частицы многократно проходят один и тот же ускоряющий зазор, хотя в некоторых типах этих ускорителей траектория частиц не является замкнутой (циклотрон, микротрон).

Большие ускорители делают сейчас только профессионально, и мы опишем ускорительную технику в той мере, в какой физик-экспериментатор, использующий ускоритель как источник частиц, должен представлять принцип их работы и особенности даваемого ими излучения.

Высоковольтные ускорители. Простейшим таким ускорителем является рентгеновская трубка, содержащая только катод и анод. Двухэлектродный ускоритель может работать только до нескольких сот килоэлектронвольт. Для ускорения частиц до большей энергии применяют секционированные ускорительные трубки. Источники питания и трубки ускорителей этого типа описаны в гл. 4. Большим преимуществом высоковольтных ускорителей является свободное варьирование режима их работы. В зависимости от задачи можно работать в непрерывном или импульсном режиме, в широких пределах изменяя скажкость и длительность импульса, а также энергию частиц. Хорошие электростатические генераторы обладают рекордно высокой моноэнергетичностью пучка и используются для прецизионного изучения ядерных уровней. Еще когда высоковольтные ускорители были почти единственным типом устройств, дающим искусственно полученные частицы высокой энергии, были обнаружены реакции на легких ядрах, ведущие к испусканию нейтронов. Некоторые из этих реакций используются и до настоящего времени; наиболее эффективно такие реакции протекают при воздействии на легкие ядра дейтронами (d, n) или ядрами трития (T, n). Часто используется реакция между дейтронами и бериллием: ${}^9\text{Be}(d, n){}^{10}\text{B}$, она весьма эффективна уже при энергии дейтронов 1 МэВ и даже меньше.

Эта реакция экзотермическая и дает выход нейтронов при весьма малой энергии дейтронов. Особенно много быстрых нейтронов дает реакция $T(d, n){}^4\text{He}$, ее эффективное сечение имеет резонанс при 100 КэВ и в максимуме равно 56. Неудобство использования этой реакции связано с необходимостью работы с дорогой тритиевой мишенью, а также с трудностью защиты от нейтронов с энергией 14 МэВ.

Очень хороший выход нейтронов наблюдается при реакции ${}^7\text{Li}(d, n){}^2\text{He}$ или ${}^7\text{Li}(d, n){}^8\text{Be}$. Первая реакция дает протяженный энергетический спектр ней-

тронов, а вторая — моноэнергетические нейтроны с энергией 14 МэВ. Широкому использованию этой реакции в некоторой степени препятствует неудобство работы с литиевой мишенью.

Многие процессы, идущие под действием ионизирующего излучения, не сводятся к реакциям первого порядка, а значит, их выход отнюдь не всегда пропорционален мощности источника излучения. Изучение кинетики таких процессов с помощью сочетания импульсного и непрерывного облучения представляет большие возможности при расшифровке их механизма. Это обстоятельство часто забывают, используя один, чаще всего линейный (импульсный), ускоритель и тем обедняя эксперимент. Ускорительные трубки при хорошем инженерном и электронном обеспечении могут работать и в непрерывном, и в импульсном режимах позволяя глубже изучать кинетику химических процессов.

При ускорении электронов и тяжелых частиц разница состоит в том, что электроны при гораздо меньшей энергии (сотни килоэлектронвольт) достигают околосветовой скорости. Эта разница для ускорительных трубок не очень существенна, но меняет все дело, когда речь идет об ускорителях линейных и циклических.

Применяемые в ускорителях источники электронов много проще по конструкции, чем ионные источники, не ухудшают вакуум, дают огромные токи. Источники ионов, особенно тяжелых и многозарядных, — устройства достаточно сложные, совершенствование которых продолжается.

Линейные ускорители. Поскольку постоянную разность потенциалов более нескольких мегаэлектронвольт создать даже на короткое время очень трудно, один из принципов ускорения до больших энергий был найден в том, чтобы ускорять частицы на гребне «волны» электрического поля, фазовая скорость которой во всех точках ускорительного тракта совпадает со скоростью ускоряемой частицы, постепенно приближаясь к скорости света. Создать такую волну можно несколькими способами: самый простой — направить импульс мощности — пакет коротких радиоволн по вакуумной камере как по волноводу. Если свойства волновода будут постоянными по всей длине, то и скорость распространения волны будет постоянной; ускоряющаяся частица быстро выйдет из синхронизма в такой системе. Однако путем установки диафрагм и т. д. можно так рассчитать и изготовить волновой тракт, что скорость продвижения фазы волны будет совпадать с расчетной скоростью частицы на всем пути ускорения. Это практически нельзя сделать для ионов небольших энергий, так как их начальная скорость слишком мала. Но для электронов, при их инжекции в линейный ускоритель из высоковольтного ускорителя с энергией 0,5 МэВ и больше, волновод является осуществимой, применяемой на практике конструкцией. Другой конструкцией, применяемой столь же часто, является установка внутри ускорительного тракта резонаторов, образующих последовательность ускоряющих промежутков. При увеличении скорости частицы постепенно увеличиваются расстояния между соседними промежутками, а фазу и частоту выбирают так, чтобы поле было ускоряющим в момент прохождения пакета или цуга частиц.

Выше 0,5 МэВ скорость электрона приближается к скорости света и меняется мало, поэтому в случае ускорения электронов большинство ускоряющих промежутков устроены одинаково и расположены эквидистантно.

Для того чтобы набор энергии на единицу длины ускорителя был наибольшим, электронная часть линейного ускорителя должна работать в высоконапряженном импульсном режиме, типа радиолокационного. Поэтому временной график работы линейного ускорителя обычно выглядит, как показано на рис. 6.7. Электронный ток представляет собой большие импульсы, идущие с частотой порядка ста герц, но внутри каждого импульса ток не непрерывен, а состоит из сотен пучков, разделенных паузами. Поэтому линейные ускорители уступают другим ускорителям при решении физических задач, требующих изменения временного режима облучения. Большим преимуществом линейных ускорителей является простота вывода пучка через фольгу, поскольку трасса ускорения не замкнута.

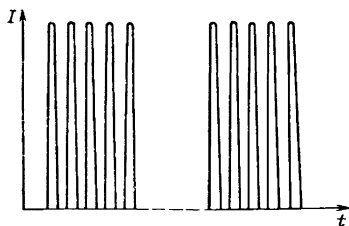


Рис. 6.7. Временной график тока линейного ускорителя (схема)

Для всех ускорителей, кроме высоковольтных, важен вопрос о продольной (во времени) и поперечной (по координатам) устойчивости ускоряемого пакета частиц. Продольная неустойчивость может вывести пакет частиц из временной фазы ускоряющего поля, а поперечная — привести к попаданию частиц на стенку. Для линейного ускорителя устойчивость обеспечивается только для частиц, движущихся несколько впереди (во времени) максимума ускоряющего поля (рис. 6.8). Поперечная устойчивость обеспечивается выбором формы ускоряющих электродов; она возрастает при использовании чередующейся по осям «жесткой» фокусировки (рис. 6.9).

Если инжектор работает непрерывно, то первые каскады ускорителя будут захватывать гораздо больше частиц, чем может быть ускорено исходя из соображений устойчивости, и при большом токе перегружаться, поэтому частицы в линейный ускоритель вводятся пакетами только в нужное время.

Для улучшения использования первичного пучка ионов перед основным

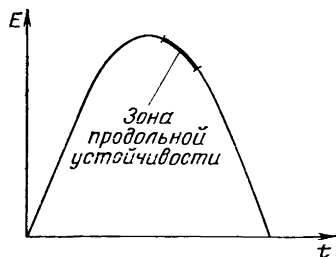


Рис. 6.8. Продольная устойчивость частиц на переднем фронте волны электрического поля

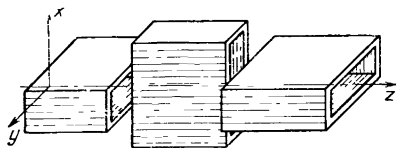


Рис. 6.9. Поперечная «жесткая» фокусировка частицы с помощью скрещенных прямоугольных электродов [61]

трактом ускорителя устанавливается группирователь, который с помощью переменного потенциала превращает непрерывный поток ионов в пакеты, поступающие в ускоритель вблизи нужной фазы.

Помимо электронов и легких ионов линейные ускорители применяют для ускорения тяжелых многозарядных ионов. В этом случае линейный ускоритель сообщает многозарядным ионам в Z раз большую энергию, чем однозарядным частицам. Для циклических ускорителей это не так, потому что там максимальная энергия определяется главным образом радиусом кривизны траектории иона на орбите. Поскольку скорость тяжелого иона много меньше скорости света и нарастает как \sqrt{E} , то линейные ускорители многозарядных ионов делаются с неравноотстоящими ускоряющими промежутками, отделяющими одну дрейфовую трубку от другой.

Ускорители многозарядных ионов сообщают ионам неона, азота, кислорода энергию более 100 МэВ. Такие ускорители работают в СССР (Дубна), в США (Калифорнийский университет).

Электронные линейные ускорители изготавливают сейчас с тремя основными целями: вывод электронного пучка и облучение различных объектов (ускорители малой энергии до 10 МэВ); получение импульсного потока нейтронов для нейтронно-физических исследований (до 100 МэВ); проведение уникальных ядерно-физических исследований с электронами очень больших энергий — ряд очень мощных ускорителей электронов, в том числе линейный ускоритель СЛАК в США, с максимальной энергией электронов 22 ГэВ. Длина этого ускорителя 3 км; он состоит из 900 одинаковых секций длиной 3 м, в каждой из которых электрон приобретает энергию 25 МэВ.

Для спектроскопических исследований в нейтронной физике чаще всего применяют метод времени пролета [8, 60]. Первоначально этот метод основывался только на прерывании нейтронного пучка от реактора с помощью механических роторов, затем были развиты методы, основанные на использовании ускорителей. Вначале использовали циклотрон, но частота повторения импульсов у него слишком высока, а фаза импульса не очень стабильна, поэтому сейчас в ряде стран специально построены линейные ускорители для генерации коротких импульсов быстрых нейтронов. В СССР в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова для таких исследований построен ускоритель «Факел» с энергией электронов 30 МэВ.

Нейтроны на выходе такого ускорителя образуются в результате реакции γ, n . Быстрые электроны тормозятся в мишени с большим Z , чаще всего в уране, и образующиеся γ -кванты, взаимодействуя с той же мишенью, образуют импульс быстрых нейтронов со сложным энергетическим распределением.

При планировании создания таких ускорителей и при выборе режима уже созданных следует учитывать, что интенсивность нейтронов в зоне детектора обратно пропорциональна R^2 , т. е. чем при более короткой пролетной базе будут вести эксперименты, тем нуж-

на меньшая интенсивность импульса. Длина пролетной базы зависит от длительности импульса нейтронного излучения и от разрешающей способности детектора. Поэтому в первом приближении ясно, что удлинение импульса вдвое при увеличении числа нейтронов тоже вдвое просто невыгодно: базу придется увеличить вдвое, стерический фактор упадет вчетверо, и интенсивность понизится вдвое. Отмеченное обстоятельство явилось основным, благодаря которому ускорители с их наносекундными импульсами для времяпролетных экспериментов оказались лучше импульсных реакторов. В настоящее время хорошие времяпролетные комплексы имеют разрешение около $3 \cdot 10^{-9}$ при длине пролета менее 10 м.

Циклические ускорители. В циклических ускорителях всегда применяется магнитное поле определенной, строго рассчитанной конфигурации. Создать нужную форму поля удается, как правило, только с помощью железного магнитопровода, а это значит, что напряженность поля в зазоре не превышает 1,6—2 Тл.

Приведем удобную расчетную формулу для определения радиуса, см, траектории частицы в нерелятивистском приближении:

$$E_e = 4,8 \cdot 10^{-5} (Hr)^2 Z^2 / A,$$

где E_e — энергия частицы, МэВ; H — напряженность поля, кЭ; Z — заряд частицы, единицы e .

В релятивистском случае связь между Hr и параметрами частицы следующая:

$$Hr = \frac{1}{300Z} \sqrt{E^2 + 2Em_0c^2},$$

здесь Hr — измерено в 10^6 Э·см; E — кинематическая энергия частицы, МэВ; m_0c^2 — энергия покоя частицы, МэВ.

Для сильно релятивистского случая предыдущая формула упрощается: $E = 300 Hr$. Здесь E — в эВ, H — в Э, r — в см, Z — в единицах e . Существенно то, что по мере роста энергии частиц по сравнению с энергией массы покоя разница между протоном и электроном уменьшается, и при энергии в несколько гигаэлектронвольт уже практически все равно ускоряются протоны или электроны.

Циклотрон впервые был построен Лоуренсом в 1931 г. и сыграл впоследствии выдающуюся роль в прогрессе ядерной физики. Основной принцип работы циклотрона — постоянство частоты вращения иона в магнитном поле, независимо от его энергии: $\omega = qH/mc$.

Таким образом, если «раскручивать» ион, находящийся в постоянном магнитном поле с помощью переменного электрического поля, то ион, однажды оказавшись в резонансе с электрическим полем, будет двигаться по спирали, постепенно набирая энергию и увеличивая радиус траектории (рис. 6.10).

Устойчивость частиц здесь так же необходима, как и в случае линейного ускорителя. Частица может устойчиво ускоряться только на переднем гребне волны напряжения: магнитное поле должно

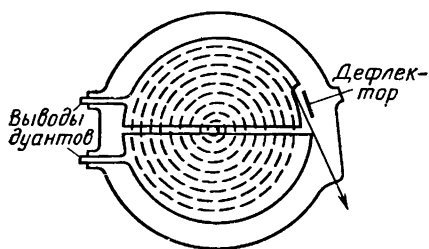


Рис. 6.10. Траектория ионов в циклотроне [37]

слегка убывать по радиусу для обеспечения устойчивости частицы по высоте. В начале ускорения устойчивость по вертикали обеспечивается в основном фокусирующим действием дуантов ускоряющих электродов, а ближе к краю полюсов — спадом магнитного поля. Из-за релятивистского возрастания массы и из-за уменьшения магнитного поля частота вращения ионов в конце ускоре-

ния падает, они выходят из синхронизма и перестают ускоряться. Чтобы максимально использовать возможности ускорения, частоту, питающую ускоряющие электроды-дуанты, выбирают чуть ниже циклотронной для центра полюсов. Ионы, ускоряясь, вначале опережают несущую частоту, сдвигаясь по фазе вперед, а затем вновь сдвигаются к оптимальной фазе, проходят ее и отстают, насколько возможно.

Стоит отметить, что у циклотрона для ускорителей ионов очень большой КПД, достигающий 25 % по питанию. Мощность пучка ионов достигает нескольких киловатт (в камере). Из камеры пучок выводится с помощью отклоняющего электростатического дефлектора. Вывести из камеры удастся лишь малую часть общей мощности пучка.

Если бы магнитное поле нарастало по радиусу, то максимальная энергия частиц могла бы быть много большей. Сделать такое поле легко — но при этом теряется устойчивость. Поэтому был предложен принцип азимутальной вариации магнитного поля циклотрона. Этот принцип эквивалентен жесткой фокусировке и позволяет в среднем обеспечить нужное нарастание поля по радиусу. В настоящее время многие старые циклотроны оснащены полюсными наконечниками с нужной вариацией поля, что позволило несколько увеличить максимальную энергию частиц и повысить ток за счет расширения интервала благоприятной для ускорения фазы.

В настоящее время не только эксплуатируются и реконструируются старые циклотроны, но и строятся новые, на самые различные энергии. Циклотрон является одним из самых мощных ионных ускорителей, а по сочетанию мощности и относительной простоты ему нет равных. Поток частиц у циклотрона не непрерывен во времени, а поступает на мишень сгустками длительностью обычно в несколько наносекунд и с частотой повторения, равной циклотронной частоте. Это позволяет использовать циклотрон в качестве источника нейтронов во времяпролетных экспериментах. Он, как уже отмечалось, несколько менее стабилен, чем линейный ускоритель. При мощности пучка около 1 кВт и площади 1 см² нагрузка на мишень очень велика. Обычно для получения нейтронов ускоряют на циклотроне дейтроны и используют бериллиевую мишень [60], так как этот относительно тугоплавкий и малолетучий металл

хорошо переносит тепловые нагрузки. В отличие от электронного ускорителя толщина мишени невелика — около 0,5 мм, что облегчает ее охлаждение. Если нужно понизить частоту следования нейтронных импульсов, чтобы избежать наложения сигналов при времяпролетных экспериментах, то это достигается установкой перед внутренней мишенью дефлектора, питаемого частотой, равной $1/2$, $1/3$ и т. д. рабочей частоты дуантов.

Циклотроны успешно используют для ускорения многозарядных ионов. Из-за ограниченного радиуса стремятся получить ионы с максимальным зарядом, тогда энергия тяжелых ионов может быть больше, чем для протонов в Z^2/A раз.

Фазотрон. До распространения принципа азимутальной вариации поля был предложен более простой способ избежать релятивистского нарушения синхронизма. Для этого нужно лишь в процессе ускорения порции частиц изменять частоту ускоряющего электрического поля (в сторону уменьшения). Установки, использующие этот принцип, получили название фазотронов — разновидности циклотрона с изменяющейся частотой на дуантах. За резкое повышение энергии частиц в фазотроне (фазотрон в Дубне ускоряет протоны до 680 МэВ) приходится расплачиваться сильным падением средней интенсивности пучка. Другое название фазотрона — синхроциклотрон. Крупнейший из синхроциклотронов, работающий в Калифорнийском университете, имеет полюса диаметром 460 см и ускоряет протоны до 740 МэВ.

Синхрофазотрон (синхротрон). Совершенно невозможно себе представить сплошные полюса магнита диаметром в десятки и сотни метров, а именно такой диаметр имеет траектория протона при десятках гигаэлектронвольт. Поэтому сооружение ускорителей на такие энергии стало возможным только при переходе на ускоряющую кольцевую дорожку.

У синхрофазотрона по мере ускорения частиц нарастает магнитное поле, так что радиус равновесной орбиты остается все время одним и тем же.

Поскольку свойства железа не позволяют при очень малой напряженности сделать поле строго заданного профиля, начальная напряженность поля должна быть не меньше 200 Э, что требует большой энергии инжектируемых в камеру ионов. Инжектор синхротрона — линейный ускоритель с энергией ионов до 100 МэВ. Цикл основного ускорения частиц на трассе длится обычно от одной до нескольких секунд. Магнитное поле нарастает во времени по некоторому закону, а частота очень строго ему соответствует. Сложная работа всех систем таких сложнейших ускорителей достигается очень тщательным конструированием и изготовлением всех элементов, высоким уровнем электронной и вакуумной техники, высокой точностью сборки магнитных секций кольца, достигающей десятых долей миллиметра отклонения от расчетной траектории. Поэтому для сооружения таких ускорителей выбирают местность, где на поверхность Земли выходят монолитные блоки прочных пород, например Протвино под Серпуховым. В 1972 г. в США вступил

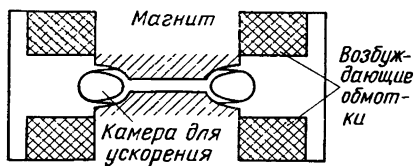


Рис. 6.11. Схематический разрез бетатрона [62]

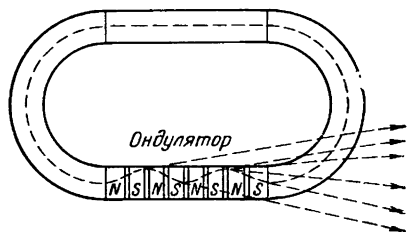


Рис. 6.12. Схема ондулятора, создающего направленный поток синхротронного излучения

в строй синхрофазотрон с энергией пучка 200 ГэВ. В одном импульсе такие ускорители дают обычно 10^{12} протонов, что соответствует суммарной энергии около 10^4 Дж за импульс. Во время работы ускорительное кольцо такой установки представляет очень большую радиационную опасность. Некоторые частицы испытывают столкновения с ядрами остаточных газов или со стенками вакуумной камеры и сходят с трассы. Огромная энергия и проникающая способность частиц заставляют закрывать всю трассу ускорителя надежной защитой. Установки таких масштабов уникальны, стоят миллиарды и обслуживаются сотнями специалистов. Поэтому их конструируют, чтобы непрерывно обеспечивать различные эксперименты. Пучок ускоренных частиц выводится в огромный экспериментальный зал, проходя через отклоняющий магнит, который направляет его на одну из экспериментальных установок. Если эксперимент на одной установке прерывается, пучок с помощью отклоняющего магнита переводят на другой комплекс, где экспериментаторы готовы к его использованию.

Бетатрон. Название «бетатрон» происходит от названия β -частиц — электронов, которые ускоряет этот весьма своеобразный, исключительно остроумный по принципу действия ускоритель. Если повышать поле между полюсами магнита, то пропорционально производной $d\Phi/dt$ вдоль замкнутого контура в этом поле возникает вихревая ЭДС. Если частица вращается в магнитном поле в направлении вихревого электрического поля, то такая частица будет, конечно, ускоряться. По мере роста ее энергии будет расти и магнитное поле, так что можно ожидать, что при определенных условиях орбита будет стационарной и устойчивой. Для электронов рассмотрение задачи с самого начала должно быть релятивистским. Очень простое и точное рассмотрение этой задачи приведено в [37].

Напряженность поля на равновесной орбите должна быть равна половине средней, проинтегрированной по площади, напряженности поля внутри орбиты в течение всего времени ускорения. Схематический разрез бетатрона показан на рис. 6.11. Электроны, испущенные инжектором в момент малого значения нарастающего магнитного поля, колеблются вокруг равновесной орбиты, постепенно приобретая энергию.

Чаще всего бетатрон используется для получения высокоэнергетического рентгеновского излучения; для этого весь его электронный поток сбрасывается на тонкую внутреннюю мишень с большим Z и конвертируется в тормозное рентгеновское излучение, которое имеет при больших энергиях довольно узкое, направленное вперед угловое распределение. Рентгеновское излучение используется для просвечивания массивных стальных деталей и в медицинских целях [63].

Гораздо труднее вывести из бетатрона сам электронный пучок. Для этого пучок отклоняют либо с помощью импульсно заряжаемой, расположенной близко к пучку пластины — дефлектора, либо с помощью импульсной магнитной катушки, но в этом случае крутой фронт создать труднее, и результаты получаются хуже. Процент вывода электронов из камеры обычно невелик.

Магнит бетатрона в простейшем случае питается переменным током промышленной частоты, а электроны ускоряются один раз за период.

При обычном сбросе электронов на внутреннюю мишень длительность импульса бетатрона весьма велика: она составляет проценты периода ускорения релятивистских электронов на орбите. При выводе электронного пучка наружу с помощью дефлектора импульс много короче: он равен периоду обращения, т. е. имеет порядок 10^{-8} с. Соответствующими внутренними отклоняющими устройствами длительность импульса рентгеновского излучения также может быть доведена до этого значения. Бетатрон может, при соответствующих размерах, ускорять электроны до тех пор, пока их потери энергии при тормозном (синхротронном) излучении не станут сравнимыми за один оборот с возрастанием энергии в вихревом поле. Чем быстрее нарастает магнитное поле, тем до большей энергии можно ускорить электроны. В мире существует всего несколько бетатронов на энергию 100 МэВ и один на 300 МэВ (он совершает шесть циклов ускорения в секунду). Бетатроны на энергию 20—30 МэВ выпускаются промышленно.

Электронный синхротрон в принципе похож на уже описанный протонный. Он даже несколько проще, поскольку инжектируются релятивистские электроны, и частоту в процессе ускорения приходится менять незначительно. Сейчас имеются такие установки с энергией до нескольких гигаэлектронвольт, в том числе в СССР (в Армении).

Новым подходом в ускорительной технике являются так называемые накопительные кольца. Прогресс радиоэлектроники позволяет сейчас делать такие совершенные системы «посадки» частиц на орбиту, что можно, уже имея на орбите сгусток (цуг) частиц, ввести, конечно, не прямо в цуг, а в другое по фазе место равновесной орбиты еще порцию частиц, а затем передвинуть их по фазе, сгруппировать вместе, и так раз за разом, пока расталкивание частиц в цуге не положит предел дальнейшему их накоплению. После этого сгусток частиц можно ускорить в синхротронном режиме до

максимальной энергии. Вся эта экспериментальная премудрости нужна (сейчас) для двух целей.

Во-первых, можно накопить на орбите не один цуг, а два, вращающихся в противоположные стороны. Тогда, при хорошо сформированной орбите и диаметре пучка буквально в миллиметр, вероятность столкновений между встречными частицами становится заметной. По формулам релятивистской механики это ведет к многократному увеличению энергии столкновения.

Во-вторых, важным применением накопительного кольца является возможность получения мощного синхротронного излучения. Вращающиеся по орбите электроны излучают сплошной спектр в рентгеновском, ультрафиолетовом и видимом диапазонах длин волн. Диаграмма направленности этого излучения — в каждой точке орбиты — вперед по касательной; КПД преобразования электроэнергии, идущей на поддержание вращения сгустка электронов в синхротронное излучение, очень высок — это, в сущности, только КПД СВЧ-генератора, нагруженного током кольца, так как у электронов нет других потерь энергии в глубоком вакууме. В результате общая мощность такого излучения, простирающегося от видимой области света до рентгеновского диапазона, составляет у современных установок киловатты. Поскольку удобнее иметь поток излучения, направленный в определенную сторону, применяют так называемые ондуляторы (рис. 6.12). В ондуляторе электроны движутся в знакопеременном магнитном поле по волнистой траектории, давая максимум излучения в направлении своего полета. Максимум длины волны можно регулировать, меняя период вариации магнитного поля. Сейчас серьезно изучаются возможности практического использования этого мощного источника излучения, вплоть до получения лазерной генерации «на свободных электронах» или транспортирования с космических электростанций на Землю энергии в виде микроволн.

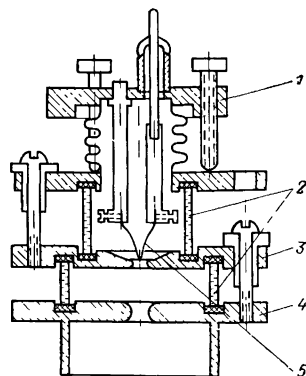
Источники заряженных частиц для ускорителей. Прежде чем ускорять частицы, надо их получить по возможности «без примесей», первоначально сформировать их поток, добившись нужной интенсивности и других параметров.

Электронные пушки. Проще всего обстоит дело с источниками электронов, почему-то именуемых электронными пушками. Ускорители дают огромные мощности при сравнительно небольшом токе*, поэтому электронные пушки обычно обеспечивают нужные параметры. На рис. 6.13 показана геометрия простой трехэлектродной пушки. Катод изготавливается из вольфрама, лучше торированного, а при необходимости в большом токе эмиссии для импульсного режима работы катод подчас делается из плоской шайбы гексаборида лантана, подогреваемой (сверху на рисунке) с помощью вольфрамовой плоской спирали до температуры 1600—1800 °С. Фокусирующий электрод по отношению к катоду имеет потенциал от нуля и ниже, так что поле в области катода — провисающее; оно и обеспечивает фокусировку электронов. Вытягивающий электрод по форме бли-

* Кроме таких установок, как «Ангара», — ускоритель, предназначенный для разогрева термоядерной мишени.

Рис. 6.13. Схема трехэлектродной электронной пушки:

1 — фланец катода; 2 — изолирующие кольца; 3, 4 — фокусирующий электрод и ускоряющий электрод, 5 — катод



зок к плоскому, отверстие в нем должно быть лишь ненамного больше диаметра формируемого луча.

При не очень больших токах такая пушка обычно работает хорошо с первого включения. Большим удобством является возможность в процессе наладки видеть положение катода по отношению к фокусирующему электроду и регулировать его. Для этого изоляционные кольца, показанные на рис. 6.14, изготавливают из стекла или кварца, а сам катод крепится через сильфон и юстируется с помощью трех винтов. Пушка отдельно настраивается на стенде, причем фокусировку проверяют с помощью порошка люминофора, насыпанного на экран, принимающий электронный пучок. Если необходима особо качественная фокусировка, то можно после ускоряющего электрода, имеющего потенциал 1—10 кВ, установить фокусирующую магнитную катушку. При работе в импульсном режиме с большими токами приходится учитывать влияние пространственного заряда, использовать геометрию пушки Пирса. Подробно эти вопросы освещены в работе [64]. Вольфрамовый катод не боится отбора тока, допускаемого его эмиссионной способностью при заданной температуре, поэтому ток пушки можно регулировать изменением накала вольфрамового катода. При импульсных токах до 100 А/см² можно использовать и оксидный катод. Его долговечность в вакууме ускорителя невелика, но замена катода через сто часов работы обычно допустима. Оксидный катод не терпит недокала, поэтому ток пушки с этим катодом нельзя регулировать накалом — нужно регулировать напряжение на электродах, лучше всего пропорционально по отношению к потенциалу катода, меняя фокусирующее и ускоряющее напряжения.

Источники ионов. Ионы, кроме ионов щелочных металлов, не испускаются нагретой поверхностью, поэтому приходится использовать плазму газового разряда. Если требуются ионы газа, например протоны, то разряд горит в чистом водороде; если требуются ионы малолетучего вещества, например бора, лития, бериллия, то вблизи разряда, горящего в подходящем инертном газе, располагают испаритель, загруженный относительно легколетучим соединением нужного элемента. У водорода ионы могут быть только однозарядными: H^+ , H_2^+ и H_3^+ [31]. Естественно, большую скорость приобретет в заданном поле H^+ , поэтому в источниках стремятся получить максимальный выход именно этого иона.

Хотя сечение образования H_2^+ в двадцать раз превосходит сечение образования H^+ , вторичные процессы позволяют создать источники с преобладающей долей H^+ на выходе.

Чем ниже давление, тем выше, по формуле Саха, процент ионизации при той же температуре, поэтому выбирают тип газового разряда, горящий при особенно низком давлении. Это либо пеннинговский разряд в поперечном магнитном поле, либо высокочастотный безэлектродный разряд. Последний дает лучшие ре-

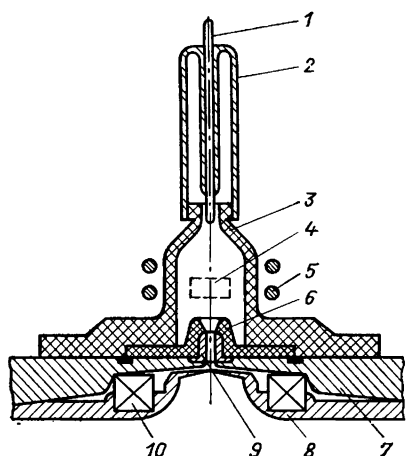


Рис. 6.14. Высокочастотный ионный источник для линейного ускорителя [61]

1 — анод; 2 — ввод (пирекс); 3 — колба (керамика); 4 — постоянный магнит для создания поперечного поля; 5 — высокочастотная катушка; 6 — вставка; 7 — основание ускоряющей трубки; 8 — накладка (магнитная цепь); 9 — отбирающий электрод с отверстием для эмиссии; 10 — катушка, создающая продольное магнитное поле

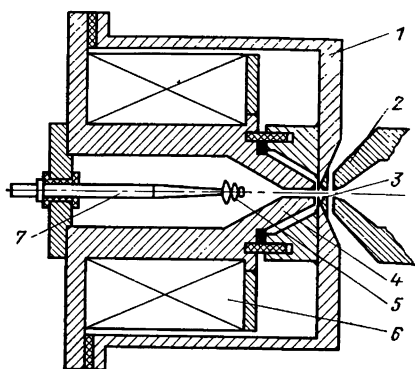


Рис. 6.15. Дуговой ионный источник (дуоплазмотрон) с разделением дуги на две части промежуточным электродом [61]:

1 — анод; 2 — отбирающий электрод; 3 — вставка с отверстием эмиссии; 4 — промежуточный электрод; 5 — катод; 6 — катушка; 7 — токоподвод к катоду

зультаты [8, 61]. Ионы в источнике вытягиваются из области, близкой к вытягивающему электроду, поэтому параметры источника определяются свойствами разряда в этой области и геометрией вытягивающего электрода.

При проведении особо тонких ядерных экспериментов, требующих высокого разрешения по энергии, может сказаться немонотонность протонов, вылетающих из источника. В таком случае монотонность повышают снижением вытягивающего напряжения и другими мерами. На рис. 6.14 изображен высокочастотный источник для линейного ускорителя. В зоне горения высокочастотного разряда применено поперечное, а в зоне вытягивания — продольное магнитное поле, что существенно увеличивает выход ионов [61]. На рис. 6.15 показан дуговой ионный источник (дуоплазмотрон) с разделением дуги на две части с помощью промежуточного электрода. Источники такого типа обладают очень хорошими параметрами. Их недостатки: более высокая потребляемая мощность и не очень большой срок службы электродов (40—100 ч). Высокочастотные источники долговечны и экономичны, поэтому при необходимости иметь непрерывный пучок, ток которого не бывает значительным, они, видимо, предпочтительнее дуговых. Если источник находится под колпаком, в среде сжатого газа, подачей водорода или дейтерия необходимо управлять дистанционно. При таком управлении возникает проблема оценки правильности работы источника: получить информацию о токах на электроды, давлении в камере разряда при современной телеметрии можно, но лучше этим не заниматься. Если источник отлажен и оптимальное давление известно, то известно и то Δp , которое источник вносит в вакуумную систему ускоряющей трубки. Открывая подачу газа, можно по изменению давления в системе судить о давлении в разрядной камере.

Ускорители, работающие в импульсном режиме, могут работать с высокой частотой, как, например, циклотрон, в котором ионы из пучка захватываются 10^6 раз в секунду, в течение некоторой доли каждого периода, или, наоборот, импульс протонов может требоваться всего 1 раз в секунду, что характерно для сверхмощных циклических ускорителей.

При большой частоте следования импульсов довольно трудно сделать импульсными расход газа и режим разряда, поэтому приходится использовать источник с непрерывной эмиссией. При работе на малой частоте можно изготовить механический затвор, открывающий поток газа только во время импульса. Такой затвор будет эффективно работать, только если объем полости, в которой горит разряд, будет небольшим, либо если он будет установлен на вытягивающем ионы электроде.

Если требуется ускорить ионы летучего вещества: лития, бора, бериллия и т. д., то обычно это вещество в форме наиболее летучего соединения помещают в разрядную камеру и так подбирают место и режим разряда, чтобы давление паров этого соединения было достаточным для получения нужных ионов, и в то же время расход вещества был таким, чтобы можно было работать длительное время. Соединения типа хлоридов или сами металлы имеют более низкий потенциал ионизации, чем благородные газы, поэтому если в смеси хлористого соединения и благородного газа горит электрический разряд, то ионизуются главным образом молекулы соединения. Поэтому доля ионов нужного вещества будет выше, чем его молекулярная концентрация в смеси.

Особую группу источников ионов представляют источники электромагнитных сепараторов, служащих для разделения изотопов элементов. Электромагнитный сепаратор обычно работает при напряжении около 30 кВ, и источник должен обеспечить максимальный ток при неопределенности в энергии меньше, чем $\Delta m/m$, что обычно меньше $1/100$ — $1/200$, и при угловой расходимости, допускаемой системой фокусировки, около 10 — 20° . При работе с дорогостоящими элементами очень важно, чтобы превращение вещества в ионы было максимальным.

Совершенствование ионных источников продолжается; процессы, происходящие в них, достаточно сложны, их труднее описать математически, чем ускорение сгустка ионов или электронов в вакуумной системе ускорителя. Качество ионного источника не во всех случаях определяет параметры ускорителя, но там, где это так: в области ускорения многозарядных ионов, создания очень мощных импульсных источников для разогрева термоядерной плазмы, создания эффективных источников для электромагнитных сепараторов — совершенствование существующих и создание новых типов источников продолжаются.

Ядерные реакторы

Ядерные реакторы являются в настоящее время наиболее мощными источниками ядерных излучений, хотя в импульсах электронные ускорители позволяют получать больший поток быстрых нейтронов на единицу площади.

Большинство промышленных и исследовательских реакторов являются реакторами на тепловых нейтронах [6, 13]. Быстрые нейтроны, испущенные ядерным топливом, попадают в слабопоглощающий нейтроны замедлитель (графит, вода, тяжелая вода, бериллий), где замедляются до тепловых энергий, после чего,

диффундируя в нем, вновь проникают в блоки с топливом и делают следующее «поколение» ядер топлива.

В разных замедлителях требуется разное количество столкновений, чтобы нейтрон замедлился от энергии 2 МэВ до тепловой: для воды — 20; тяжелой воды — 36; бериллия — 88 и углерода — 115. Соответственно меняется и длина замедления [60]: для воды она равна 6,5, для тяжелой воды 11, для графита 20 см. Эти цифры также относятся к спектру деления и очень сильно возрастают при переходе к «термоядерным» нейтронам с энергией 14 МэВ из-за уменьшения сечения рассеяния при высоких энергиях.

Для полного использования всего урана нужно, чтобы коэффициент воспроизводства был больше единицы. Таким свойством обладают реакторы на быстрых нейтронах. Они устроены следующим образом: активная зона состоит из высокообогащенного урана или плутония и не содержит замедлитель. В связи с этим быстрые реакторы нельзя охлаждать водой; для этой цели применяются жидкий натрий, гелий под давлением и даже ртуть. Активная зона реактора на быстрых нейтронах окружается зоной воспроизводства, в которой избыточные для поддержания цепной реакции нейтроны поглощаются в уране-238, превращая его в плутоний-239. У такого реактора коэффициент воспроизводства достигает 1,2—1,4.

Исследовательские реакторы используют для различных целей: во-первых, как мощные источники нейтронов и, во-вторых, для изучения поведения различных конструкций в поле реакторного излучения, что в настоящее время является одной из главных инженерных задач ядерной энергетики; в-третьих, простые исследовательские реакторы очень небольшой мощности — так называемые критические сборки — позволяют уточнять нейтронно-физические параметры проектируемых реакторных систем.

Реактор как источник излучения. В любом ядерном реакторе устанавливается определенный спектр нейтронов, т. е. их относительное, не зависящее от мощности реактора распределение по энергиям; этот спектр является функцией координат рассматриваемой точки реактора.

Если это реактор на тепловых нейтронах, то в нем присутствуют три довольно четко отграниченные группы нейтронов. Первой группой являются быстрые нейтроны, почти не претерпевшие столкновений: доля этих нейтронов особенно велика вблизи твэла реактора. Если торец канала, испускающего нейтроны, почти вплотную подведен к твэлу реактора, то поток быстрых нейтронов спектра деления может быть сравним с потоком тепловых нейтронов [8]. Следующая группа — нейтроны спектра замедления или спектра dE/E . Такая термिनологическая связана с тем, что вследствие постоянного относительной потери энергии при упругих столкновениях нейтроны в процессе замедления распределяются по энергии так, что их поток на единицу относительного изменения энергии dE/E одинаков от сотен килоэлектронвольт до 0,5 эВ, где спектр dE/E плавно переходит в максвелловское распределение тепловых нейтронов, имеющих среднюю температуру несколько больше, чем температура замедлителя, за счет большего поглощения более медленных

нейтронов. Соотношение интенсивностей между спектрами dE/E и максвелловским зависит главным образом от макроскопического коэффициента поглощения тепловых нейтронов в активной зоне. Если требуется, при заданной мощности реактора, получить как можно больший поток тепловых нейтронов, то необходимо уменьшить количество поглощающих атомов в единице объема. Для того чтобы добиться этого, берут высокообогащенный ^{235}U в минимальном количестве и используют замедлитель тоже с минимальным поглощением: лучше всего D_2O , несколько хуже графит и еще хуже H_2O . У таких реакторов соотношение между удельной мощностью и потоком нейтронов на порядок больше, чем у промышленных. Поскольку твэлы исследовательского реактора работают при невысокой температуре, тепловые потоки могут быть резко увеличены, и реально некоторые (уникальные) исследовательские реакторы могут дать плотность потока больше $10^{15} \text{ 1/(см}^2\cdot\text{с)}$. В активную зону исследовательского реактора вводятся пустотелые каналы: обычно горизонтальные каналы служат для вывода нейтронных пучков, а вертикальные — для помещения в реактор облучаемых образцов. В зоне защиты реактора каналы закрываются подвижными шиберами; вертикальные каналы в зоне защиты иногда делают пологоспиральными. Это позволяет на несколько порядков снизить излучение при открытом канале. Пусть плотность потока нейтронов в центре реактора $10^{14} \text{ 1/(см}^2\cdot\text{с)}$, сечение канала 50 см^2 и расстояние от центра реактора до внешней аппаратуры 10 м. Тогда плотность потока (тепловых) нейтронов в пучке в районе аппаратуры будет

$$50 \cdot 10^{14} \cdot 4\pi \cdot 10^4 \approx 3 \cdot 10^8 \text{ 1/(см}^2\cdot\text{с)}.$$

Это значение на много порядков превышает допустимый уровень облучения, поэтому настройка аппаратуры руками при открытом шибере и даже само пребывание вблизи мощного пучка реакторного излучения есть признак не доблести, а глупости. Некоторые физики в прежние годы за такое «геройство» заплатили здоровьем, особенно переоблучением рук.

Не все каналы ядерного реактора выводятся из зоны, близкой к его центру. Активная зона окружена, особенно у графитовых реакторов, толстым отражателем нейтронов, существенно уменьшающим необходимую критическую массу горючего. В отражателе, поскольку поглощение мало, возникает всплеск потока тепловых нейтронов, иногда превышающий их поток в центре. В то же время поток нейтронов больших энергий и поток γ -излучения из отражателя существенно меньше, особенно если канал введен не по направлению к центру реактора, а по касательной к среднему диаметру отражателя. Вертикальный канал, идущий в отражатель, только так и делают.

Многие реакторы снабжаются так называемой тепловой колонной, представляющей собой вплотную примыкающую к отражателю толстую графитовую кладку. Длина диффузии нейтронов в графите

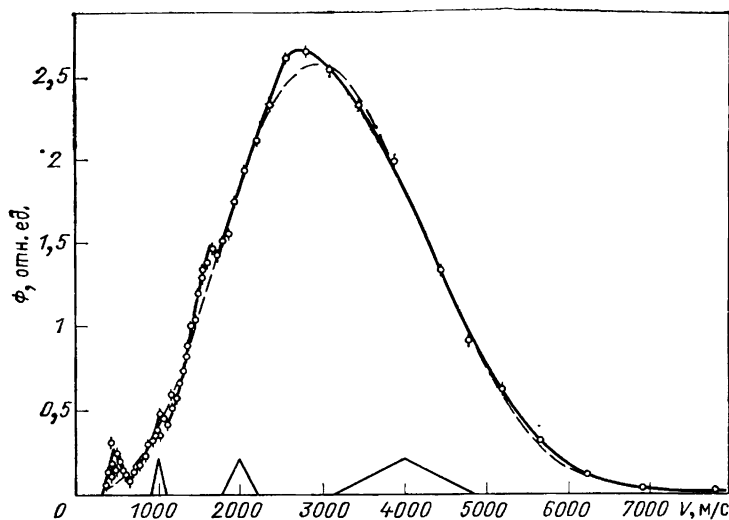


Рис. 6.16. Спектр нейтронов в тепловой колонне ядерного реактора [65]

те около 50 см; после прохождения нескольких длин диффузии нейтронный поток ослабевает, но зато почти целиком состоит из идеально термализованных нейтронов. Впрочем, еще в пятидесятые годы автору удалось показать, что распределение нейтронов в тепловой колонне не строго максвелловское (рис. 6.16) [65].

Нейтронная спектроскопия. Пучки нейтронов, выведенных из реактора, используют главным образом для исследования взаимодействия нейтронов различной энергии с веществом. Ясно, что точное знание сечений совершенно необходимо для расчета реакторных систем. Помимо этого, многие элементы используют как фильтры и резонансные индикаторы. Это прежде всего кадмий, уже в тонких листах (0,5 мм) поглощающий тепловые нейтроны, золото, хорошо активирующееся в огромном резонансном максимуме, и другие нуклиды.

В нейтронной спектроскопии с использованием реактора как источника нейтронов применяются: времяпролетный нейтронный селектор, кристаллический монохроматор и механический монохроматор нейтронов.

Схема времяпролетного селектора показана на рис. 6.17. Быстро вращающийся ротор имеет систему довольно тонких щелей, которые пропускают импульсы нейтронного потока длительностью

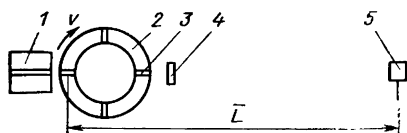


Рис. 6.17. Схема времяпролетного селектора с ротором — прерывателем нейтронного потока:

1 — коллиматор; 2 — ротор; 3 — щель не в плоскости пучка; 4 — образец; 5 — детектор

около 1 мкс. За ротором, на расстоянии подчас в десятки метров, располагается детектор нейтронов, а образец может, в зависимости от того, какое сечение измеряется, находиться либо за ротором, либо у детектора. Эффективная отсекающая длина ротора и длина детектора должны быть малы по сравнению с расстоянием ротор — детектор. После прохождения нейтронного импульса через ротор отсчеты детектора поступают на временной многоканальный анализатор, и каждый канал по времени запаздывания связан простым соотношением с энергией зарегистрированных в нем нейтронов. Выдающийся вклад в измерение нейтронных сечений этим методом внесли американские физики во главе с Юзом [8]. Разработанный ими подвешенный в вакууме ротор селектора обеспечивал линейную окружную скорость до 500 м/с. С помощью такой техники довольно быстро были изучены полные сечения элементов в диапазоне от тепловых энергий до 10 кэВ. Ясно, что чем больше энергия нейтрона, тем меньше время пролета и меньше разрешающая способность селектора.

С помощью селектора можно измерять сечения деления, поместив образец делящегося вещества в камеру деления, используемую в качестве детектора. Возможно также изучение сечений захвата, если захват нейтрона сопровождается испусканием мгновенных γ -квантов. Однако сечения активации или безызлучательного захвата измерить с помощью селектора нельзя, так как поток нейтронов после ротора не моноэнергетичен, а только развернут по энергии во времени. В тех случаях, когда требуется поток истинно моноэнергетических нейтронов, применяют механические или кристаллические монохроматоры.

Механический монохроматор обычно представляет собой дисковый ротор больших размеров, ось которого расположена вдоль пучка нейтронов (рис. 6.18). По образующей монохроматора или, луч-

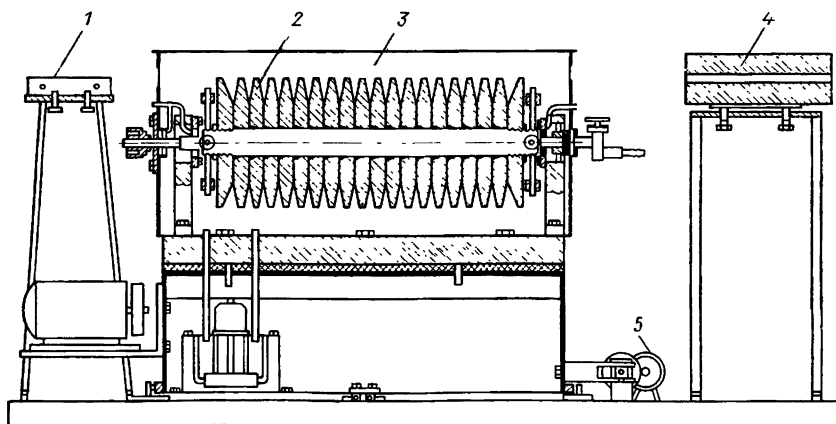


Рис. 6.18. Механический монохроматор нейтронов [65]:

1 — неподвижный коллиматор; 2 — ротор; 3 — вакуумная камера; 4 — блок детектора; 5 — устройство поворота ротора

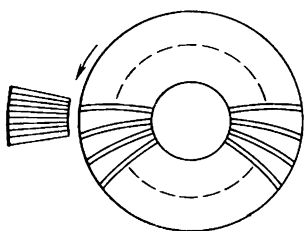
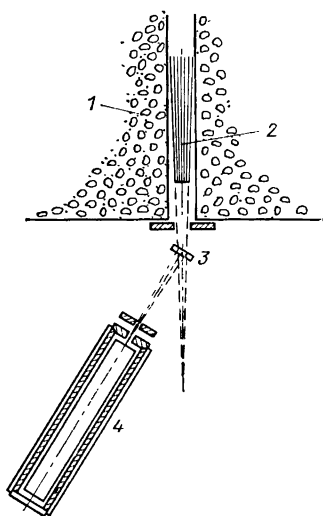


Рис. 6.19. Схема монохроматора с кривыми щелями

Рис. 6.20. Схема кристаллического монохроматора с изогнутым кристаллом [60]:

1 — бетонная защита; 2 — коллиматор в виде пакета сходящихся щелей; 3 — изогнутый кристалл; 4 — счетчик



ше, под небольшим углом к ней прорезаны щели, а перед ротором установлен неподвижный многощелевой коллиматор. При вращении ротора с окружной скоростью v_p монохроматор пропускает нейтроны, летящие со скоростью $v_n = v_p / \operatorname{tg} \alpha$, где α — угол между осью коллиматора и щелями ротора. При легко достижимой окружной скорости 200 м/с монохроматор такого типа может выделять нейтроны со скоростью до 10 км/с, т. е. с энергией до 1 эВ, где его разрешение становится сравнимым с энергией нейтронов, так что возможности такого прибора достаточно ограничены, да и его световая сила из-за необходимости сильного коллимирования потока не очень велика.

Роторы селекторов и монохроматоров лучше располагать в вакууме. Монохроматор с кривыми щелями (рис. 6.19) пропускает частицы со скоростью $v_n = 2\omega R$, где R — радиус кривизны его щелей, а ω — угловая скорость ротора. Этот тип ротора интересен тем, что его разрешающая способность не зависит от v_n и целиком определяется отношением ширины щели к ее стрелке прогиба (с учетом того, что середина ротора, где пересекаются щели, пустая). Этот тип ротора может использоваться для выделения холодных, т. е. очень медленных, нейтронов.

Замечание о роторе с кривыми щелями существенно и для ротора селектора. Как нетрудно сообразить, его прямые щели, имеющие конечную длину, не пропускают нейтроны со скоростью меньше некоторой определенной величины, и прошедший через ротор спектр нейтронов в области малых энергий искажается из-за этого.

Большое распространение получили кристаллические монохроматоры. Нейтроны, как и все элементарные частицы, обладают волновыми свойствами. Длина волны нейтрона при скорости 2200 м/с, соответствующей максимуму максвелловского спектра, составляет

1,8 Å. Таким образом, нейтроны должны когерентно отражаться от кристаллических плоскостей, что и наблюдается в эксперименте. Для монохроматизации нейтронов используют монокристаллы различных веществ, не сильно поглощающих нейтроны, например, свинца и даже кварца *. Для увеличения световой силы прибор делают по тому же принципу, что и некоторые рентгеновские монохроматоры (рис. 6.20). В тех случаях, когда применяется изогнутый, фокусирующий монокристалл, его необходимо, разумеется, не обрабатывать по цилиндрической поверхности, а очень равномерно изогнуть. Некоторые монокристаллы обладают мозаичностью, т. е. имеют отдельные «домены», разориентированные на небольшие углы за счет дислокаций. В определенных пределах мозаичность таких монокристаллов очень полезна: благодаря ей, почти не теряя в разрешающей способности, почти на порядок увеличивается коэффициент отражения нейтронов (рис. 6.21).

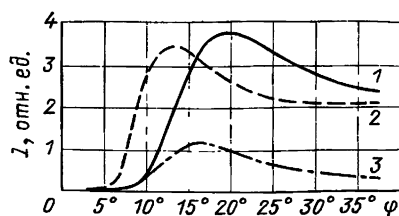


Рис. 6.21. Интенсивность пучков нейтронов, отраженных разными кристаллами [60]:

1 — LiF (100); 2 — кальцит; 3 — LiF, прохождение (100)

Кристаллические монохроматоры позволяют получать пучки истинно моноэнергетических нейтронов с энергией от сотых долей до десятков электрон-вольт и при использовании изогнутых кристаллов работать с очень небольшими образцами. Качество такого прибора зависит главным образом от подбора, умелого выращивания и обработки монокристалла. Нейтроны падают на поверхность под небольшими углами, а их отражение происходит на очень небольшой глубине. Поэтому надо так вырезать из монокристалла пластину, чтобы отражающая плоскость была ориентирована определенным образом и не испорчена наклепом при обработке. В области малых энергий, ниже максвелловского максимума, работе кристаллического монохроматора мешают отражения более высоких порядков от тех же кристаллических плоскостей. Эти отражения менее интенсивны, чем первый порядок, и в спектре dE/E , спадающем с ростом E , сказываются слабо, но в области холодных нейтронов именно они попадают в зону большей интенсивности потока. Для борьбы с этим явлением, как и в оптике, когда накладываются спектры разных порядков, применяют грубую монохроматизацию, например с помощью фильтрации нейтронного потока через слой бериллия.

Кроме стационарных реакторов в нейтронной спектроскопии сейчас используют импульсные электронные ускорители и импульсные реакторы. Например, импульсный ускоритель Института атомной энергии «Факел» дает импульсы электронов длительностью 0,5—0,05 мкс с энергией 25—32 МэВ. Ток электронов в импульсе достигает 0,5 А. γ -Кванты тормозного излучения вырывают быстрые нейтроны из урановой мишени; нейтроны несколько замедляются в во-

* Поскольку у разных изотопов амплитуда и фаза рассеяния неодинаковы, для таких кристаллов предпочтительнее моноизотопный состав.

дородсодержащей мишени и используются для нейтронной спектроскопии по времени пролета с базой до 100 м.

В 1960 г. в Дубне был построен импульсный ядерный реактор на быстрых нейтронах с исследовательской (вакуумированной) трассой длиной 1 км для времяпролетных экспериментов. Этот реактор имел неподвижную зону из подкритического количества ^{239}Pu , разрезанную на две части, между которыми для достижения надкритичности вводились два куска ^{235}U , смонтированные на большом и малом дисках, вращающихся с кратной частотой [66]. Реактор давал нейтронный импульс длительностью 36 мкс, что, конечно, много хуже, чем у линейного ускорителя, поэтому в 1964 г. к нему пристроили ускоритель (микротрон), позволивший увеличить крутизну импульса. Следует отметить, что использование блока делящегося вещества в режиме, близком к критическому, порождает такую физическую проблему, как отсечение фона запаздывающих нейтронов, не говоря уже о проблеме безопасности.

Холодные нейтроны. Нейтроны с энергией тысячные доли электронвольта имеют длину волны, существенно превосходящую межатомные расстояния, и поэтому могут отражаться прямо от оптических плоскостей (не монокристаллических), как от зеркал [8, 60]. Другой их особенностью является отсутствие неупругого взаимодействия с решеткой замедлителя, так как они отражаются, подобно мёссбауэровским γ -квантам, от кристаллической решетки в целом. Когерентный характер рассеяния холодных нейтронов ведет к тому, что для ряда длин волн (энергий нейтронов) при энергии ниже тепловой для таких материалов, как графит и бериллий, наблюдаются большие скачки сечений рассеяния из-за вклада когерентной его части, а при еще меньших энергиях сечение рассеяния падает на порядок. Эта прозрачность к холодным нейтронам используется для их выделения из общего потока. Для сечения поглощения такой эффект отсутствует, в частности и у графита, и у бериллия оно равномерно возрастает по мере уменьшения скорости нейтронов, подчиняясь закону $1/v$.

Следует отметить, что хотя кадмий и является самым удобным материалом для отсекаания потока тепловых нейтронов, но он при этом испускает высокоэнергетические γ -кванты, поэтому, если речь идет о защите, лучше поглощать тепловые нейтроны бором, а еще лучше (но еще неудобнее) — соединениями лития. При изготовлении коллиматоров, которые являются почти непременной принадлежностью спектральных нейтронных исследований, если речь идет об углах коллимации порядка минуты, нельзя забывать о способности нейтронов отражаться от поверхностей, например от поверхности стали [8]. Уменьшить отражение можно либо рифлением коллимирующей ленты, либо ее кадмированием. Очень удобно, если коллиматор пропускает световой луч так же, как и нейтроны, но доверять оценке степени коллимации по коллимации луча света при узких щелях нельзя. Для оценки качества коллимирования лучше всего иметь два одинаковых коллиматора. Тогда, установив один из них по максимуму потока, с помощью тонкого поворота второго коллиматора можно увидеть угловую дисперсию этой системы, а также фон нейтронов при расстройке на малые углы. Полученную функцию, если есть уверенность, что она не зависит от энергии, можно обработать для выявления роли одного коллиматора. Если вторым «коллиматором» является, например, остановленный ротор монохроматора с прямыми щелями, то

полная угловая дисперсия легко пересчитывается в функцию разрешения по скоростям. В более сложных случаях, например при оценке качества кристалла кристаллического спектрометра, можно получить аппаратную функцию разрешения прибора, пользуясь известными параметрами острых резонансов, таких, как у ^{238}U .

Только приборы очень высокого класса — мощные селекторы или ускорительные комплексы с большой пролетной базой позволяют изучать форму линий таких резонансов (как интерферометр Фабри — Перо в оптике позволяет изучать форму спектральной линии). Для приборов же среднего класса запись той же линии является практически записью их функции разрешения. О детекторах нейтронов речь пойдет в следующем параграфе.

Нейтрон радиоактивен; он распадается с периодом 11,7 мин, превращаясь в протон и электрон. Этот распад не сказывается на балансе нейтронов, однако его нужно учитывать, во-первых, с точки зрения появления вокруг нейтронного пучка, даже летящего в вакууме, небольшой β - и протонной активности и, во-вторых, при экспериментах, требующих размещения отпаянных вакуумных систем в значительном нейтронном потоке. В таких системах (сосудах) медленно, но вполне заметно накапливается водород — продукт распада нейтронов.

Обычно сечение нейтронного пучка бывает существенно больше, чем того требует конкретный эксперимент. Поэтому открывание всей апертуры пучка нежелательно. Лучше всего установить в месте, где пучок выходит в зал (послешибера), «коллиматор № 1» — ограничитель пучка, который может ограничить его как по сечению, так и по угловой расходимости, резко снижая фон и навесную активность. Целесообразно также пользоваться различными фильтрами для выделения изучаемой полосы спектра нейтронов, например отсекал тепловые нейтроны. Детектор нейтронов обычно не обладает стопроцентной эффективностью, и часть нейтронов рассеивается за ним, поэтому желательно заключить его в защиту. Прошедший пучок, если он уже не нужен, должен попадать в ловушку — цилиндр с глухим отверстием, заполненный замедлителем (парафином, полиэтиленом) и бором (карбидом бора — стандартным абразивом черного цвета B_4C).

Управление поворотом или перемещением коллиматоров, кристаллов и других устройств следует вывести на пульт, находящийся за защитой. Проще всего не ставить двигатели, а применить сельсины с достаточным крутящим моментом. Если перемещаемое устройство весит сто — двести килограммов, не пугайтесь — это совсем немного. Установите его на шариковые подшипники, как детский самокат, а под них на станину положите шлифованные стальные направляющие и опорные пластины, и Вы повернете ваше устройство очень небольшим усилием. Уберите люфт с помощью оттяжки каретки в одну сторону пружиной, сельсин соедините с устройством червячным механизмом и так рассчитайте передачу, чтобы активная часть поворота или подвижки соответствовала бы от ста до тысячи оборотам сельсина.

Ядерный реактор как устройство для облучения. Когда изучается устойчивость образцов или изделий к нейтронному (и γ -) облучению или если нужно получить заметные количества нуклидов, образующихся под действием нейтронов, требуются значительные дозы нейтронного облучения. Обычно такое облучение производят внутри реактора, в его каналах, воздушных или заполненных водой.

Радационное действие нейтронного потока очень существенно зависит от условий, в которых находится образец, и напротив, при получении новых ядер точное знание состояния образца не так важно, лишь бы не улетучились и не потерялись получаемые нуклиды. Как правило, чем ниже температура образца, тем заметнее на самых начальных этапах изменение его свойств под действием облучения нейтронами.

Если облучать графит потоком относительно быстрых нейтронов, способных выбивать ядра углерода из узлов кристаллической решетки графита в межузлия, то механические свойства графита резко меняются: изделия из него увеличиваются в размерах, становятся тверже, и в их толще накапливается большой запас потенциальной «энергии Вигнера» — энергии образования дислокаций. Если образец облученного при комнатной температуре графита нагреть, то дислокации начнут рекомбинировать с выделением энергии, что при больших размерах образца может привести к его дальнейшему саморазогреву. Именно так произошла крупнейшая в Великобритании авария на низкотемпературном реакторе в Виндскейле, при которой расплавились десятки тонн урана только за счет «энергии Вигнера».

Облучение реакторных материалов, как правило, ведет к изменению их свойств в неблагоприятном направлении: увеличению хрупкости, изменению размеров, деформации, растрескиванию. Ядерное горючее изменяет свои свойства также из-за изменения элементного состава: уран «легируется» плутонием, осколками деления, в том числе такими, как инертные газы и галогены, отнюдь не способствующими улучшению его свойств. Обеспечение длительной работы твэлов ядерных реакторов представляет собой серьезную задачу. Экспериментальные исследования в этой материаловедческой области очень трудны, так как облученные образцы чрезвычайно радиоактивны. Для проведения таких работ при исследовательских реакторах создаются горячие лаборатории, оснащенные оборудованием для дистанционного изучения образцов. Интенсивность γ - и β -излучения подчас столь велика, что недавно облученные образцы твэлов просто нельзя оставить без охлаждения: их выдерживают в бассейнах с водой и лишь через значительное время, когда активность и соответственно температура уменьшатся, подвергают исследованиям.

Другим классом задач является получение радиоактивных изотопов. Некоторые элементы, в том числе такие биологически важные, как сера и фосфор, могут при захвате нейтрона образовывать свои же радиоактивные изотопы, в других случаях облучение нейтронами стабильного нуклида ведет к образованию радиоактивного изотопа другого элемента.

Хорошо, если из всех изотопов облучаемого элемента нейтроны поглощает преимущественно один изотоп, но, как правило, так не бывает, и если облучать в реакторе естественную смесь изотопов, например, железа, то проводить мёсбауэровские эксперименты с ^{57}Fe , дающим γ -излучение энергией всего 14 кэВ, было бы почти невозможно. Поэтому для производства относительно чистых радиоактивных изотопов используют разделенные стабильные изотопы, которые в СССР хранятся в специальном фонде стабильных изотопов.

Исключительно важны (и очень сложны) проводимые на исследовательских реакторах так называемые петлевые эксперименты. Петля — это циркуляционный теплопереносящий контур, охлаждающий помещенный в канал испытываемый образец тепловыделяющего регулирующего элемента или другой конструкции. Иногда циркуляция организуется с иной целью, например облучить в реакторе определенный нуклид и вынести его наружу, чтобы получить свободное от нейтронов γ -излучение (индий-галлиевый контур). В реакторостроении из-за огромной остаточной активности ошибки конструкторов и технологов обходятся очень дорого. В процессе эксплуатации, если обнаружатся дефекты сварки швов, незамеченные резонансные частоты, неучтенные особенности гидродинамических режимов, исправить что-либо будет очень трудно. Поэтому сейчас ни одна новая конструкторская разработка не получает путевки в жизнь без тщательных петлевых испытаний.

Ядерный реактор как объект исследования. В первые десятилетия после осуществления цепной реакции деления теория ядерного реактора была развита недостаточно, не было вычислительных машин и сложных программ для расчетов, не было надежных нейтронно-физических констант для проведения многогрупповых расчетов. Поэтому каждый реактор перед его строительством моделировали, определяя спектр нейтронного потока и экспериментально оценивая нужную для данной конструкции степень обогащения горючего ^{235}U .

В настоящее время, конечно, положение иное. Сейчас совершенные программы позволяют достаточно точно рассчитать большое количество вариантов сложных систем, что и делается при создании любого нового типа реактора.

В связи с этим сейчас, быть может, не так, как раньше, остра потребность в нейтронно-физическом изучении реакторной сборки. В то же время современные «пакетные» конструкции твэлов представляют собой для расчета весьма сложные объекты, а если учесть, что часто охлаждающая вода в них находится в режиме кипения с переменной вдоль оси канала плотностью, то ясно, что расчетчики и сейчас корректируют свои оценки по результатам хорошо поставленных экспериментов на критических сборках.

В промышленном ядерном реакторе изучать профили нейтронного потока и спектры невозможно, так как для этого нужно закладывать индикаторы на поперечное сечение ячейки. Поэтому критические сборки создаются и сейчас. Сложность получения ценных данных состоит в том, что нужно смоделировать работающий в разных режимах реактор с помощью имеющегося в наличии ограниченного «снаряжения» — макетов твэлов, конечно, с ураном, но не обязательно выполненных так, чтобы выдерживать высокие температуру и давление. Моделировать горячую воду, имеющую меньшую плотность и даже суспензию воды и пара, не очень трудно: для таких целей годится полиэтиленовая крошка, полистироловые шарики и др. В водородсодержащих средах замедляет в основном водород, поэтому при моделировании нужно учитывать именно его плотность, обращая меньше внимания на углерод и кислород.

Нагрев замедлителя ведет к смещению спектра тепловых нейтронов и довольно сильному изменению средних тепловых эффективных сечений. Если бы все они подчинялись закону $1/v$, то это было бы не так существенно, но важнейший делящийся материал — ^{235}U в области, переходной от тепловой к резонансной, около 0,3 эВ, имеет довольно заметный резонанс, так что отношение реакторных констант зависит от «температуры» (средней энергии) нейтронов в активной зоне реактора. Нагреть графит критической сборки до 300 и даже 400 °С вполне возможно, но при этом возникает сложность с моделированием воды — все водородсодержащие вещества, кроме, пожалуй, гидрида циркония, такой нагрев при атмосферном давлении не перенесут.

Видимо, при оценке необходимости высокотемпературных экспериментов на критических сборках следует быть осторожными. Преодолеть технические трудности, конечно, можно: ведь существуют же полиомасштабные реакторы, но беда как раз в том, что усложнение сборки лишает ее тех преимуществ, ради которых ее делали.

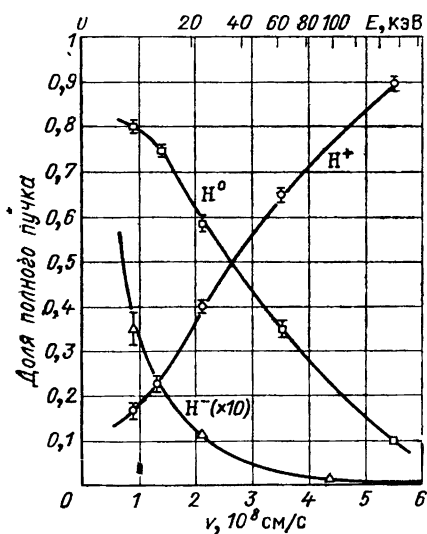
6.2. ПРОНИКАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ И ФИЛЬТРАЦИЯ РАЗЛИЧНЫХ ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Тяжелые заряженные частицы

К этим частицам обычно относят частицы с массой от протона до осколка деления; заряд частиц колеблется от одного до нескольких десятков электронных зарядов. При движении в веществе средний равновесный заряд частицы зависит от ее скорости.

Например, протоны при торможении в алюминиевой фольге существуют в трех зарядовых состояниях: H^+ , H^0 (атом водорода) и H^- , а вероятность нахождения в одном из состояний зависит от скорости (энергии) протона (рис. 6.22).

При энергии, большей нескольких сот килоэлектронвольт, протоны и α -частицы движутся через



вещество с максимальным положительным зарядом Z и соответственно максимальной тормозной способностью, пропорциональной Z^2 . При падении их энергии ниже указанного значения те же частицы часть пути движутся в виде однозарядных ионов и нейтральных атомов, что ведет к снижению тормозных потерь в конце трека. В то же время осколки деления очень прочно удерживают электроны своих внутренних оболочек, поэтому их

Рис. 6.22. Равновесие между H^+ , H^0 и H^- в алюминиевой фольге как функция скорости (энергии) протонов [31]

равновесный заряд много меньше атомного номера и сразу после начала движения в веществе начинает убывать. Отсюда практическое следствие: если нужно регистрировать акты деления на фоне многочисленных α -распадов, а это классическая задача для физики нейтронов и физики деления, то не нужно делать камеру деления так, чтобы в газе уместился весь трек. Контраст ионизации α -частиц и осколков по первой половине трека больше, чем по всему треку, и выгоднее зазоры в камере деления делать меньше пробега осколков.

Тяжелые частицы, сталкиваясь с электронами, почти не отклоняются, их треки прямые и разброс пробегов не превышает 1—2 %. Некоторое количество частиц сталкивается с ядрами: таких частиц сравнительно немного, но при столкновении получается рассеяние на большие углы или даже ядерная реакция.

Часто предполагают, что тормозная способность вещества по отношению к заряженным частицам пропорциональна плотности тормозящих электронов на 1 см² мишени. Это не совсем так по следующей причине. Чтобы электрон внес свой вклад в торможение налетающей частицы, он должен сам изменить траекторию. Это легко делают внешние валентные электроны, в то время как внутренние электроны тяжелых мишеней гораздо прочнее связаны со своей орбитой и если не меняют ее, то не вносят вклада в торможение. Тормозная способность легких элементов для заряженных частиц, нормированная на 1 г/см², существенно больше, чем тяжелых [31]. По мере увеличения энергии заряженных частиц и приближения их скорости к скорости света эта разница в тормозной способности, естественно, уменьшается.

Тяжелые заряженные частицы, особенно многозарядные ионы, вызывают в твердых телах необратимые повреждения — смещения атомов из решетки, и даже каналы проплавления. В связи с этим такие частицы чаще других повреждают элементы микроэлектронной техники.

Тормозное рентгеновское излучение тяжелых частиц с энергией в несколько мегаэлектронвольт очень мало. Релятивистские тяжелые частицы дают значительное вторичное излучение. На рис. 6.23 показана зависимость пробега α -частиц в воздухе от их энергии, на рис. 6.24 — протонов в водороде, воздухе и алюминии, на рис. 6.25 — зависимость экстраполированного пробега осколков деления в воздухе от их массового числа и на рис. 6.26 — экстраполированный пробег электронов в алюминии.

Быстрые электроны

Быстрые электроны тормозятся на своих же собратьях. Казалось бы, что при этом будет происходить немедленное рассеяние электронного пучка, но только если неявно предполагать потерю энергии в процессе прямых соударений. На самом деле энергия теряется при слабых кулоновских взаимодействиях, в основном порциями в десятки электронвольт. Характерное значение единичной

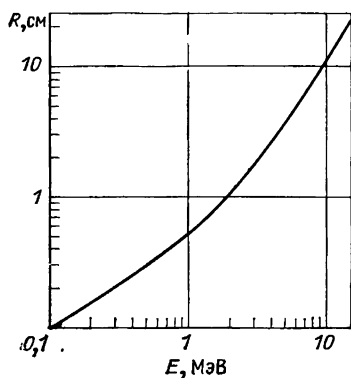


Рис. 6.23. Зависимость пробега α -частиц в воздухе от энергии [31]

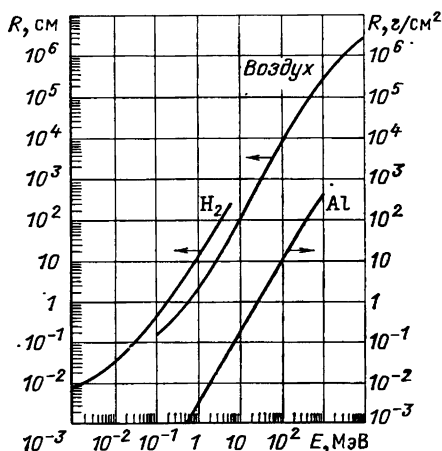


Рис. 6.24. Зависимость пробега протонов от энергии в водороде, воздухе и алюминии [31]

потери энергии 30 эВ составляет малую долю от энергии электронов масштаба 10^5 эВ, но скорость пропорциональна \sqrt{E} и потеря 30 эВ на фоне 10^5 эВ ведет к приобретению перпендикулярной компоненты скорости, отклоняющей электрон на угол порядка одного градуса. Сто взаимодействий, приведя к потере энергии 3000 эВ, приведут, по законам статистики, к рассеянию на 10° и т. д. Конечно, это упрощенная картина, но электронный пучок действительно рассеивается в таких примерно масштабах. Опять-таки нельзя забывать о том, что внутренние электроны в тяжелом ядре хорошо за-

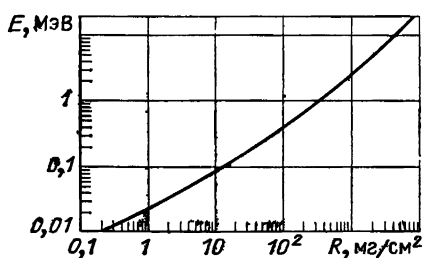
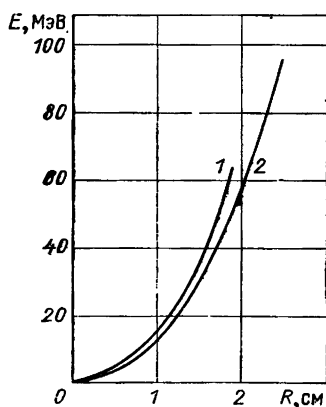


Рис. 6.25. Зависимость экстраполированного пробега электронов в алюминии от их первоначальной энергии [31]

Рис. 6.26. Зависимость экстраполированного пробега осколков деления в воздухе от их массового числа [31].
1 — тяжелый осколок; 2 — легкий осколок

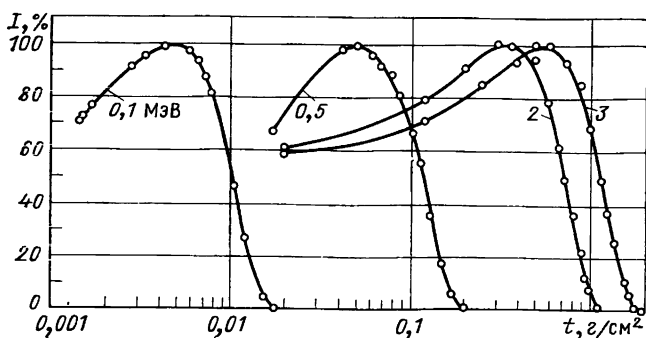


Рис. 6.27. Распределение плотности энерговыведения электронов в алюминиевой мишени по глубине для электронов с различной первоначальной энергией [31]

креплены, зато само ядро может сильно отклонить летящий электрон, проникший к внутренним орбитам, не меняя его энергии. Поэтому, чем больше Z вещества мишени, тем больше коэффициент диффузного отражения электронного пучка от толстой мишени.

Быстрые электроны испускают тормозное излучение тем в большей степени, чем больше они подвергаются ускорениям. Поэтому в веществах с большим Z доля энергии, идущая на тормозное излучение, также больше. Мощность тормозного излучения, Вт, испускаемого при прохождении электронов через тонкую мишень, можно оценить по формуле:

$$W = 19(E + 511)Z^2\rho di/A,$$

где E — энергия электронов, кэВ; Z и A — заряд и массовое число ядер мишени; ρ — плотность мишени, г/см³; d — толщина мишени, см.; i — ток электронного пучка, мА. Формула верна при $E \leq 1$ МэВ и при небольших потерях энергии в мишени.

Для толстой мишени, в которой электроны полностью тормозятся, справедлива формула

$$W = 3 \cdot 10^{-6} E^{1.75} Zi.$$

Энергетический спектр тормозного рентгеновского излучения лишь в небольшом количестве содержит кванты, соответствующие полной энергии электронов. Угловое распределение рентгеновского излучения при небольших энергиях (сотни килоэлектронвольт) достаточно изотропно, а при энергиях десятки мегаэлектронвольт направлено преимущественно вперед.

Плотность энерговыведения электронного пучка I в мишенях или облучаемых средах неоднородна по глубине (рис. 6.27). Вначале она возрастает из-за увеличения тормозной способности электронов и неперпендикулярного пересечения ими последующих плоскостей, а затем убывает; при обработке мишеней с помощью электронного луча лучше облучать их с двух сторон.

Сюит обратить внимание еще на один факт — самофокусировку мощного электронного пучка в воздухе. Если из ускорителя выводится в воздух пучок быстрых электронов, то можно наблюдать, как при увеличении мощности пучка (до долей киловатта и более) пучок из быстро рассеивающегося превращается в хорошо сформированный факел. Стягивание пучка вызывается ионами, остающимися в газе при сильной его ионизации пучком.

Электроны вызывают в твердых телах гораздо меньше повреждений, чем ионы. Например, чтобы в монокристалле германия выбить атом в межузلية, электрон должен иметь энергию не менее 0,5 МэВ. Электроны, затормаживаясь в веществе, не создают в нем примеси других элементов, как это происходит в случае нейтронов и тяжелых частиц, и поэтому электронные пучки не могут в полной мере моделировать другие виды излучений, если испытываемые материалы будут облучаться затем в нейтронном потоке или тяжелыми частицами. На относительной устойчивости неорганических соединений к действию электронного луча большой мощности основано использование электронно-лучевых пушек для испарения таких окислов, как SiO_2 , ZrO_2 , ThO_2 в целях изготовления диэлектрических покрытий. Испарение ведут иногда в не очень хорошем (окислительном) вакууме, чтобы отдельные атомы, потерявшие кислород, успели окислиться.

Надежно измерить среднюю дозу рентгеновского излучения от импульсных электронных пушек, работающих в частотном режиме, можно только с помощью дозиметрической фотопленки или емкостного дозиметра — «карандаша». Использование дозиметров со счетчиками, даже люминесцентными, ненадежно, если импульс длится доли микросекунды, т. е. меньше, чем разрешающее время счетчика. Получается, что начиная с некоторой интенсивности дальнейший рост мощности излучения как бы прекращается, так как прибор просто не может дать больше чем 1—2 отсчета за время импульса. Однако если дозиметрический прибор измеряет ток ФЭУ, а не количество импульсов, то такой прибор можно использовать с большим основанием.

γ-Излучение

γ-Излучение рассеивается и поглощается в веществе в результате трех процессов: комптоновского рассеяния, фотоэффекта и эффекта образования электронно-позитронных пар в поле ядра.

Если речь идет об ослаблении узкого моноэнергетического пучка γ-излучения, то его интенсивность уменьшается экспоненциально (рис. 6.28).

Из узкого пучка γ-квант выбывает при любом рассеянии, и его дальнейшая судьба может не учитываться, а в случае широкого потока излучения рассеявшийся γ-квант продолжает движение в пучке. Поэтому, когда приходится иметь дело с широкими потоками γ-излучения от точечного источника либо от источника, который можно считать плоским (атомный реактор), принято оценивать ос-

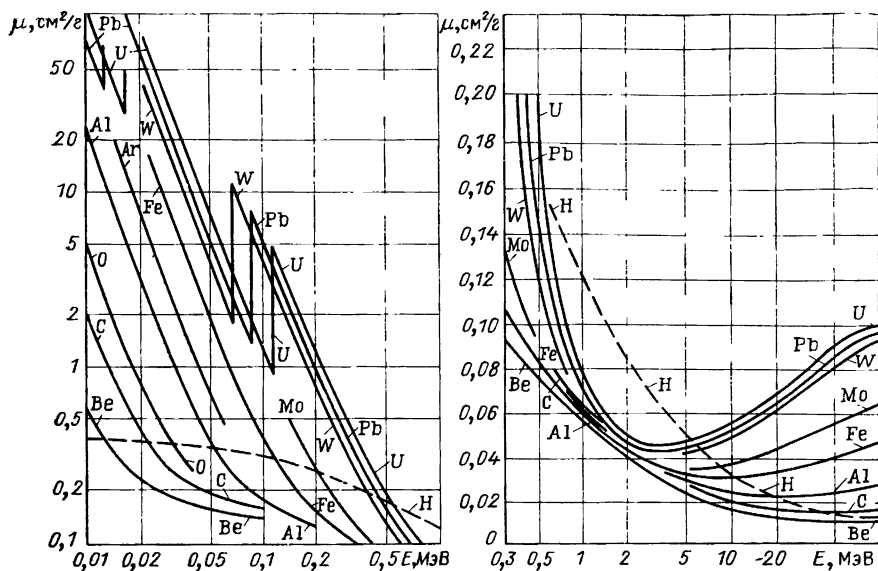


Рис. 6.28. Массовые коэффициенты ослаблений γ -излучения в узком пучке для ряда элементов [31]

лабление γ -излучения следующим образом. Оценивают ослабление узкого пучка в среде с теми же свойствами, а затем учитывают увеличение прозрачности защиты с помощью «фактора накопления» — не совсем удачного, быть может, термина, означающего, во сколько раз ослабление широкого пучка данной защитой меньше, чем узкого [31].

γ -Излучение за счет комптоновского рассеяния частично отражается от блоков защиты. При проводке мощных его пучков следует это учитывать и поглощать прошедший пучок в ловушке.

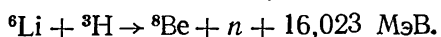
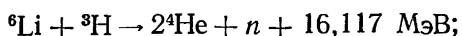
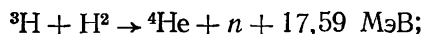
При воздействии γ -излучения на материалы и биологические ткани образуются быстрые электроны и позитроны и поэтому оно по своим последствиям при равенстве доз неотличимо от действия прямого электронного пучка. Можно отметить, что при энергиях в десятки мегаэлектронвольт пучок γ -излучения и пучок электронов в материале мало различаются, так как эти два вида излучения попросту переходят друг в друга. Разумеется, это относится только к поглощающей среде, а не к вакууму.

Нейтроны

Нейтроны, даже медленные, могут проходить через очень значительную толщину некоторых веществ и в этом отношении сравнимы с высокоэнергетическим γ -излучением. Однако происходящие при поглощении нейтронов взаимодействия гораздо более разнообразны. Огромным отличием с практической точки зрения является об-

разование радиоактивных нуклидов (активация), что заставляет выбирать для поглощения нейтронов малоактивирующиеся материалы.

Наиболее трудно поглощаются очень быстрые нейтроны, с энергией 12—17 МэВ, в небольшом количестве присутствующие в спектре нейтронов деления, а также рождающиеся при термоядерных реакциях:



Первая из этих реакций, имеющая максимальное сечение, равное 4,5 б, часто используется в ускорителях для получения очень быстрых нейтронов.

У нейтронного эффективного сечения есть особенность: при больших энергиях оно существенно падает, становясь меньше геометрического сечения ядра-мишени. Этот эффект «прозрачности» ядер для быстрых нейтронов затрудняет перехват и быстрое замедление. Например, для водорода [31] сечение при 1 МэВ равно 4 б, а при 10 МэВ — 1 б, для молекулы воды соответствующие значения 15 и 3 б. При сечении 3 б пробег нейтрона в воде до первого столкновения равен 10 см, а для нейтронов энергией 14 МэВ значение еще больше.

Поэтому защита от нейтронов такой энергии эффективна только при значительной толщине и выполняется обычно из материалов, содержащих как тяжелые, так и легкие ядра (например, железобетонная защита).

Быстрые нейтроны с энергией 0,5—3 МэВ достаточно легко замедляются в воде; их длина замедления для нейтронов спектра деления составляет 6,5 см. Из-за падения сечения при большей энергии эта длина сильно зависит от начальной энергии замедляющихся нейтронов.

Для воды, длина диффузии тепловых нейтронов в которой невелика (2,77 см), распределение тепловых нейтронов практически соответствует распределению самых быстрых нейтронов от источника (рис. 6.29). На больших расстояниях от источника интенсивность нейтронного потока убывает экспоненциально.

Для хороших замедлителей, графита и тяжелой воды, длина диффузии больше длины замедления: для графита длина диффузии 50, а замедления — 20 см; для D_2O — 170 и 11 см. Поэтому распределение тепловых нейтронов в этих средах будет очень сильно «размазываться» по сравнению с распределением быстрых и резонансных (замедляющихся) нейтронов.

При поглощении нейтронов в веществе возникает γ -излучение. Нейтрон в ядре имеет энергию связи около 8 МэВ [60], и значительная ее часть испускается обычно в виде нескольких высокоэнергетических γ -квантов. Это излучение в значительной части исходит из периферических зон защиты и является весьма проникаю-

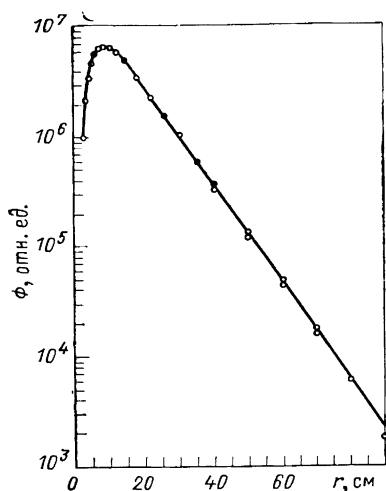


Рис. 6.29. Распределение тепловых нейтронов от RaBe-источника в воде [60]

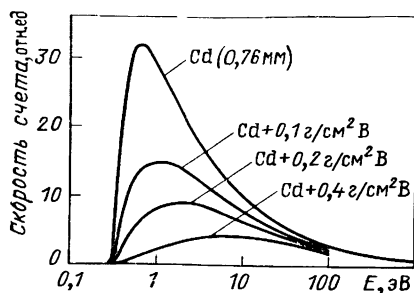


Рис. 6.30. Спектр нейтронов, выделяемых борно-кадмиевыми фильтрами и регистрируемых детектором $1/v$ [31]

щим: γ -кванты с энергией 2—5 МэВ поглощаются веществом меньше всего, и это заставляет увеличивать размеры защиты. С этой точки зрения лучше поглощать нейтроны бором или литием, чем кадмием [8].

Как следует из кривых поглощения, быстрые нейтроны довольно трудно отделить от γ -излучения. В то же время это не очень сказывается на проведении исследований: детекторы быстрых нейтронов можно сделать малочувствительными к γ -излучению. Обратная задача — регистрация γ -излучения в присутствии нейтронного фона решается с трудом, но и необходимость ее решения обычно невелика: если нужен мощный поток γ -квантов, его обеспечивает или остановленный, недавно работавший реактор, или источник ^{60}Co , не испускающий нейтроны.

Резонансные нейтроны представляют собой промежуточную энергетическую группу нейтронов с энергией от долей электронвольта до нескольких килоэлектронвольт, их легко отделить от тепловых и околотепловых нейтронов, пропуская реакторный пучок через набор подходящих фильтров: кадмия, кадмия с бором и т. д. Полностью отделить резонансные нейтроны от быстрых трудно, однако если, например, пользоваться детектором с чувствительностью, пропорциональной $1/v$, то в спектре резонансных нейтронов dE/E скорость счета детектора будет зависеть от энергии как $(dE/E)^{3/2}$, т. е. регистрироваться будут преимущественно достаточно медленные нейтроны. Подбором толщины борного фильтра максимум спектра прошедших нейтронов можно перемещать по энергетической шкале (рис. 6.30). Мощные потоки тепловых нейтронов также трудно получить в чистом виде.

Пучки тепловых нейтронов получают из канала, кончающегося в отражателе, а вклад нейтронов высоких энергий вычитают с помощью опытов с кадмиевым фильтром и без него. Менее интенсив-

ные пучки из внешних частей отражателя и тепловой колонны могут быть практически свободны от примеси быстрых и резонансных нейтронов. Эксперименты с тепловыми нейтронами — одни из наиболее простых в нейтронной физике. Эти нейтроны легко селективировать по скорости, коллимировать и детектировать. Они отражаются от зеркал, преломляются, дают при отражении от кристаллических плоскостей брэгговскую картину, которая используется для расшифровки кристаллической структуры. Рентгеновское излучение хорошо рассеивается только атомами с большим Z , поэтому положение атомов водорода в кристалле с их помощью определить невозможно. Нейтроны хорошо рассеиваются атомами водорода и позволяют определить их положение. Взяв кристалл, в котором водород заменен дейтерием, можно по изменению интенсивности отдельных максимумов когерентного рассеяния судить об их принадлежности к рассеянию именно на атомах водорода.

Описанная методика называется нейтронографическим анализом и, несмотря на большую сложность, чем при рентгеноструктурном анализе, применяется при изучении водородсодержащих кристаллов. Один из способов снятия нейтронной лауэграммы на фотопластинку заключается в использовании активации индиевой фольги. Фотопластинка прикрывается индиевой фольгой и устанавливается за образцом, на который направляется хорошо коллимированный узкий пучок тепловых нейтронов. Таким образом, на пластинку действуют β -частицы, испускаемые индием, облученным нейтронами. После многочасовой экспозиции пластинка проявляется. Разумеется, важно вместе с нейтронами столь же хорошо коллимировать и γ -излучение реактора.

Холодные нейтроны — нейтроны с очень малыми скоростями. Этих нейтронов в максвелловском спектре довольно мало. Благодаря когерентности рассеяния на кристаллической решетке для нейтронов, длина волны которых больше максимального расстояния между соседними кристаллическими плоскостями рассеивателя, наблюдаются провалы сечения рассеяния. Поэтому относительная доля холодных нейтронов сильно возрастает при диффузии нейтронов через такие кристаллические рассеиватели, как графит и окись бериллия. Граница когерентного рассеяния для окиси бериллия лежит при $4,5 \text{ \AA}$, а для графита при $7,5 \text{ \AA}$ (скорости соответственно 877 и 525 м/с). Длина волны, \AA , скорость, м/с, и энергия, эВ, нейтронов связаны между собой соотношениями:

$$v\lambda = 3,95 \cdot 10^3; \quad \sqrt{E} = 7,22 \cdot 10^{-8} v.$$

6.3. РЕГИСТРАЦИЯ ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Детекторы излучений должны обладать самыми различными характеристиками: определять энергию частицы, ее траекторию, точное время события, а иногда и визуализировать картину ядерных процессов.

Вначале мы опишем особенности детекторов, которые при прохождении частицы на выходе дают импульс тока, затем перейдем к интегральным токовым детекторам как предельному случаю импульсных, а типы детекторов, создающих видимую картину события, рассмотрим отдельно.

Ионизационные камеры

Самым простым детектором по физическому принципу действия является ионизационная камера [59]. Она представляет собой газонаполненный конденсатор, внутри или в стенках которого образуются заряженные частицы, вызывающие импульс тока. Параметрами такого детектора являются: состав и давление газа, объем, среднее расстояние между электродами, материал стенок.

Электроны обладают гораздо большей подвижностью, чем ионы, поэтому в ионизационной камере вначале наблюдается импульс от электронов, связанный с токами смещения от движущихся электронов и с их приходом на электроды. Время собирания электронов составляет обычно 10^{-7} — 10^{-6} с. Ионы собираются гораздо медленнее, за время 10^{-4} с, амплитуды (токовый интеграл) от ионов и электронов в электроположительном газе, естественно, равны.

Поскольку амплитуда шумов пропорциональна ширине полосы пропускания, работать с малым RC в режиме электронного собирания с этой точки зрения не очень выгодно; импульс упадет вдвое, а шумы не будут подавлены. Однако значительная скорость счета часто вынуждает работать с постоянной времени, чуть большей времени электронного собирания данной камеры. Определить это время можно по зависимости амплитуды импульса после RC -цепочки от ее номинала; как только линейный рост импульса с увеличением RC сменится насыщением, дальнейшее увеличение RC производить не следует.

Ионизационная камера собирает только те заряды, которые образованы самой частицей. Известно, что заряженная частица тратит на образование пары ион — электрон около 30 эВ. Импульсные ионизационные камеры обычно применяют для регистрации тяжелых частиц, например, при пролете в камере α -частицы энергией 5 МэВ образуется электронный заряд $1,66 \cdot 10^5 e = 2,66 \cdot 10^{-14}$ Кл. При емкости небольшой камеры вместе с входом предусилителя около 30 пФ амплитуда сигнала будет $U = Q/C = 0,88$ мВ; такой сигнал регистрируется довольно легко, однако чтобы обеспечить минимальную погрешность α -спектрометрии, необходимо тщательное приготовление образца, который должен быть нанесен тончайшим слоем, и чистая атмосфера в камере. Последнее обстоятельство очень важно: электрон на всем пути до собирающего электрода (порядка 1 см) не должен превратиться в отрицательный ион, т. е. «прилипнуть» к молекуле электроотрицательного газа.

Это требует высокой чистоты газа (до сотых долей процента). Поскольку камера для размещения препарата обычно разборная, то ее наполнению газом

должна предшествовать тщательная откачка и обезгаживание. Следует отметить, что в камере за время электронного собирания τ будет протекать небольшой ионный ток, зависящий от направления трека по отношению к полю (ток смещения). Поэтому в режиме электронного собирания довольно трудно обеспечить постоянство «электронных» импульсов. Для защиты от токов смещения и задержки ионов спектрометрические камеры электронного собирания снабжаются сеткой, расположенной перед собирающим высоковольтным электродом [59]. Сетка экранирует электрод от токов смещения, и импульс уже мало зависит от направления трека. Потенциал сетки несколько ниже потенциала высоковольтного собирающего электрода.

Камеры ионного собирания дают большую независимость амплитуды импульса от направления трека, но, конечно, резко уступают камерам электронного собирания по допустимой скорости счета. Чистоту газа в камере можно обеспечить, вводя в нее геттеры, и после напуска газа очищая атмосферу с их помощью. Можно использовать специальные геттеры в виде таблеток или колечек, выпускаемых электронной промышленностью. Их нужно разместить на нагревателе, при откачке прогреть до темно-красного каления, а после напуска газа вновь подвергнуть нескольким циклам нагрева и медленного охлаждения. Геттеры нужно расположить так, чтобы их нагрев вызывал конвективные токи, перемешивающие газ. Если камера не имеет большой резиновой прокладки, органических изоляторов и т. п., то таким путем можно не очень быстро, но хорошо очистить инертный газ. Признаком очистки являются прекращение роста амплитуды электронных импульсов и хорошее энергетическое разрешение. Высокое давление, равное атмосферному или даже больше, не позволяет пользоваться газовым разрядом, который намного ускоряет работу геттеров.

Важной разновидностью импульсных ионизационных камер являются камеры деления. Это камеры, на электроды которых наносится тонкий слой делящегося вещества; при помещении такой камеры в поток нейтронов количество отсчетов пропорционально интегралу по энергии от произведения сечения деления на плотность потока нейтронов.

Слой делящегося вещества на поверхности электродов камеры не следует делать толще 1 мг/см^2 из-за самопоглощения осколков в слое. Чем толще слой, тем более крутой будет зависимость скорости счета от напряжения.

Осколок деления несет большую энергию и образует в плотном треке много электронов. Если напряжение на камере достаточно велико для быстрого рассасывания трека, а газ достаточно чист (такой чистоты, как в спектрометрической камере, не требуется), то скорость счета камеры при постоянном источнике нейтронов стабильна с погрешностью до десятых долей процента. У камер деления по сравнению с другими приборами для счета нейтронов два важных преимущества.

Первое преимущество — отсутствие собственного и возникающего под влиянием γ -излучения фона. Импульсы осколков деления столь велики, что при разумной дискриминации все остальные сигналы и шумы пропадают. Поскольку ионизация от осколка больше в начале, а от α -частицы в конце пробега, то при выборе *ppd* каме-

ры (произведение давления на плотность и расстояние между электродами) подбирают эти параметры камеры так, чтобы для большинства углов вылета осколков и α -частиц их пробег укладывался в зазоре примерно наполовину. Это еще больше увеличивает отношение амплитуды импульсов осколков к импульсам α -частиц.

Сечение деления не столь велико, чтобы один или два тонких слоя делящегося вещества могли бы привести к заметному захвату нейтронов, т. е. высокой эффективности камеры. При значении $\sigma_f = 500$ б, характерном для тепловых нейтронов, эффективность одного слоя толщиной 1 мг/см^2 , расположенного поперек нейтронного потока, составляет $1,3 \cdot 10^{-3} \approx 0,1 \%$. Обычно при тех значениях интенсивности, которые характерны для нейтронных пучков, этого достаточно, но в спектрометрии эффективность нужна побольше. Применяя косое падение нейтронного потока или многослойную камеру, или то и другое вместе, можно повысить эффективность.

Второе преимущество камеры деления состоит в том, что, используя разные активные вещества, например ^{235}U или ^{238}U , можно в первом случае регистрировать в основном тепловые нейтроны, а во втором — только быстрые, энергия которых больше порога, характерного для данного нуклида. В табл. 6.1 приведены характеристики пороговых детекторов деления.

Т а б л и ц а 6.1. Характеристики пороговых детекторов деления [31]

Нуклид	$E_{\text{п}}$, МэВ	σ_0 , мб	$E_{\text{п, эф}}$, МэВ	σ , мб
^{234}U	$\sim 0,3$	1500	0,62	1200
^{237}Np	$\sim 0,4$	1500	0,87	1100
^{236}U	$\sim 0,7$	850	1,25	520
^{232}Th	$\sim 1,3$	140	1,40	28
^{238}U	$\sim 1,3$	600	1,55	300

П р и м е ч а н и е. $E_{\text{п}}$ — пороговая энергия нейтронов; σ_0 — сечение деления на плато; $E_{\text{п, эф}}$ — эффективный порог деления на спектре нейтронов деления; σ — среднее сечение, взвешенное по спектру нейтронов деления.

В связи с тем, что камера деления практически нечувствительна к γ -излучению, ее можно использовать в качестве датчика при запуске ядерного реактора. Мощный фон остаточного γ -излучения не мешает ей обнаруживать слабый нейтронный поток.

Импульсные ионизационные камеры можно применять для регистрации α -активных аэрозолей в воздухе, однако в этом случае уже нельзя работать на электронном собирании: пары воды и кислород образуют отрицательные ионы.

При прокачке воздуха через такую камеру можно измерить только довольно высокий уровень активности порядка десяти ПДК, к тому же камера засоряется осевшими в ней аэрозолями. Поэтому уровень α -активности воздуха чаще измеряют, прокачивая его через бумажный фильтр и затем измеряя α -активность фильтра.

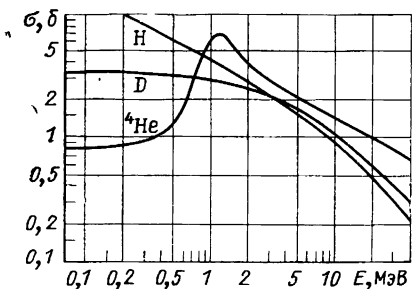


Рис. 6.31. Зависимость сечения рассеяния нейтронов от энергии на протонах, дейтронах и ядрах гелия [60]

Импульсные ионизационные камеры можно также использовать для регистрации быстрых нейтронов по протонам отдачи [60]. В этом случае энергия протона отдачи равна энергии нейтрона, умноженной на квадрат косинуса угла рассеяния:

$$E_p = E_n \cos^2 \varphi.$$

Угловое распределение рассеяния, вплоть до 10 МэВ, сферически-симметрично в координатах центра тяжести, а в лабораторной системе

$$\omega(\varphi) d\varphi = 3 \sin \varphi \cos \varphi d\varphi,$$

где $\omega(\varphi) d\varphi$ — вероятность рассеяния в интервал углов $(\varphi, \varphi + d\varphi)$.

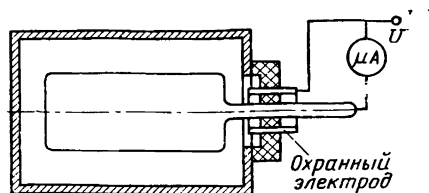
Если регистрируемые нейтроны моноэнергетичны, то образование протона отдачи с любой энергией от 0 до E_0 равновероятно [8, 61]. Если с помощью амплитудного анализатора зафиксировать спектр импульсов протонов отдачи, то по этому спектру, решив с помощью ЭВМ интегральное уравнение, можно с достаточной точностью восстановить спектр нейтронов. Для этого придется учесть зависимость вероятности регистрации нейтрона от энергии, т. е. $\sigma(E)$ (рис. 6.31).

Обычная ионизационная камера, как и камера деления, может регистрировать частицы, вылетающие из ее стенок. Например, стенки камеры могут быть покрыты бором, который по реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha) \rightarrow ^7\text{Li}$ испускает α -частицы. В этом случае камера может быть наполнена благородным газом и работать в режиме электронного собирания. Если использовать для наполнения камеры газообразный BF_3 , то эффективность камеры будет выше, но этот газ является электроотрицательным, и камера будет работать только в режиме ионного собирания.

В большинстве работ утверждается, что в импульсном режиме ионизационные камеры с трудом могут регистрировать быстрые электроны и γ -излучение из-за большого пробега электронов. Конечно, для воздушных камер это так, но пробег электронов скорее всего можно резко сократить, используя ксеноновую камеру высокого давления. Такая камера, наполненная очень чистым ксеноном, должна будет регистрировать электроны так же, как камера обычного давления регистрирует протоны той же энергии.

Не всегда требуется вести счет отдельных импульсов. Очень часто проще измерить средний ток. Это удобнее, например, при измерении γ -активности в помещениях или при большом количестве импульсов, которые легче проинтегрировать по току, чем регистрировать отдельно. При измерении среднего тока камеры спектромет-

Рис. 6.32. Ионизационная камера с охранным электродом для измерения слабого тока



рия частиц по энергии невозможна, как и селективная регистрация частиц только одного сорта.

Однако подчас это не ухудшает удобства пользования камерой. Борная камера (со стенками, покрытыми бором) регистрирует суммарное нейтронное и γ -излучение, но можно добавить к ней эквивалентную секцию без слоя бора, которая будет регистрировать только γ -излучение. Тогда разность тока двух камер даст чистый эффект от нейтронов; конечно, этим приемом широко пользуются.

Ток ионизационной камеры зависит от приложенного к ней напряжения только в самом начале ее вольт-амперной характеристики, затем, обычно при напряжении не более 1000 В, ток выходит на плато, означающее, что собраны все заряды. При работе с импульсами напряжение выхода на плато не зависит от скорости счета. При работе в токовом режиме, когда число треков очень велико, напряжение выхода на плато повышается, начиная с некоторого критического тока, при котором возникает «интерференция» треков. Это явление ведет к отступлению характеристики камеры от линейности и даже к тому, что ток перестает существенно зависеть от интенсивности облучения. Для того чтобы избежать работы в таком бессмысленном, а иногда и опасном режиме, необходимо снять кривые выхода на плато по напряжению для всех интенсивностей (нейтронного) потока, при которых предполагается работать.

У камер для измерения небольшой активности изоляторы должны быть очень высокого качества, но могут обладать невысокой устойчивостью к облучению. Раньше в этих случаях часто применяли янтарь, но сейчас имеется много других достаточно хороших пластиков. Камеры для измерения мощных потоков излучения следует делать с керамическими изоляторами, лучше всего, видимо, из Al_2O_3 , металлизированного по торцам.

Хорошо известен прием, именуемый введением охранного электрода. Охраненный электрод (рис. 6.32) имеет потенциал, почти равный потенциалу измерительного электрода, что сводит утечку по изолятору (от измерительного электрода к охранному) к минимуму. Ток ионизационной камеры, в зависимости от вида излучения и конструктивных особенностей, по-разному зависит от давления в ней газа. Например, ток камеры с BF_3 при малом давлении, когда пробег α -частиц больше расстояния между электродами, пропорционален квадрату давления, так как с ростом давления возрастает как количество α -частиц, так и составляемая ими в газе энергия. Если пучок γ -излучения проходит сквозь камеру, не задевая ее электроды, а камера наполнена тяжелым газом так, что ионизацию производят главным образом электроны, родившиеся в газе, а не в стен-

ках, то ток тоже будет пропорционален квадрату давления, но если ионизацию вызывают электроны из стенок, ток будет линейно зависеть от давления. И другой пример: у камер с борным покрытием на электродах при достаточном давлении, когда пробег α -частиц меньше расстояния между электродами, ток не зависит от давления. Естественно, при чрезмерном повышении давления увеличившаяся рекомбинация приведет к падению тока камеры.

Если отключить ионизационную камеру от источника напряжения и установить в нее высококачественные изоляторы, то ее разряд как конденсатора будет пропорционален дозе облучения. Отечественная промышленность выпускает соответствующие приборы, регистрирующие дозу облучения с помощью встроенного в них электроскопа с нитью, положение которой зависит от оставшегося заряда. Этот миниатюрный «дозиметрический карандаш» заряжается на стенде до установления нити-указателя на нуль. Шкала электроскопа градуирована прямо в дозиметрических единицах. В то же время доверять полностью этому прибору нельзя из-за возможного появления утечек.

Газоразрядные счетчики

Хорошо известно, что режим собирания зарядов, характерный для ионизационной камеры, при повышении напряженности поля переходит: в режим газового усиления. Этот режим очень неустойчив при однородном поле, но если поле неоднородно, как в случае цилиндра с натянутой по его оси нитью, то коэффициент усиления можно сделать достаточно большим и стабильным. В определенных пределах этот коэффициент мало зависит от сорта и энергии частиц, от количества и расположения оставленных вдоль трека зарядов. Счетчики такого типа называются пропорциональными, так как амплитуда их импульсов пропорциональна первичной ионизации. Для регистрации γ -излучения счетчики можно изготовлять стеклянными, с наполнением инертным газом и металлизированной внутренней поверхностью, а для регистрации достаточно высокоэнергетического β -излучения счетчики выполняют из тонкостенных дюралюминиевых трубок, по торцам которых вклеены изоляторы, сквозь которые пропущена нить. Наконец, для регистрации низкоэнергетического β -излучения и α -частиц применяют торцевые счетчики с тонким слюдяным окном.

При дальнейшем повышении напряжения на счетчике его коэффициент усиления возрастает и, как всякий усилитель при умеренном усилении, он вступает в область ограниченной пропорциональности (рис. 6.33) [59]. В этой области сигналы слабые усиливаются больше, чем сильные. При дальнейшем небольшом повышении напряжения образование хотя бы одной пары заряженных частиц уже ведет к пробое, и амплитуда напряжения перестает зависеть от свойств ионизирующей частицы. Режим возникновения газового разряда под действием хотя бы одного электрона называется гейгеровским. В этой области разряд может прекратиться сам

Рис. 6.33. Зависимость амплитуды импульса на счетчике от напряжения: 1 — α -частицы; 2 — β -частицы [59]

или потребовать принудительного гашения с помощью электронных схем. Электронные лавины направляются к аноду (нити) счетчика и собираются на нити. Если новые электроны не появятся из катода (корпуса) счетчика, то разряд в этой области напряжений прекратится сам. Новые фотоэлектроны выбиваются из катода возникающим в разряде ультрафиолетовым излучением. причем их нужно очень немного — только для зарождения новых лавин. В инертных газах ультрафиолетовые кванты легко достигают катода, поэтому счетчики с таким наполнением являются несамогасящимися.

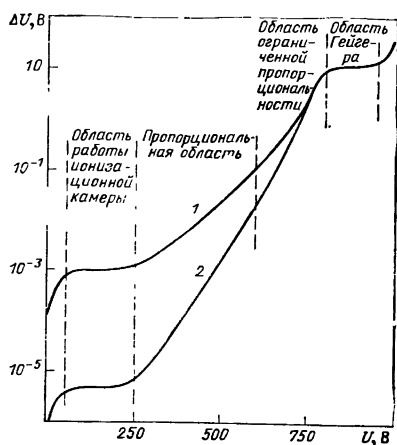
Если добавить к газовой смеси пары органических или других веществ, поглощающих ультрафиолетовое излучение, то фотоэлектроны не достигают катода, и счетчик становится самогасящимся. Его газовая среда обычно подвержена электрофотохимическому разложению в процессе работы.

В счетчиках высокая напряженность поля существует только у нити, а в главной части объема она невелика, поэтому время собирания всех зарядов и восстановления свойств счетчика большое — примерно 10^{-4} с, а предельная скорость счета 10^3 — 10^4 имп./с. Существуют также специальные счетчики для регистрации нейтронов — они наполняются обогащенным $^{10}\text{BF}_3$ и имеют для тепловых нейтронов эффективность десятки процентов (вдоль оси). Простота конструкции и регистрирующих схем газовых счетчиков, невысокое рабочее напряжение делают эти приборы очень удобными для самых разнообразных целей.

Как правило, экспериментаторы и дозиметристы используют готовые промышленные счетчики с известными свойствами. Однако в некоторых случаях возникают задачи, требующие создания счетчиков с заменяемой газовой смесью. Типичные примеры — регистрация активности углерода ^{14}C для датировки археологических находок [67] и регистрация невысокой активности газов, например измерение концентрации радиоактивных изотопов криптона и ксенона в атмосфере.

Заполняющий газ, например CO_2 , тщательно очищают от электроотрицательных примесей и вводят в счетчик. Обычно в таких случаях из-за малой скорости счета и большого фона применяют методы снижения фона: счетчик окружают кольцом счетчиков фона, включенных с ним по схеме антисовпадений, счетчик изготавливают из безкальевого стекла и т. п.

Существуют электронные схемы, несколько повышающие быстродействие счетчика, однако применение сложных схем в этом случае вряд ли оправдано:



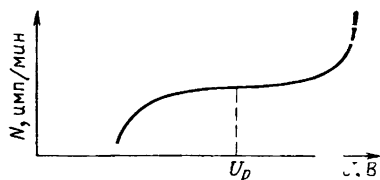


Рис. 6.34. Счетная характеристика газоразрядного счетчика, работающего в гейгеровской области [59]

достоинство газоразрядных счетчиков состоит в их простоте, и увеличить быстродействие до уровня сцинтилляционных счетчиков все равно не удастся.

Прозрачные газоразрядные счетчики реагируют на свет, с малым уровнем фона они могут работать только в темноте. Для того чтобы работа счетчика была максимально стабильной, снимают его счетную характеристику — зависимость скорости счета от напряжения (рис. 6.34). Рабочую точку U_p выбирают обычно в середине плато или при несколько меньшем напряжении.

Для работы газоразрядных счетчиков в схемах совпадений и антисовпадений, где их трудно заменить из-за геометрических особенностей сцинтилляционными, очень желательно, чтобы их импульс имел стандартное, минимальное время задержки и крутой передний фронт. У счетчиков, наполненных газовыми смесями с органическими парами, время запаздывания разряда не превышает 10^{-6} с, однако ресурс этих счетчиков невелик — до 10^8 импульсов. Счетчики с добавкой паров галогенов (брома или иода) намного более долговечны, но развитие разряда происходит на порядок медленнее.

Существует класс счетчиков, о котором следует упомянуть особо. Речь идет о счетчиках с коронным разрядом. Коронный разряд, возникающий вблизи острия или нити при высоком потенциале, состоит из совокупности мелких электронных лавин и создает определенный уровень шумов. Если вблизи зоны коронного разряда возникает трек α -частицы или протона, то инициируется мощный всплеск электронных лавин, дающий сигнал, превышающий шум в 10—20 раз [59]. При наполнении химически инертными по отношению к электродам газами, в том числе H_2 , и токе короны около 10^{-7} А такие счетчики работают почти как пропорциональные, дают высокую амплитуду сигнала и являются очень долговечными.

Следующим этапом является, конечно, создание искрового счетчика. Счет тяжелых частиц с проскоком искры через место пролета частицы был реализован еще в 1935 г. и с тех пор неоднократно исследовался и совершенствовался [59]. Искровой счетчик отличается от гейгеровского более высоким давлением газа и меньшей неоднородностью поля.

В качестве анода такого счетчика берут нить или группу нитей, расположенных на расстоянии нескольких миллиметров от пластины катода. Если пластину сделать полупрозрачной (тонкое напыление металлом), то можно наблюдать и фотографировать места пролета тяжелых частиц, однако искра не идет по треку частицы. Это не камера Вильсона! Искра проскакивает через зону рассасы-

вания трека с точностью до зазора между электродами. Искровые счетчики можно приспособить также для регистрации электронов и нейтронов. Рабочее напряжение искрового счетчика равно нескольким тысячам вольт. Искровые счетчики имеют невысокий ресурс, не очень стабильны в работе, поэтому в каждом случае их использования следует оценить ожидаемую выгоду по сравнению с другими методами регистрации.

Сцинтилляционные детекторы

Люминесценция под действием ионизирующего и ультрафиолетового излучений имеет общий механизм, но энергетический коэффициент конверсии ионизирующего излучения в световое обычно меньше, чем для ультрафиолетового. Поскольку существуют очень удобные, высокочувствительные, безынерционные детекторы светового излучения — фотоумножители, то сочетание подходящего люминофора с фотоумножителем обеспечивает высококачественное детектирование различных частиц.

Люминофоры делятся на два типа: неорганические и органические. Они обладают различным механизмом люминесценции. У неорганических люминофоров обычно в несколько раз больший коэффициент конверсии, чем у органических (до 30 %); время высвечивания составляет 100—200 нс, а для органических — 10 нс при коэффициенте конверсии не более 4 %. Люминофоры должны быть прозрачны к собственному световому излучению, иначе трудно добиться хорошей регистрации γ -излучения и быстрых электронов. Те из них (прежде всего ZnS), которые не обладают прозрачностью в толстых слоях, применяют для регистрации α -излучения.

Свойства неорганических люминофоров очень сильно зависят от небольших добавок, создающих дефекты в их структуре. Если, например, ZnS активировать серебром, то время высвечивания будет 250 нс, а если медью — то несколько секунд.

Электрон, рожденный γ -квантом, может истратить свою энергию в любом месте довольно массивного кристалла, но количество квантов света, попавших на катод ФЭУ, должно при этом зависеть только от энергии электрона; только в этом случае будет приемлемое энергетическое разрешение. Энергетическое разрешение зависит от трех факторов: однородности светового выхода в кристалле, собирания света на катод ФЭУ в целом и чувствительности разных участков фотокатода. Обычно спектральный максимум люминесценции лежит вблизи 4000 Å, т. е. соответствует кванту энергией 3 эВ. При энергетическом выходе 8 %, характерном для NaI(Tl), электрон энергией 10^5 эВ вызовет испускание 2700 световых квантов. Статистическая погрешность в этом случае составит с учетом конверсии фотонов в фотокатодах ФЭУ, около 3 %, однако хорошие кристаллы NaI с хорошими ФЭУ обеспечивают погрешность только 7—9 %.

Для эффективной регистрации γ -квантов требуются большие

прозрачные кристаллы, содержащие элементы с большим Z . Наибольшей популярностью пользуется кристалл $\text{NaI}(\text{Ti})$, хотя кристаллы CsI еще более эффективны.

Органические люминофоры, содержащие водород, могут хорошо регистрировать быстрые нейтроны по протонам отдачи. Из них наиболее эффективен антрацен, имеющий выход 4 % и время высвечивания 29 нс. Для регистрации медленных нейтронов, как и в случае приборов с газовым наполнением, больше всего подходят реакции с литием и бором, сопровождающиеся вылетом α -частиц. Используются кристаллы $\text{LiI}(\text{Ti})$, LiF , LiBr , LiSnO_3 , LiCaSiO_4 [6, 10]. Бор добавляют обычно в жидкие растворы терфенила в ксилоле или фенилциклогексане в виде таких соединений, как метилборат $\text{B}(\text{OCH}_3)_3$ или борозол $\text{B}_3\text{N}_3\text{H}_6$. Поскольку люминесценцию вызывает в этом случае α -частица с ничтожным пробегом, то толщина люминофора для регистрации тепловых нейтронов невелика, и он может быть не очень прозрачным. Например, к ZnS подмешивают борозол и получают тонкий слой люминофора, столь же эффективный и малочувствительный к γ -фону, как сам ZnS при регистрации α -частиц.

Люминесцирующие вещества можно растворять в жидкостях или вводить в состав прозрачных пластмасс. Лучшим жидким сцинтиллятором является раствор P -терфенила в ксилоле, эффективность которого при оптимальной концентрации 5 г/л равна 2 % при времени высвечивания всего 2—4 нс. Жидкие сцинтилляторы удобны тем, что ими можно заполнять большие объемы, со всех сторон окруженные фотоумножителями. Такими детекторами большого объема широко пользуются в физике высоких энергий.

Твердые пластмассовые сцинтилляторы также весьма удобны, они легко поддаются механической обработке, из них можно приготовить изделия больших размеров, пластмасса не гигроскопична, как большинство неорганических люминофоров. Чаще всего основой пластмассовых люминофоров является полистирол, а люминесцирующими добавками — терфенил, антрацен и т. д. Определенным успехом пользуются газовые сцинтилляторы. Наиболее эффективен из них ксенон, квантовый выход которого равен половине выхода NaI , но излучение расположено в ультрафиолетовой части спектра. Для регистрации этой люминесценции с помощью обычных фотоумножителей внутреннюю полость камеры с ксеноном покрывают «сместителем спектра» — люминесцирующим веществом, чаще всего кватерфенилом. Интенсивность люминесценции ксенона и других благородных газов резко снижается при наличии молекулярных примесей; жидкий ксенон имеет вдвое больший выход люминесценции [57]. Хорошим свойством газового сцинтиллятора является независимость квантового выхода от сорта частиц. Для обычных сцинтилляторов световой выход под действием α -частиц существенно меньше, чем под действием быстрых электронов.

Ниже приведена табл. 6.2, содержащая сведения о наиболее часто употребляемых люминофорах [31, 57, 68].

Конструкция детекторов. В подавляющем большинстве случаев детектор непосредственно примыкает к фотокатоду ФЭУ; это конструктивно удобно и обеспечивает максимальное попадание света

Таблица 6.2. Характеристики некоторых люминофоров

Люминофор	Коэффициент конверсии, %	Время высвечивания, с	λ , нм	Примечание
ZnS (Ag)	10—28	10^{-5}	450	Мелкокристаллический порошок, применяется только в тонких слоях
NaI (Tl)	8	$2,5 \cdot 10^{-7}$	410	Гигроскопичен, выращиваются большие кристаллы
CsI (Tl)	5,7—6	$7 \cdot 10^{-7}$	410	—
CaWO ₄	4	$3 \cdot 10^{-6}$	430	—
LiI (Eu)	4	10^{-6}	Синезеленый	—
CdWO ₄	8	10^{-5}	520	—
CaI (Tl)	6	10^{-6}	Белый	—
Антрацен	4	$2,94 \cdot 10^{-8}$	440	Большие кристаллы выращиваются с трудом
Стильбен	2,4—3	$0,82 \cdot 10^{-8}$	420	Кристаллы хрупкие, получаются легко
Нафталин	1	$6 \cdot 10^{-8}$	408	Сублимируется, легко получаются большие кристаллы
Дифенилацетилен (талон)	—	$0,7 \cdot 10^{-8}$	385	Очень чувствителен к примесям
Терфенил	2,8	$1,2 \cdot 10^{-8}$	390	Легко получают хорошие кристаллы
			405	—
			430	—
<i>P</i> -терфенил в ксилоле	1,2	$(2-4) \cdot 10^{-9}$	—	—
<i>P</i> -терфенил в бензоле (4,5 г/л)	1,36	$(2-4) \cdot 10^{-9}$	—	—
<i>P</i> -терфенил в толуоле (4 г/л)	1,7	$(2-4) \cdot 10^{-9}$	320	—
Ксенон (газ)	7,0—7,5 (4*)	$0,7 \cdot 10^{-8}$	230	* — С кватерфениловым смесителем спектра
Ксенон (жидкость)	9,5—11,7	—	230	

на фотокатод. Бывают и исключения: если для уменьшения амплитуды шумов Вы решили охлаждать катод ФЭУ, то это не значит, что необходимо охлаждать кристалл люминофора — придется делать световод. Могут быть и другие причины, требующие убрать ФЭУ подальше, например очень большие наводки вблизи импульсной системы и др.

Световод полного внутреннего отражения легко изготовить из оргстекла, но он пропускает не очень широкий световой конус, в несколько раз уменьшая количество дошедших квантов. Полировать световод нужно вдоль образующей; хорошие результаты дает полировка с помощью чистой сухой замши, слегка припудренной микронным алмазным порошком. Так же, кстати, можно полиро-

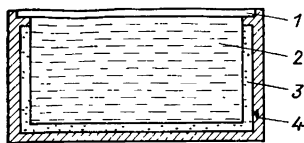


Рис. 6.35. Расположение гигроскопического кристалла люминофора в контейнере:

1 — покровное стекло, приклеенное к кристаллу канадским бальзамом и вклеенное вместе с ним в контейнер; 2 — кристалл; 3 — прослойка MgO ; 4 — контейнер

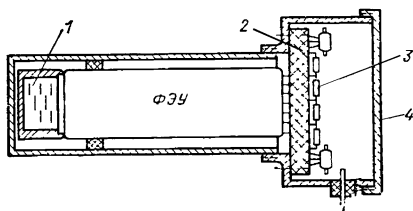


Рис. 6.36. Расположение ФЭУ с кристаллом, делителем и предусилителем в экранирующем кожухе:

1 — кристалл; 2 — панель ФЭУ; 3 — делитель и предусилитель; 4 — корпус

вать и потускневшие алюминиевые или хромовые отражатели. При не очень большой длине световода (не более трех-четырех диаметров) большой процент сбора квантов даст посеребренная или алюминированная изнутри стеклянная трубка. Серебро хорошо отражает свет только при $\lambda \geq 400$ нм, поэтому серебряное покрытие можно применять только с люминофорами, высвечивающимися в видимой области. Серебрить изнутри трубку с помощью реакции «серебряного зеркала» не следует: покрытие может оказаться матовым. Правильнее опылить трубку изнутри на вакуумном стенде, натянув испаритель прямо по ее оси.

Неорганические люминофоры, кроме ZnS , плохо переносят контакт с атмосферой: они мутнеют и гидролизуются, поэтому их заключают в герметичные контейнеры с одной прозрачной стороной, обращенной к ФЭУ. Пространство между кристаллом и другими сторонами контейнера заполняют слоем хорошо отражающего свет матового рассеивателя, чаще всего MgO (рис. 6.35). Приклейка кристалла к покровному стеклу — достаточно деликатная операция. Дело в том, что коэффициенты теплового расширения кристалла и стекла не равны, поэтому приклеивание нужно вести аккуратно, очень медленно нагревая и охлаждая кристалл. Не следует большие кристаллы хранить зимой в холодном помещении.

Покровное стекло кристалла прижимают к ФЭУ, вводят в зазор капельку масла для ликвидации потерь на отражение и мягко, с помощью небольшого центрирующего нажима, через прокладку из пористой резины или иного упругого материала фиксируют в этом положении.

Источник, активность которого подлежит измерению, может излучать широким пучком, и тогда чем больше детектор, тем большим будет и количество зарегистрированных частиц. Однако может быть и такая ситуация, когда из-за необходимости коллимации или по другим причинам поток излучения в том месте, где расположен детектор, имеет небольшое поперечное сечение. В этом случае большой диаметр детектора и ФЭУ только увеличит фон, ничего не

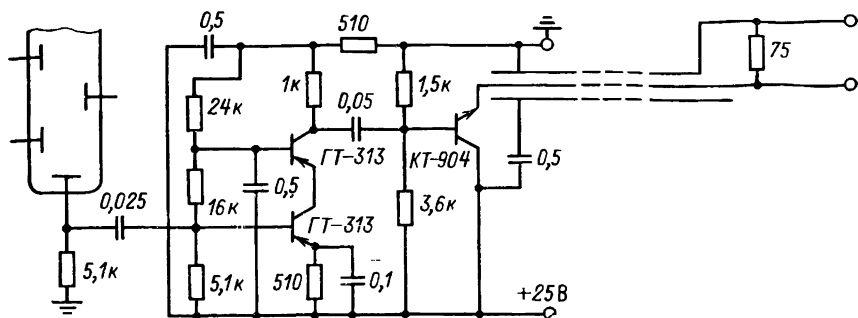


Рис. 6.37. Предусилитель, согласующий сопротивление нагрузки ФЭУ с выходом на кабель

добавляя к сигналу, поэтому детекторы большого размера следует применять только, если интенсивность широкого пучка частиц мала или если требуется усреднение потока по большой площади, перекрываемой детектором.

При регистрации γ -излучения ФЭУ в блоке с кристаллом располагают в тонкостенном алюминиевом корпусе, защищающем от света и электрических наводок. Вблизи другой стороны корпуса находится панель ФЭУ с расположенным на ней делителем (рис. 6.36). Лучше всего непосредственно рядом с панелью ФЭУ разместить и простой транзисторный блок, который согласует высокое сопротивление на выходе ФЭУ с сопротивлением кабеля, обычно 50—70 Ом.

При времени разрешения 10^{-7} с и емкости анода ФЭУ вместе с монтажом и входной цепью около 10—20 пФ сопротивление нагрузки ФЭУ должно быть равно примерно 10^4 Ом. Согласовать эту нагрузку с кабелем можно с помощью предусилителя с эмиттерным повторителем (рис. 6.37). Эта простейшая приставка позволит в десятки раз увеличить амплитуду сигнала, приходящего от ФЭУ к блокам анализирующей аппаратуры.

При регистрации α - и β -частиц из-за их небольшой проникающей способности применяют для защиты люминофора от света тонкую алюминиевую фольгу. В случае α -частиц тонкий слой люминофора ZnS наносят на стеклянный диск осаждением из водной суспензии, затем аккуратно отсасывают воду, а высыхающий люминофор скрепляют со стеклом небольшим количеством клея, который добавляют прямо в суспензию. После просушки слой люминофора прикрывают тонкой алюминиевой или алюминированной лавсановой пленкой, толщиной не более нескольких миллиграммов на квадратный сантиметр, и в таком виде закрепляют на ФЭУ. Перед монтажом обязательно нужно тщательно просмотреть защитную пленку на свет: нет ли отверстий. Если отверстия есть, а площадь детектора большая, можно аккуратно закрасить их черной краской.

Во время работы, особенно при использовании дозиметрической аппаратуры с большой площадью детектора, защитная фольга иногда повреждается и детектор начинает реагировать на свет. Когда Вы пользуетесь α -счетчиком на свету, всегда проверяйте его, развернув торцом к свету: если он не реагирует на свет — его показаниям можно доверять.

Защитную пленку α -дозиметров обычно предохраняют от повреждения на-

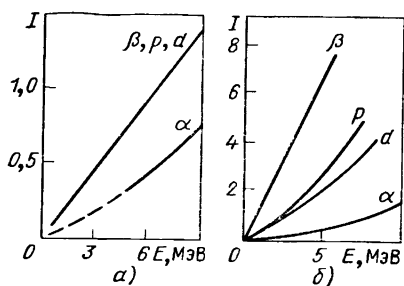


Рис. 6.38. Зависимость интенсивности светового импульса I от энергии и сорта частицы [57]:
 a — кристалл NaI(Tl); b — антрацен

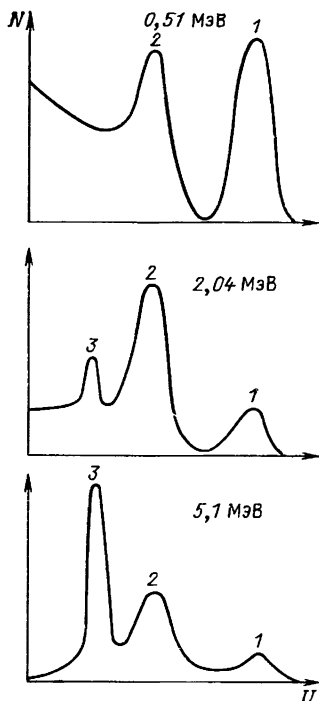


Рис. 6.39. Распределение импульсов по амплитудам в сцинтилляционном счетчике с кристаллом NaI (Tl) для γ -излучения различной энергии:
 1 — пик фотопоглощения; 2 — комптон-эффект; 3 — образование пар

тянутой перед ней на расстоянии 2—3 мм редкой сеткой. При многократном пользовании прибором на сетке остается α -активные вещества, что увеличивает фон, а попытки промыть сетку обычно кончаются повреждением защитной фольги. Поэтому защитную сетку вместе с оправой лучше делать съемной и промывать ее отдельно. Следует отметить, что радиационная устойчивость люминесцентных свойств ряда неорганических люминофоров много хуже, чем органических [57].

Спектрометрия излучений с помощью сцинтилляторов. Световой выход люминофоров зависит от плотности трека частицы. Чем плотнее трек, тем ниже световой выход. Непостоянство светового выхода обуславливает нелинейную зависимость сигнала от энергии, особенно для тяжелых частиц. Эти нелинейные эффекты гораздо сильнее у органических сцинтилляторов (рис. 6.38, б), чем у неорганических (рис. 6.38, а). Для электронов энергией 100 кэВ и более эта зависимость носит достаточно линейный характер. Для спектрометрии нелинейность еще не помеха, важнее независимость импульса от места его возникновения в люминофоре и направления движения ионизирующей частицы. Рассмотрим это на примере α -спектрометрии. Во-первых, ясно, что работа с защитной пленкой исключает сколько-нибудь количественную спектрометрию, так как очень большие потери в пленке зависят от угла пролета через нее α -частиц. Если организовать работу без защитной пленки — в затемненном домике, то можно предположить, что количество испус-

каемых в ZnS квантов не будет зависеть от угла пролета α -частицы. Однако количество квантов, попадающих на катод ФЭУ, опять-таки будет сильно зависеть от направления трека из-за того, что среда рассеивающая. Поэтому если и можно обеспечить люминесцентную α -спектрометрию, то только на основе прозрачных сред, например люминесцирующих пластмасс, причем поверхностный слой люминофора должен быть очень чистым и однородным по световому выходу. α -Спектрометрию на основе люминофоров трудно сделать высококачественной — другие методы лучше.

Если все же возникнет потребность грубо оценить энергию α -частиц с помощью обычного α -счетчика, все равно, люминесцентного или гейгеровского, то это можно сделать несколько иначе. Если постепенно увеличивать расстояние от препарата до счетчика, то скорость счета будет падать, пока счет не прекратится совсем. Ясно, что последними перестанут достигать люминофора α -частицы, летящие перпендикулярно к поверхности счетчика. Если потери энергии в защитной фольге не очень велики, то зависимость скорости счета от расстояния может служить для приближенной оценки энергии α -частиц. Однако при этом методе необходимы образцовые источники или хотя бы один источник, испускающий α -частицы известной энергии; изменение расстояния можно пересчитать в энергию по кривой пробега или тормозных потерь. Этими рекомендациями можно воспользоваться только при отсутствии полупроводниковых спектрометров и ионизационных камер, дающих несравненно лучшие результаты.

Для быстрых электронов люминесцентная спектрометрия обеспечивает, благодаря их большому пробегу, вполне удовлетворительные результаты, позволяя с хорошим кристаллом и фотоумножителем получать энергетическое разрешение около 7 %.

При таком энергетическом разрешении речь может идти об определении либо формы β -спектра, либо о γ -спектроскопии с помощью измерения энергии электронов. В первом случае люминофор с чистой, не гидролизованной поверхностью может обеспечить исследование β -спектра вплоть до очень небольших энергий в десятки килоэлектронвольт. Поскольку энергия электронов β -распада не очень велика, толщина сцинтиллятора может быть небольшой — не более нескольких миллиметров. Для улучшения разрешения в области малых энергий можно пользоваться сцинтилляторами с большим световым выходом.

В случае γ -спектроскопии очень важен вопрос о том, каков энергетический спектр электронов, порождаемых моноэнергетическим γ -излучением [59]. Комптоновское рассеяние дает электроны сплошного спектра, в то время как фотопоглощение — линейчатый спектр. Вырванный при фотопоглощении с одной из внутренних орбит электрон обладает меньшей энергией, чем поглощенный γ -квант, на энергию связи. Перестройка электронных орбит после фотоэффекта ведет к испусканию характеристического рентгеновского излучения. Освобождающаяся при перестройке энергия может также привести к испусканию атомом электрона Оже. Если кристалл имеет достаточные размеры, а фотопоглощение произошло не на самом его краю, то и электрон Оже, и мягкий конверсионный квант так-

же будут захвачены в кристалле, и в результате вся энергия первичного γ -кванта с конверсионной эффективностью будет превращена в кванты света. Для комптоновского рассеяния в принципе дело может обстоять сходным образом: рассеянный γ -квант также будет захвачен или вторично рассеян, так что в большом кристалле спектрометрические характеристики лучше.

При образовании электрон-позитронных пар электрон свою часть энергии отдает кристаллу, а позитрон может аннигилировать, образовав два γ -кванта. Эти кванты, в свою очередь, могут поглотиться в кристалле, вызвав увеличение амплитуды импульса, или могут покинуть детектор. В результате появятся импульсы различной амплитуды от одних и тех же первичных γ -квантов. Чем больше кристалл и чем больше его Z , тем лучше выглядит амплитудный пик импульсов при регистрации моноэнергетических γ -квантов (рис. 6.39). К сожалению, в [59], откуда автор заимствовал рис. 6.39, не указаны размеры кристалла, а они, как мы видим, существенно определяют амплитудный спектр импульсов.

Помимо обсужденных нами чисто физических причин, ограничивающих энергетическое разрешение и приводящих к появлению ряда пиков при регистрации моноэнергетических γ -квантов, большую роль играет совершенство аппаратуры: кристалл люминофора должен быть прозрачен и покрыт хорошо отражающим свет слоем; катод ФЭУ должен обладать достаточно однородной чувствительностью по всей площади.

Подбирая оптимальный для регистрируемой энергии кристалл и выделяя с помощью амплитудного анализатора только ту амплитуду импульсов, которая наиболее контрастно выявляет регистрируемую энергию γ -квантов, обычно удается выделить нужную линию излучения. Но это, скорее, селекция, чем спектрометрия; для целей спектрометрии, т. е. точного снятия спектров γ -излучения, испускаемых источниками, применяют мощные магнитные спектрометры. Люминесцентную методику можно использовать и для регистрации сложных γ -спектров [60], но их линейчатый характер при этом скрыт, а будет измерена огибающая энергетического распределения, которую необходимо корректировать с учетом зависимости электронного спектра от энергии γ -квантов.

Фотоумножители. Устройство и принцип действия фотоумножителей подробно описаны [69, 70], лучше обратимся к менее известным вопросам.

Наименьший заряд, испускаемый фотокатодом, — один электрон, и при усилении порядка 10^8 выходной импульс от этого заряда равен 1 В, поэтому фотоумножители работают с усилением от 10^5 до 10^7 .

Квантовый выход хорошего мультищелочного или сурьмяно-цезиевого катода, т. е. отношение количества испущенных фотоэлектронов к количеству фотонов, на входе достигает соответственно 0,4—0,2. Это необходимо учитывать не только при расчетах амплитуды сигнала, но и при оценках статистического разброса: 100 квантов, попадающих на катод ФЭУ, дают статистический раз-

брос $\sqrt{100}/100 = 10\%$, но они порождают только 20—30 фотоэлектронов, и поэтому статистическая погрешность будет не 10, а более 20 %.

Обычно счетные приборы, использующие фотоумножители, имеют довольно высокий фон. Причины возникновения этого фона можно установить легко: во-первых, отсоединяют от ФЭУ люминофор и измеряют фон; если фон тот же, значит, это не загрязнение радиоактивным веществом и не импульсы от космического излучения. Во-вторых, наблюдают за шумами фона (даже если они еще не регистрируются счетчиком) с помощью осциллографа, подобрав развертку и яркость так, чтобы видеть амплитуду и форму отдельных импульсов (для этого надо затемнить экран осциллографа). Импульсы от микропробоев внутри ФЭУ на экране осциллографа выглядят отдельными большими пиками, в то время как одноэлектронные, естественные шумы образуют как бы мелкий «подлесок» к этим импульсам. Шумы ФЭУ непохожи на статистические шумы резисторов. Это именно совокупность импульсов, порожденных статистическим потоком одиночных электронов с фотокатода. Импульсы от микропробоев не стабильны во времени, а также по-разному проявляются у разных экземпляров ФЭУ, в то время как одноэлектронные импульсы у всех ФЭУ с тем же типом фотокатода, невзирая на режим тренировки, будут сходными. Чем дальше в красную область простирается чувствительность фотокатода, тем меньше работа выхода и тем больше тепловой шум, хотя здесь нет совершенно однозначной зависимости. У мультищелочного катода чувствительность простирается до 800 нм, а шумы у него меньше, чем у сурьмяно-цезиевого катода. Поэтому для регистрации световых импульсов люминофоров следует брать только ФЭУ с сурьмяно-цезиевыми и мультищелочными катодами, но ни в коем случае не с кислородно-серебряно-цезиевым, шумы которого на два порядка больше. Шумы спектрометрических ФЭУ часто выражают в энергетическом эквиваленте — килоэлектронвольтах, что означает сравнимость амплитуды шумов с амплитудой импульсов от электронов, имеющих указанную энергию и вызывающих люминесценцию в кристалле.

Для уменьшения шумов иногда (чем реже, тем лучше) ФЭУ подвергают охлаждению. Это очень деликатная операция, неприятные особенности которой состоят в следующем:

фотокатод ФЭУ (обычный, сурьмяно-цезиевый) теряет свою проводимость при глубоком охлаждении, что ведет к очень сильному падению его чувствительности. Для предотвращения этого явления у некоторых типов ФЭУ перед нанесением фотослоя наносится тонкий прозрачный слой металла, позволяющий сохранить проводимость.

Обычно шумы в достаточной степени уменьшаются раньше, чем падает чувствительность ФЭУ, и охлаждение до температуры жидкого азота не требуется, так что если экспериментатора не пугает перспектива поддержания температуры на уровне, например, -50°C , то он может использовать любой фотоумножитель.

Охлаждение приводит на воздухе к обмерзанию, поэтому всю холодную зону приходится герметизировать и заполнять сухим газом. Автор — не сторон-

ник создания сложных и ненадежных агрегатов ради сомнительных преимуществ; в частности, при охлаждении ФЭУ трудно ожидать падения количества микропробоев. В то же время некоторые люминофоры улучшают свои характеристики при охлаждении. Например, NaI (без TI) имеет при 188 °С конверсионную эффективность 17 % при $\tau = 5 \cdot 10^{-8}$ с [57].

В литературе описаны методы стабилизации коэффициента усиления ФЭУ при дрейфе напряжения [59]. Вряд ли это оправдано. Во-первых, совсем нетрудно стабилизировать напряжение с нужной точностью: источники питания достаточной стабильности выпускаются промышленностью. Во-вторых, стабилизация напряжения делителя еще не означает стабилизации параметров ФЭУ. Этот сложный многокаскадный прибор очень чувствителен к внутренней атмосфере. Подача напряжения включает геттерные механизмы, вакуум меняется, и чувствительность, как правило, начинает дрейфовать в сторону повышения. При регистрации α -частиц и в других случаях, когда импульсы сигнала намного превышают импульсы фона, стабильность усиления ФЭУ не очень важна, но когда идет речь о регистрации излучения одной γ -линии при фоне от другой, стабильности добиться не просто.

Самый простой способ стабилизации усиления ФЭУ состоит в том, что включают всю аппаратуру за несколько часов до предстоящих измерений, и дрейф его чувствительности прекращается. При использовании более сложного способа автоподстройки сигнал от γ -пика регистрируется одновременно не в одном, а в двух каналах анализатора. При правильной настройке на середину пика уровень счета обоих каналов в среднем одинаков, а при сползании с центра пика все равно, из-за нестабильности ФЭУ, источника или анализатора, уровень счета одного из каналов становится больше, чем другого, и система обратной связи изменяет напряжение на ФЭУ, компенсирующее дрейф. Такие системы, при наличии изолированного по энергии γ -пика, сохраняют стабильность счета на уровне 0,1 % в течение нескольких суток.

Фотоумножители по форме динодов подразделяются на несколько типов. В большинстве случаев диноды имеют ковшеобразную форму (рис. 6.40, а), обеспечивающую перекрестную фокусировку электронов на следующий динод. В такой конструкции довольно велик разброс времени пролета электронной лавины, и разрешающее время превышает 10^{-8} с. Выпускаются также ФЭУ с уменьшенным расстоянием между электродами и такой их формой, чтобы обеспечить одновременный сбор всех электронов; у них разрешающее время не превышает $2\text{--}3 \cdot 10^{-9}$ с. Существенное уменьшение расстояний, проходимых электронами, обеспечивает жалюзная форма эмиттеров (рис. 6.40, б). Различают ФЭУ с напыленными динодами, на которые в процессе изготовления наносится тонкий слой с повышенным коэффициентом вторичной эмиссии, обычно SbCs, и со сплавными динодами, целиком изготовленными, например, из сплава CuBe с хорошими эмиссионными характеристиками после определенной обработки. ФЭУ со сплавными динодами гораздо стабильнее, у них намного выше допустимый средний и импульсный ток, меньше явления усталости.

Следует иметь в виду, что видимый свет плохо влияет на чувствительный слой ФЭУ, даже не находящегося под напряжением. Поэтому, если хороший фотоумножитель в открытом виде лежит

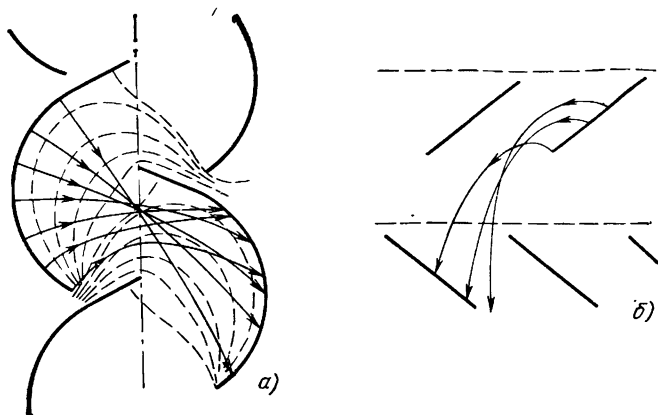


Рис. 6.40. Схема расположения ковшеобразных электродов умножительных систем ФЭУ

где-нибудь на полке, это не говорит о высокой культуре его владельца.

Напряжение на электродах ФЭУ обычно достигает 1200—1700 В. При таком напряжении возможны утечки по панельке и не очень чистому баллону, особенно при высокой влажности. Поэтому панельки нужно изготавливать из хороших диэлектриков: тефлона, эбонита, оргстекла, полистирола, но не текстолита или гетинакса (последний иногда все же пригоден). Если ФЭУ будет работать в помещении с высокой влажностью, то лучше всего весь блок с делителем и предусилителем герметизировать и поместить внутрь осушитель — матерчатый мешочек с прокаленным силикагелем.

При выборе типа ФЭУ следует учитывать целый ряд параметров: прежде всего — размер и тип фотокатода, а уже затем остальные параметры, определяющие качество ФЭУ в пределах данного размера. Фотоумножители с кварцевым окном фотокатода более подходят для решения оптических задач; при регистрации излучения люминофоров они полезны только, если в качестве люминофора используется ксенон [68].

Полупроводниковые детекторы

Сцинтилляционные детекторы благодаря своим отличным качествам и хорошо поставленному производству завоевали огромную популярность и являются сейчас одним из самых распространенных типов детекторов. У них есть, пожалуй, только два существенных недостатка: не очень высокие спектрометрические характеристики и невозможность изготовления детекторов очень малых размеров. Этими качествами обладают постепенно внедряющиеся в практику полупроводниковые детекторы. Эти детекторы, как и другие полупроводниковые приборы, представляют собой достаточно разнообраз-

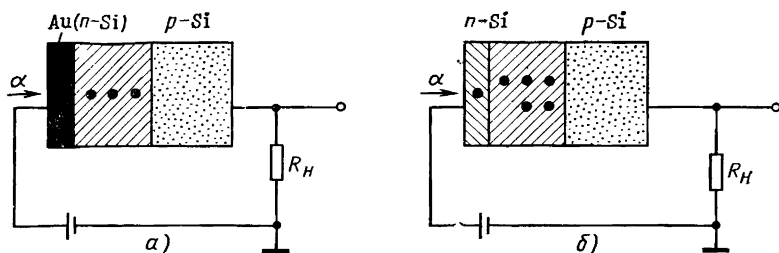


Рис. 6.41. Схемы кремниевых полупроводниковых детекторов [57]:

а — поверхностно-барьерный; б — золото-кремниевый

разный набор физических и конструктивных решений, пригодных для регистрации различных видов излучения [57, 59].

Существуют два класса полупроводниковых детекторов. В одном из них импульсы формируются по схеме «сквозного тока», в другом формирование импульсов связано с наличием электронно-дырочных переходов.

При пролете частицы через участок кристалла полупроводника с малой проводимостью в нем образуются носители, причем в существенно большем количестве, чем количество ион-электронных пар, образованных той же частицей в газе. На образование пары ион — электрон частица в газе затрачивает около 30 эВ, а в кремнии ($3,5 \pm 0,7$) эВ и в германии ($2,94 \pm 0,15$) эВ [57]. Собираение только образовавшихся первичных носителей уже даст импульс, сравнимый с импульсом ионизационной камеры, учитывая значительную емкость между обкладками кристалла. Однако носители, распространяясь под влиянием приложенного напряжения, образуют в кристалле проводящий канал, и основная часть протекающего количества электричества связана именно с образованием проводящего канала. Этот ток называется сквозным током и существует, пока не рекомбинируют образовавшиеся носители. Происходит как бы тихий, самоостанавливающийся микропробой полупроводника. Количество электричества, протекающее через кристалл, зависит от приложенного напряжения вначале линейно, а затем наступает насыщение.

Установлению сквозного тока препятствуют те зоны кристалла, где не прошла частица и нет носителей. Поэтому чем тоньше слой полупроводника, тем более крутой фронт сигнала и большую его амплитуду удается получить. В пределе толщина кристалла должна быть равна пробегу частицы. Усиление сигнала в детекторе имеет меньшее значение, чем постоянство его характеристик по всей его плоскости, поэтому спектрометрические α -детекторы изготовляют с p — n - или n — p -переходом и покрывают тонким слоем золота (рис. 6.41, а), α -частицы проникают через слой золота, служащий обкладкой плоского конденсатора, в то время как другой обкладкой является n — p -переход, образованный, например, диффузией атомов фосфора в кристалле кремния. Один из типов этих де-

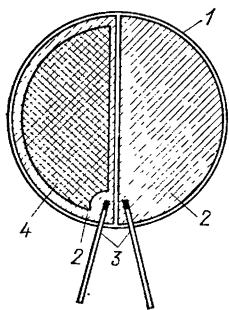


Рис. 6.42. Дифференциальный полупроводниковый детектор для регистрации нейтронов. На одну из золотых обкладок нанесена полиэтиленовая пленка, являющаяся источником протонов отдачи [57]:

1 — корпус; 2 — золотые обкладки; 3 — полиэтиленовая пленка

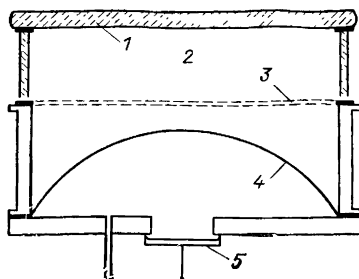


Рис. 6.43. Схема камеры Вильсона с резиновой разделительной мембраной [71]

текторов называется поверхностно-барьерным (рис. 6.41, б) [57] и используется для спектрометрии тяжелых заряженных частиц и нейтронов.

Хорошие детекторы такого типа имеют разрешение около 20 кэВ для α -частиц энергией 5 МэВ, т. е. около 0,4 %. Если на кристаллическую пластину нанести две золотых обкладки с промежутком между ними и вывести два вывода отдельно, то в одном блоке будут готовы к работе два одинаковых детектора (рис. 6.42). Наклеив на один из них тонкую пластинку из полиэтилена или из другой водородсодержащей пластмассы, можно получить дифференциальный счетчик быстрых нейтронов (по протонам отдачи), являющийся также и интегральным спектрометром, как об этом уже говорилось при описании ионизационных камер.

Наложив на одну секцию детектора бор- или литийсодержащее вещество, можно получить счетчик тепловых нейтронов, правда, обладающий из-за тонкого слоя борсодержащего вещества невысокой эффективностью. Поверхностно-барьерные детекторы для регистрации β - и γ -излучения мало подходят, так как у них очень мала толщина чувствительного слоя.

Детекторы с толстым слоем изготавливают $p-i-n$ -типа. Средняя часть кристалла благодаря диффузии ионов лития в межузлия компенсируется по проводимости, т. е. ионы лития компенсируют акцепторы, и кристалл приобретает собственную, очень небольшую проводимость порядка $25 \cdot 10^4$ Ом·см.

Германиевые детекторы этого типа, называемые также литиево-дрейфовыми, изготавливают с чувствительным объемом до 100 см^3 . Они используются в спектрометрии и обеспечивают высокое разрешение по энергии и высокую эффективность. Серьезным недостатком этого типа детекторов является необходимость постоянного

поддержания детектора, даже когда он не работает, при температуре жидкого азота. Тем не менее они достаточно широко используются там, где необходимо высокое энергетическое разрешение, например при изучении выгорания топлива в твэлах по изменению относительной γ -активности различных излучателей [57].

Камеры Вильсона и пузырьковые камеры

Камера Вильсона была создана в 1912 г. и ее роль в развитии ядерной физики трудно переоценить. Действие этого прибора основано на конденсации на ионах трека капелек тумана из слегка пересыщенной атмосферы [71].

Пересыщение по конденсирующейся части атмосферы создается в камере Вильсона с помощью быстрого адиабатического расширения внутреннего объема. Если конденсируется водяной пар из воздуха, то при расширении V_1/V_2 от 1,25 до 1,31 центрами конденсации являются отрицательные ионы, а при расширении от 1,31 до 1,33 — ионы обоих знаков. При коэффициенте расширения более 1,38 молекулы воды конденсируются уже на нейтральных молекулах, и в камере после такого расширения немедленно образуется сплошной туман.

Разрез камеры Вильсона (одного из типов) показан на рис. 6.43. В ее верхней части находится герметически закрытое окно 1, через которое наблюдаются и фотографируются треки, возникающие в рабочем объеме 2 на время 0,1—0,2 с после цикла расширения. В нижней части расположен поршень, осуществляющий цикл расширения с помощью достаточно быстродействующего механизма. Рабочий объем может быть отделен резиновой мембраной 4. До цикла расширения в камере должна поддерживаться 100 %-ная влажность по конденсируемому компоненту атмосферы.

Скорость расширения газа в камере должна быть достаточно большой, в то же время во избежание турбулизации атмосферы в камере или возникновения колебаний расширяющегося объема применяются элементы, гасящие колебания газа, например сетки 3. Степень расширения лучше делать регулируемой: это может достигаться, например, изменением амплитуды хода поршня 5.

При постоянном облучении внутреннего объема проявляться будут как более старые, так и только что возникшие треки. От более старых треков останутся размытые следы, засоряющие картину. Для устранения старых следов в промежутках между импульсами на камеру лучше подавать постоянное напряжение, рассасывающее ионы, а за $\sim 0,2$ с до расширения отключать это напряжение.

Частота срабатывания камеры не может быть большой, больше одного раза в несколько секунд, так как после расширения атмосфера вновь должна быть сжата, успокоена и насыщена парами.

Помещая камеру Вильсона в магнитное поле, можно измерять энергию частиц с известной массой. Для наблюдения определенных ядерных реакций можно менять в камере атмосферу; в некоторых камерах, предназначенных для изучения частиц с большим пробегом, используют повышенное давление газа или располагают внутренние фольги-мишени.

При изучении частиц, пронизывающих камеру насквозь, для того чтобы не просматривать лишние тысячи кадров, используют работу камеры в «ждущем» режиме, с запуском от схемы совпадений: «телескопа» из двух групп счетчиков.

расположенных с двух сторон от камеры. В таком режиме каждое срабатывание камеры происходит непосредственно за пролетом через нее частицы, и вероятность регистрации интересного события резко возрастает.

Пузырьковые камеры. В пузырьковой камере перегретая жидкость мгновенно вскипает мелкими пузырьками по следу ионизирующей частицы. Относительный перегрев жидкости достигается таким же способом, как и в камере Вильсона — быстрым снижением давления [72]. Преимуществ у пузырьковых камер три: первое состоит в том, что среда, в которой наблюдаются треки, является достаточно плотной, и это позволяет определять параметры частиц очень большой энергии. Второе преимущество состоит в том, что в момент цикла расширения в пузырьковой камере жидкость остается практически неподвижной из-за своей относительной несжимаемости, а в камере Вильсона в момент расширения газ в той или иной степени увлекается ходом поршня. Третье преимущество пузырьковой камеры — возможность использования в качестве тормозящей среды жидкого водорода, вещества, взаимодействие с ядрами которого (протонами) чаще всего изучается в физике высоких энергий.

Известно, что чистая жидкость может быть перегрета до температуры, при которой давление ее паров подчас в 10 раз и более превышает равновесное давление над жидкостью. В 1952 г. Глезер показал, что перегретая жидкость гораздо быстрее закипает в присутствии источника γ -излучения, а вскоре получил первую фотографию цепочки пузырьков — следа частицы.

Как показали исследования, перегрев жидкости, делающий ее чувствительной к ионам трека, должен быть значительным [72]. За счет избыточного давления жидкость в камере до цикла расширения не кипит. При недостаточном перегреве частица не образует в жидкости ни одного пузырька, а при недостаточной рабочей температуре, т. е. низком давлении равновесного пара, скорость роста пузырьков будет недостаточной.

Пузырьковые камеры делят на «чистые» и «грязные». Чистые — цельностеклянные камеры — позволяют поддерживать жидкость в сильно перегретом состоянии в течение нескольких секунд, однако они не получили распространения, так как через стеклянную колбу практически невозможно осуществить высококачественное фотографирование следа частицы. Для фотографирования треков необходимы оптические окна, вмонтированные в металлический корпус камеры. Такие камеры и называются грязными, так как содержат на стенках очень много зародышей паровой фазы. Тем не менее при надлежащей очистке и тренировке эти камеры вполне обеспечивают нужную степень расширения в течение времени, достаточного для синхронизации с ускорителем высокой энергии, с которым они обычно используются.

Пузырьки пара растут и начинают всплывать, искажая положение следа, поэтому чем быстрее их рост, тем точнее измерения.

Плотность следа однозарядной частицы зависит от ее скорости. Таким образом, помещая камеру в магнитное поле, можно по плотности треков и их кривизне определить для однозарядных частиц вначале скорость, а затем массу, т. е. идентифицировать частицы.

Сейчас многие пузырьковые камеры представляют собой сложные и даже уникальные инженерные сооружения большого размера, с рабочим объемом до нескольких кубических метров. Если учесть, что в камере такого объема находится жидкий водород и что авария такой системы может иметь буквально далеко идущие последствия, то ясно, что комплекс криогенных, механических, оп-

тических, магнитных и других проблем решается здесь целыми инженерными коллективами.

В качестве рабочей среды пузырьковых камер кроме водорода применяют многие жидкости, подчас специально с содержанием тяжелых атомов, например иодистый метил CH_3I . Часто используют пропан, который содержит большой процент водорода, но гораздо проще него в обращении фреоны. Эффект сжимаемости жидкости сказывается на работе пузырьковой камеры: при изменении давления объем жидкости изменяется на несколько процентов. Неодинаковая температура стенок у большой камеры ведет к довольно сильным конвективным потокам из-за малой вязкости и большого коэффициента термического расширения используемых жидкостей.

Фотографирование следа из пузырьков в камере имеет свои особенности. Пузырек нельзя рассматривать как матовое тело, видимое всем своим диаметром. В условиях освещения пузырька точечным источником в объектив попадает свет только от очень небольшой зоны пузырька либо в результате отражения от его стенок, либо преломления света на нем. Если источников света несколько, то каждый пузырек даст, в пределах своего диаметра, несколько отражений. При перемещении «точки зрения» по следу частицы направление освещенности пузырьков будет изменяться тем больше, чем ближе лампа-вспышка. Поэтому для уменьшения возможных ошибок в оценке кривизны следа следует располагать источник света подальше: это к тому же будет способствовать равномерной освещенности трека и правильной оценке плотности его участков. При расположении источника света вблизи фотографического объектива искажений описанного типа также не будет, однако яркость пузырька будет в этом случае обратно пропорциональна четвертой степени его расстояния от системы освещения и регистрации.

Очень существенным обстоятельством для пузырьковой камеры является глубина резкости фотографирования. Чем большая у объекта светосила, тем меньше его глубина резкости, тем больше требования к тому, чтобы трек лежал в фокальной плоскости наводки.

Обычно фотографирование производится на темном фоне: импульсные осветительные лампы располагаются либо внутри среды камеры, либо за иллюминаторами. На рис. 6.44 показана схема небольшой жидководородной камеры (объемом 8 л). Фотографирование треков в этой камере производится стереоаппаратом с базой 25 см. Линза *11* превращает пучок света от осветителя *7* в сходящийся пучок и позволяет вести фотографирование на темном поле. Камера помещена внутрь электромагнита, создающего поле до 12 кЭ.

Черенковские счетчики

Известно, что в прозрачной среде с показателем преломления n свет распространяется со скоростью c/n ; в то же время заряженные частицы могут двигаться со скоростью, близкой к c , т. е. быстрее скорости света в среде. В этом случае возникает черенковское излучение, волновой фронт которого имеет форму конической поверхности с углом раствора (от оси), косинус которого равен $\cos \theta = c/(v_{\text{част}}n)$. Нужно отметить, что свет распространяется не внутри указанного телесного угла, а *только* под этим углом к движению частицы, по образующим конуса, и ни под каким другим (как ударная волна от сверхзвукового самолета).

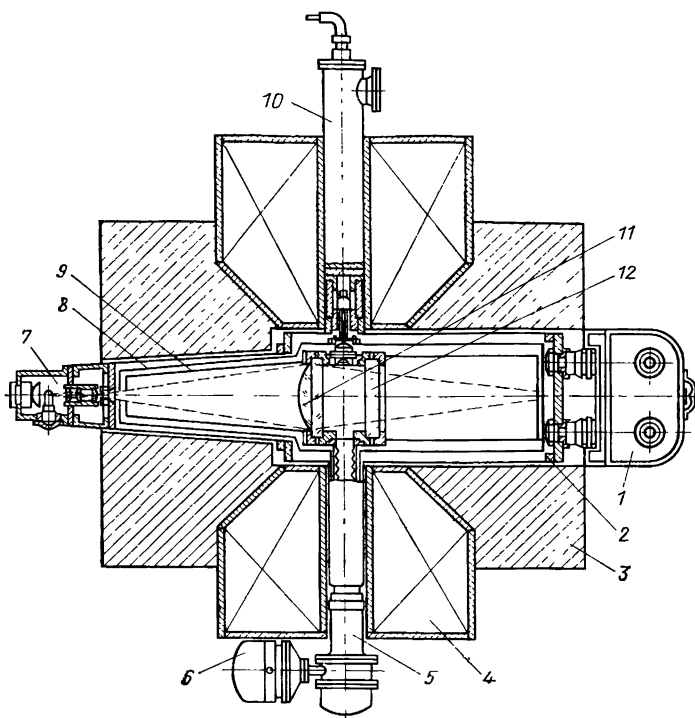


Рис. 6.44. Схема жидководородной пузырьковой камеры, помещенной в магнитное поле [72]:

1 — стереоаппарат; 2 — основной вакуумный кожух; 3 — ярмо магнита; 4 — катушки магнита; 5 — сильфонный механизм изменения давления; 6 — пневматический узел для стабилизации перегрева; 7 — осветитель (лампа ИФК-500 и конденсатор); 8 — азотный экран; 9 — водородный экран; 10 — кожух с резервными баками для водорода и азота; 11 — линза, обеспечивающая темное поле; 12 — стекло (ЛК-5, 40 мм толщиной)

Конечно, по мере торможения частицы угол θ меняется, но от элемента трека, где можно скорость частицы считать постоянной, свет распространяется именно под углом θ . Световой выход черенковского излучения невелик, но для частиц достаточно высокой энергии, о которых идет речь, квантов излучения оказывается вполне достаточно.

Можно, конечно, регистрировать частицы просто по излучению, независимо от его угловой направленности, но тогда мы будем регистрировать все частицы, скорости которых больше некоторого порога. Поэтому счетчики частиц по их черенковскому излучению — черенковские счетчики правильнее делать по более совершенной схеме — с «фокусировкой» по углу θ , т. е. с оптической схемой, пропускающей в ФЭУ только фотоны, вылетевшие под углом θ к оси системы (направлению частицы) (рис. 6.45). В этой схеме свет, испущенный под углом θ частицей, летящей параллельно оси световода из оргстекла, преобразуется с помощью ряда полных

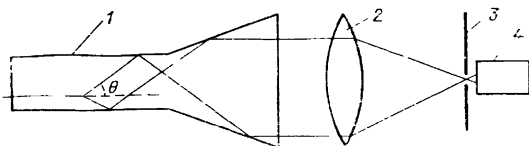


Рис. 6.45. Схема черенковского счетчика с фокусирующей фотонов, вылетевших под углом θ к оси системы [59]:

1 — световод с коническим расширяющимся концом из оргстекла; 2 — линза; 3 — диафрагма; 4 — ФЭУ

внутренних отражений от световода в пучок света, параллельный оси прибора, затем фокусируется линзой на диафрагму с отверстием, через которое проникает на катод ФЭУ. Перемещая линзу или диафрагму, можно добиться попадания на ФЭУ света от частиц с различными скоростями, испущенного под разными углами θ . Такая спектроскопия по скорости, учитывая релятивистские соотношения, нелинейна по энергии; энергетическое разрешение ухудшается по мере приближения v к c , однако в определенных пределах использование таких счетчиков очень полезно.

Для эффекта Черенкова нет, конечно, понятия высвечивания люминофора. Свет распространяется именно вместе с частицей, поэтому при длине детектора несколько сантиметров длительность светового импульса порядка 10^{-10} с, что позволяет изучать процессы с очень высоким временным разрешением.

Ядерные фотоэмульсии

Действие излучения приводит к активации и проявлению зерен бромистого серебра в фотоэмульсиях. Это используется в ядерной технике: во-первых, для целей дозиметрии, которая проводится с помощью специально разработанной и выпускаемой промышленностью рентгеновской пленки. В этом случае крупные зерна и слипшиеся группы зерен бромистого серебра проявляются целиком, и треков на такой эмульсии не видно: она темнеет так же, как и под

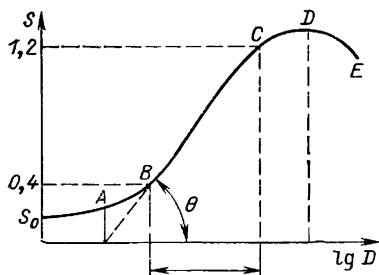


Рис. 6.46. Зависимость плотности почернения фотопленки от дозы [59]: область S_0A — область инерции; AB — недодержек; BC — нормальной экспозиции; CD — передержек; DE — соляризации

действием обычного света. Примерная зависимость почернения от дозы облучения показана на рис. 6.46. При достаточно больших дозах дальнейшее увеличение количества центров активации в кристаллах бромистого серебра ведет уже к обратному эффекту — понижению плотности почернения. Для надежного определения дозы облучения нужно работать только в области монотонной зависимости почернения от дозы, а также соблюдать режим проявления. Лучше одновременно проявлять несколько пле-

нок той же партии, экспонированных известными дозами. Фотоэмульсия более чувствительна к низкоэнергетическому γ и рентгеновскому излучению, чем к высокоэнергетическому, поэтому приходится вводить корректирующие фильтры. Чтобы обеспечить чувствительность к нейтронам, к эмульсии прижимают пластинку с тонким слоем бора.

Достаточно широко используют специальные ядерные фотоэмульсии. Они отличаются очень мелким зерном бромистого серебра и повышенной его концентрацией, а также гораздо большей толщиной эмульсионного слоя. У обычной эмульсии толщина слоя по AgBr выбирается с учетом поглощения в нем в момент экспонирования большей части света, более толстые слои не были бы экспонированы. Ядерная эмульсия должна регистрировать длиннопробежные частицы, и чем она толще, тем более длинные треки в ней укладываются. Проявляют такую эмульсию с помощью специально разработанных растворов и режимов обработки, с учетом медленной диффузии реактивов и продуктов реакции через желатин.

После проявления эмульсия, содержащая много AgBr , усаживается по толщине, что ведет к «деформации треков»: треки одних и тех же частиц, летящих внутрь эмульсии, получаются короче, чем когда частицы летят вдоль ее поверхности.

При исследовании частиц весьма больших энергий, когда треки заведомо не помещаются в одной эмульсии, применяют стопки пластинок; разумеется, совмещение треков в этом случае обеспечить достаточно сложно. Ядерные фотоэмульсии обладают очевидными недостатками: обработка материалов трудоемка, набор ядер, с которыми происходит взаимодействие, ограничен, результаты получаются не сразу. В то же время эта методика имеет и большие преимущества: документальность, нечувствительность к наводкам, кроме ионизирующего излучения, интегрирование событий за большие интервалы времени, возможность размещения на длительный период в горах, космосе.

Просмотр и обмер треков в ядерных фотоэмульсиях является трудоемкой операцией. Созданы системы, частично автоматизирующие этот процесс.

Калориметрические методы

В тех случаях, когда излучение препарата достаточно интенсивно, регистрировать его «поимпульсно», а затем интегрировать с помощью электронных схем — значит идти не самым простым путем. Тепловыделение в облучаемом веществе ведет к его нагреву, который легко регистрируется термодарами; таким способом можно регистрировать излучение достаточно избирательно, используя дифференциальную методику. Приведем самый простой пример. Возьмем две термодары и на каждую из них нанесем по 10 мг урана; на одну ^{235}U , на другую ^{238}U . Поместим обе термодары в теплоизолятор, так чтобы теплоотдача была не конвективной, а за счет теплопроводности — это сделает ΔT пропорциональным

тепловыделению, т. е. линеаризует шкалу. Включив обе термопары дифференциально, мы получим детектор нейтронов, показания которого пропорциональны интегралу от нейтронного потока по сечению деления ^{235}U , как в случае камеры деления. Такой детектор предельно прост по конструкции и не так уже малочувствителен; он легко регистрирует мощность 0,001 Вт, что соответствует при 10 мг ^{235}U плотности потока тепловых нейтронов $3 \cdot 10^9 \text{ 1/(см}^2 \cdot \text{с)}$.

Динамический диапазон такого детектора может превышать два порядка; это неплохо, но у счетных приборов этот диапазон, пожалуй, выше.

Калориметрическим методом часто измеряют энергию электронных и ионных пучков, здесь преимущество этого метода состоит в том, что можно одинаково просто измерять ее и в непрерывном режиме, и в импульсном с определенной частотой повторения.

Радиоактивные индикаторы

В физике низких энергий радиоактивные индикаторы применяют главным образом для регистрации нейтронных потоков. Сложный характер сечений активации различных элементов, а тем более отдельных изотопов дает возможность богатого выбора индикаторов, преимущественно чувствительных к определенным областям спектра нейтронов и обладающих достаточно большим сечением и подходящим периодом полураспада.

Активность индикатора, помещенного в постоянный нейтронный поток, возрастает со временем по закону:

$$dN/dt = \Phi \Sigma m [1 - \exp(-\lambda t)],$$

где λ — константа скорости распада; m — масса индикатора; Σ — макроскопическое сечение в расчете на единицу массы; Φ — плотность потока нейтронов; dN/dt — скорость распадов образующегося радионуклида. Эта формула верна в отсутствие эффекта самоэкранирования; при облучении индикатора, как это обычно бывает, сложным спектром нейтронного потока вместо произведения $\Phi \Sigma$

нужно писать интеграл $\int_0^\infty \Sigma(E) \Phi(E) dE$.

Через два-три периода полураспада после начала облучения активность индикатора достигает насыщения, и дальнейшее облучение бесполезно. Обычно извлечение индикатора из зоны облучения и перемещение в счетную установку требуют нескольких минут. Таким образом, индикаторы с очень коротким периодом полураспада неудобны в работе.

Дело здесь не только в потере индикатором значительной части активности, но и в резком возрастании ошибок, связанных с растянутым во времени процессом прекращения облучения индикатора. В то же время при слишком большом периоде полураспада уменьшается удельная активность и затрудняется достаточно быстрое повторное использование индикатора. Практически широко ис-

пользуют индикаторы с периодом от нескольких минут до нескольких суток.

Следует перечислить некоторые индикаторы, широко применяемые в нейтронной физике.

Медь. Сечение активации при небольшой энергии нейтронов подчиняется закону $1/v$; $\sigma_{\text{тепл}}=4,5$ б; $T_{1/2}=12,9$ ч. При энергии нейтронов больше 100 эВ имеются резонансы. Применяется совместно с кадмиевыми экранами для оценки отношения потоков тепловых и резонансных нейтронов, измерения интегрального потока, распределения потока по профилю. Промышленность выпускает медь в любой геометрической форме. При работе на критических сборках необходима достаточно большая мощность для активации медных индикаторов. Толщина индикаторов определяется прозрачностью к собственному β -излучению и составляет около 0,1 мм.

Индий. Сечение активации носит резонансный характер: $\sigma_{\text{тепл}}=155$ б; резонансный интеграл активации 2639 б. Применяется в основном для измерения плотности потока резонансных нейтронов. Расположенный при $E=1,44$ эВ резонанс ведет к тому, что индий в активной зоне реактора активируется резонансными нейтронами не в меньшей степени, чем тепловыми. Высокое резонансное сечение индия требует использования очень тонких индикаторов для предотвращения самоэкранирования. Индий — металл очень мягкий. Индикаторы из него требуют аккуратного обращения. Сделать его более твердым и увеличить допустимую толщину можно, например, сплавляя с оловом.

Золото — используют для тех же целей, что и индий. Очень мощный резонанс расположен у золота при энергии 4,9 эВ. Максимальное сечение в резонансе достигает 30 000 б; $\sigma_{\text{тепл}}=96$ б; резонансный интеграл 1558 б; $T_{1/2}=2,7$ сут. Достоинство золота — высокая стабильность, недостатки — высокая стоимость и особые условия его учета и хранения. Индикаторы, если изучается спектр резонансных нейтронов, должны быть очень тонкими. Недостаток золота — довольно большой период полураспада.

Уран-235 — применяют для измерения нейтронного потока, взвешенного по сечению деления. Активация происходит благодаря накоплению осколков деления, имеющих широкий спектр периодов полураспада, поэтому активность этого индикатора не достигает насыщения. Затруднен также и «отдых» урановых индикаторов. Из урана изготавливают различные изделия, в том числе и прокат, но не очень тонкий. Тонкие слои окиси урана можно наносить, например, на никелевую фольгу прокаливанием высушенного на фольге раствора уранилнитрата в органических растворителях.

Уран-238 — применяют для измерения интеграла резонансного захвата, характеризующего уровень воспроизводства плутония в реакторе. Захват нейтрона ведет к образованию ^{239}U с периодом полураспада 23,54 мин и энергией β -частиц 1,29 МэВ; ^{239}U , в свою очередь, превращается с периодом полураспада 2,346 сут в ^{239}Pu .

Для регистрации этого процесса в чистом виде лучше всего пользоваться не природным ураном, а глубоко обедненным, почти не содержащим ^{235}U .

Изучение баланса нейтронов в макете ядерного реактора проводят следующим образом: изготавливают ядерно-физический макет ячейки активной зоны с узким разрезом по ее центральной плоскости. В этот разрез и закладывают различные индикаторы, с помощью которых оценивают те или иные параметры изучаемой конструкции. Неизбежный зазор между индикаторами и разрезанными

твэлами может несколько исказить результаты. Сделать этот зазор нулевым сложно, а экстраполировать данные к нулевому зазору, получив их при двух хорошо измеренных ненулевых зазорах, вполне реально.

6.4. РЕГИСТРАЦИЯ ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ МАЛОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Малая интенсивность ядерных излучений затрудняет их регистрацию. Возрастает время счета и вклад фоновой активности, увеличивается вероятность регистрации помех, возрастают требования к стабильности аппаратуры и ее чистоте. Увеличение площади или объема счетчиков, массы радиоактивного образца, конечно, увеличивают уровень сигнала, но вместе с тем возрастает и фон аппаратуры.

Типичными задачами, изучение которых требует измерения ядерных излучений малой интенсивности, являются, например, задачи по датировке геологических и археологических образцов, исследование радиоактивности нуклидов с очень большими периодами полураспада, изучение распространения следов радиоактивных веществ вокруг ядерных объектов и в атмосфере. Предельно сложной задачей является регистрация нейтрино.

Классическим примером измерения слабых излучений является исследование радиоактивности ^{14}C в археологических образцах [67]. Период полураспада ^{14}C около 5700 лет, его концентрация в углекислом газе атмосферы и углеводе органических веществ, живых или только что отмерших организмов, составляет около 10^{-10} %. Этот нуклид является источником β -излучения с максимальной энергией 156 кэВ. Активность образцов, удаленных по шкале времени на 10 тыс. лет, равна 9 % первоначальной активности.

Обычно для счета излучения ^{14}C пользуются газовыми счетчиками большого объема. Препарат углерода чаще всего переводится в CO_2 , на котором и работает счетчик при давлении, близком к атмосферному. Получаемый CO_2 требует очень тщательной очистки (например, от воды), выполнить которую не так просто. В связи с этим исследователи работают с метаном, очистить который много легче, а также с элементарным углеродом, который наносится на стенки счетчика. Последний способ позволяет использовать для наполнения счетчика благородные газы, но он несколько менее эффективен: половина β -частиц теряется сразу, вылетая в сторону стенки, а эффективная толщина наносимого слоя также невелика.

Большой счетчик высокого давления регистрирует очень значительный космический фон. Применение многотонной защиты, а еще лучше — расположение счетчика глубоко под землей позволяет существенно понизить фон, который все же остается выше допустимого уровня. Для дальнейшего уменьшения фона используется известный прием — окружение главного детектора кольцом счетчиков, включенных с ним по схеме антисовпадений. Схема антисовпадений защищает центральный счетчик тем, что в момент регистрации импульса одним из периферийных счетчиков счет главного счетчика блокируется. Таким образом, космические частицы, летящие извне, не сосчитываются, кроме случаев, когда они летят с торца, где защиту обеспечить труднее. Поэтому оптимальное расположение всей системы — горизонтальное, так как с линии горизонта космический фон невелик.

Кольцо счетчиков не защищает центральный счетчик от счета его собственной, примесной, аппаратурной радиоактивности. Основным элементом, ответственным за эту активность, является ^{40}K , однако могут встретиться и другие сла-

борадииоактивные нуклиды. Обычное стекло содержит калий и не годится для создания счетчиков с пониженным уровнем фона. Промышленность выпускает для таких целей безкалиевое стекло; можно также вообще отказаться от этого материала.

При измерениях малой активности приходится для набора статистики вести счет образца длительное время. Всегда возможно появление источников сильных помех (по улицам ходят трамваи и троллейбусы, работает электросварка, где-то могут включаться и более мощные устройства). Электронные блоки детектора и пересчетные устройства вполне могут реагировать на помехи, особенно если они идут через сеть, поэтому аппаратуру такого рода обязательно надо проверить на помехоустойчивость. Сделать это проще всего, создав искусственные помехи и посмотрев на результат; если аппаратура будет «считать» помехи, то нужно поставить фильтры на входе питания и принять другие меры, описанные автором в разделе борьбы с наводками.

Уровень счета повышается при концентрировании источников активности. В случае ^{14}C такое концентрирование — выделение C или CO_2 из природных образцов — делается всегда.

Для изучения содержания радиоактивных изотопов ксенона и криптона в атмосфере эти газы выделяют из общей массы воздуха и уже потом исследуют их радиоактивность.

Удельная активность препарата может быть намного повышена, если проводить контролируемое изотопное обогащение.

Для проведения изотопного обогащения необходима значительная масса вещества. В промышленные разделительные установки обычно загружаются многие килограммы и даже сотни килограммов сырья.

Однако для большинства изучаемых слаборадиоактивных изотопных смесей вполне возможно создание сравнительно небольших установок, разделяющих изотопы: в случае ^{14}C , например, археологические образцы обычно имеют достаточно большую массу для обогащения в таких установках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стронг Д. Техника физического эксперимента: Пер. с англ. — Л. — М.: Лениздат, 1948. — 643 с.
2. Стронг Д. Практика современной физической лаборатории: Пер. с англ. — М. — Л.: Гостехиздат, 1948. — 44 с.
3. Ангелер Э. Техника физического эксперимента: Пер. с нем. М.: Физматгиз, 1962. — 452 с.
4. Соколов М. П. Автоматические измерительные устройства в экспериментальной физике. — М.: Атомиздат, 1978. — 352 с.
5. Особенности применения приемно-усилительных ламп/Б. А. Говоров, В. И. Кричевский, Н. Л. Новикова, А. К. Рубан, Е. А. Сорвин. — М.: Сов. радио, 1966. — 342 с.
6. Переход металл — неметалл в плотном металлическом паре/И. К. Кикоин, А. П. Сенченков, С. П. Наурзаков, Э. Б. Гельман. — Препринт ИАЭ, 1973. — 24 с.
7. Сигорский В. П. Математический аппарат инженера. — Киев: Техника, 1975. — 766 с.
8. Юз Д. Нейтронные исследования на ядерных котлах: Пер. с англ. — М.: Изд-во иностр. лит., 1954. — 476 с.
9. Яковлев К. П. Математическая обработка результатов измерений. — М.: Гостехтеориздат, 1953. — 384 с.
10. Яноши Л. Теория и практика обработки результатов измерений: Пер. с англ. 2-е изд. — М.: Мир, 1968. — 462 с.
11. Драксел Д. Основы электроизмерительной техники: Пер. с нем. — М.: Энергоиздат, 1982. — 293 с.
12. Основные формулы физики/Под ред. Мензела: Пер. с англ. — М.: Изд-во иностр. лит., 1957. — 657 с.
13. Кучис Е. В. Методы исследования эффекта Холла. — М.: Сов. радио, 1974. — 328 с.
14. Терещук Р. М., Домбургов Р. М., Босый Н. Д. Справочник радиолюбителя. — Киев: Изд-во АН УССР, 1962. — 840 с.
15. Демьянов В. В., Акулиничев И. Г. Резонансные усилители на лампах и транзисторах. — М.: Энергия, 1970. — 136 с.
16. Шор К. Г. Селекторы телевизионных каналов на транзисторах. — М.: Энергия, 1973. — 67 с.
17. Ремез Г. А. Курс основных радиотехнических измерений. — М.: Связь, 1966. — 423 с.
18. Гольденберг Л. М. Импульсные и цифровые устройства. — М.: Связь, 1973. — 495 с.
19. Яковлев В. Н. Импульсные генераторы на транзисторах. — Киев, Техника, 1968. — 443 с.
20. Самойлов В. Ф., Маковеев В. Г. Импульсная техника. 3-е изд. — М.: Связь, 1971. — 224 с.
21. Высоковольтное испытательное оборудование и измерения/Под ред. А. А. Воробьева. — М. — Л.: Госэнергоиздат, 1960. — 584 с.
22. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов. — М.: Энергия, 1976. — 543 с.
23. Долгинов А. И. Техника высоких напряжений в электроэнергетике. — М.: Энергия, 1968. — 464 с.
24. Шиллинг В. Тиристорная техника: Пер. с нем. — Л.: Энергия, 1971. — 264 с.
25. Шольц Н. Н., Пискарев К. А. Ферриты для радиочастот. — М. — Л.: Энергия, 1962. — 258 с.
26. Линде Д. П. Радиопередающие устройства. — М.: Энергия, 1969. — 680 с.

27. Сенченков А. П., Керсновский С. В. Электронный генератор на 500 кэВ. — Приборы и техника эксперимента, 1961, № 3, с. 26.
28. Электростатические генераторы. Сборник статей под ред. А. К. Вальтера. — М.: Атомиздат, 1959. — 255 с.
29. Электрорадиоматериалы/М. В. Курлин, Я. И. Панова, В. В. Пасынков, В. Н. Таиров. — Л.: Судостроение, 1969. — 342 с.
30. Буц В. П., Железнов М. Г., Юринов М. М. Вакуумные конденсаторы. — Л.: Энергия, 1971. — 133 с.
31. Таблицы физических величин/Под ред. И. К. Кикоина. — М.: Атомиздат, 1976. — 1006 с.
32. Электрический пробой и разряд в вакууме/И. Н. Сливков, В. И. Михайлов, Н. И. Сидоров, А. И. Настюха. — М.: Атомиздат, 1966. — 297 с.
33. Каганов И. Л. Ионные приборы. — М.: Энергия, 1972. — 525 с.
34. Ренне В. Т. Электрические конденсаторы. — Л.: Энергия, 1969. — 592 с.
35. Подъяпольский Б. А., Попов В. К. Импульсные модуляторные лампы. — М.: Сов. радио, 1967. — 64 с.
36. Киселев Ю. В., Черепанов В. П. Искровые разрядники. — М.: Сов. радио, 1976. — 68 с.
37. Арцимович Л. А., Лукьянов С. Ю. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях. — М.: Наука, 1972. — 223 с.
38. Пипко А. И., Плисковский В. Я., Пенчко Е. А. Конструирование и расчет вакуумных систем. — М.: Энергия, 1979. — 503 с.
39. Данилин Б. С., Минайчев В. Е. Основы конструирования вакуумных систем. — М.: Энергия, 1971. — 392 с.
40. Пасынков В. В. Материалы электронной техники. — М.: Высшая школа, 1980. — 406 с.
41. Левин Г. Основы вакуумной техники: Пер. с англ. — М.: Энергия, 1969. — 272 с.
42. Гладков А. С., Подвигина О. П., Чернов О. В. Пайка деталей электровакуумных приборов. — М.: Энергия, 1967. — 288 с.
43. Эспе В. Технология электровакуумных материалов. Т. II: Пер. с нем. — М.: Энергия, 1968. — 446 с.
44. Рот А. Вакуумные уплотнения: Пер. с англ. — М.: Энергия, 1971. — 463 с.
45. Лейканд М. С. Вакуумные электрические печи. — М.: Энергия, 1968.
46. Дашман С. Научные основы вакуумной техники: Пер. с англ. — М.: Мир, 1964. — 715 с.
47. Гайах Т., Мелузин Г., Бернат И. Простейшие электротехнические расчеты: Пер. со словацкого. — М.: Энергия, 1968. — 287 с.
48. Контактные уплотнения вращающихся валов/Г. А. Голубев, Г. М. Кукин, Г. Е. Лазарев, А. П. Чичинадзе. — М.: Машиностроение, 1976.
49. Френкель Н. З. Гидравлика. — Л.: Госэнергоиздат, 1947.
50. Основы технологии производства электровакуумных приборов/А. Е. Иорши, Я. А. Кауфман, С. В. Птицын, А. А. Шейнгауз. — Л.: Энергия, 1971. — 311 с.
51. Маршак И. С. Импульсные источники света. — М.: Госэнергоиздат, 1963.
52. Востров Г. А., Розанов Л. М. Вакуумметры. — Л.: Машиностроение, 1967. — 235 с.
53. Физика космических лучей. Т. 1/Под ред. Д. Вильсона: Пер. с англ. — М.: Изд-во иностр. лит., 1954. — 438 с.
54. Либби В. Ф. Радиоуглеродный метод определения возраста. — В кн.: Материалы международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1955. Т. 16. — М.: Изд-во АН СССР, 1957, с. 94—105.
55. Berger R., Libby W. F. Radiocarbon. V. 9. — Los-Angeles. University of California, 1967, p. 447—504.
56. Мощные наносекундные импульсные источники ускоренных электронов. Сб. статей/Под ред. Г. А. Месяца. — Новосибирск: Наука, 1974. — 167 с.
57. Голубев Б. П. Дозиметрия и защита от ионизирующих излучений. — М.: Атомиздат, 1976.
58. Грошев Л. В., Адьясевич Б. П., Демидов А. М. Физические исследования. Доклад на международной конференции по мирному использованию атомной энергии. — М.: Изд-во АН СССР, 1955, с. 252.

59. Долгирев Д. И., Малеев П. И., Сидоренко В. В. Детекторы ядерных излучений. — Л.: Судпромгиз, 1961. — 223 с.
60. Власов Н. А. Нейтроны. — М.: Наука, 1971. — 551 с.
61. Каретников Д. В., Сливков И. Н., Тепляков В. А. Линейные ускорители ионов. — М.: Госатомиздат, 1962. — 208 с.
62. Хойзингтон Д. Б. Основы ядерной техники: Пер. с англ. — М.: Госатомиздат, 1961. — 398 с.
63. Воробьев А. А., Горбунов В. И., Ананьев Л. М. Бетатрон и его применение. — Томск, Томское книжное изд-во, 1968. — 84 с.
64. Молоковский С. И., Сушков А. Д. Интенсивные электронные и ионные пучки. — Л.: Энергия, 1972. — 271 с.
65. Сенченков А. П., Кузнецов Ф. М. Измерение спектра нейтронов в тепловой колонне реактора атомной электростанции. — Атомная энергия, 1958, т. 5, вып. 2, с. 124—129.
66. Блохин Г. Е. и др. — Атомная энергия, 1961, т. 10, с. 437.
67. Рублевский В. П., Голенецкий С. П., Кирдин Г. С. Радиоактивный углерод в биосфере. — М.: Атомиздат, 1979. — 147 с.
68. Медведев М. Н. Сцинтилляционные детекторы. — М.: Атомиздат, 1977. — 137 с.
69. Соболева Н. А., Меламид А. Е. Фотоэлектронные приборы. — М.: Высшая школа, 1974.
70. Фотоэлектронные приборы/Н. А. Соболева, А. Г. Берковский, Н. О. Чечик, Р. Е. Елисеев. — М.: Наука, 1965. — 592 с.
71. Вильсон Дж. Камера Вильсона: Пер. с англ. — М.: Изд-во иностр. лит., 1954. — 152 с.
72. Пузырьковые камеры/Ю. А. Александров, Г. С. Воронов, В. М. Горбунков, Н. Б. Делоне, Ю. И. Нечаев. — М.: Атомиздат, 1963.
73. Атлас спектров γ -лучей радиационного захвата тепловых нейтронов/Л. В. Грошев, А. М. Демидов, В. Н. Луценко, В. И. Мелехов. — М.: Атомиздат, 1958.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. Создание и эксплуатация экспериментальных устройств	5
1.1. Планирование создания установки	7
1.2. Время и затраты на разработку устройств и эксперимент	9
1.3. Необходимость и масштабы автоматизации	10
Глава 2. Обработка экспериментальных данных	20
2.1. Характер погрешностей и особенности применения измерительных и регистрирующих устройств	20
2.2. Основные задачи, решаемые при обработке опытных данных	22
2.3. Графическая, аналитическая и машинная обработка результатов эксперимента	23
2.4. Оценка погрешности полученных результатов	28
Глава 3. Измерение и регистрация электрических величин	30
3.1. Электрические сигналы, поступающие от экспериментальных устройств	30
3.2. Борьба с наводками	32
3.3. Преобразующие устройства	39
3.4. Выходные регистрирующие и показывающие устройства	59
3.5. Связь экспериментальных устройств с ЭВМ	62
Глава 4. Работа с высоким напряжением	62
4.1. Источники высокого напряжения	63
4.2. Внешняя арматура высоковольтных устройств	77
4.3. Свойства различных диэлектриков	81
4.4. Вакуумные высоковольтные устройства, электронные и ионные ускоряющие трубки	90
4.5. Сильноточные импульсные устройства	94
Глава 5. Вакуумная техника	105
5.1. Общие принципы построения вакуумных систем	105
5.2. Материалы вакуумных систем	111
5.3. Скорость откачки через коммуникации	124
5.4. Элементы вакуумной арматуры	127
5.5. Циркуляция газов в герметичных контурах	143
5.6. Вакуумная гигиена отпаянных приборов, геттеры, термокатоды	145
5.7. Измерение низких давлений	151
5.8. Вакуумные насосы	154
5.9. Поиск течей в вакуумных системах	159
Глава 6. Работа с ядерными излучениями	162
6.1. Источники ядерных излучений	162
6.2. Проникающая способность и фильтрация различных ядерных излучений	194
6.3. Регистрация ядерных излучений	202
6.4. Регистрация ядерных излучений малой интенсивности	232
Список литературы	234

АНАТОЛИЙ ПАВЛОВИЧ СЕНЧЕНКОВ

ТЕХНИКА ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Редактор О. П. Дунаева

Переплет художника О. В. Камаева

Технический редактор В. В. Хапаева.

Корректор И. А. Володяева

ИБ № 469

Сдано в набор 12.05.83. Подписано в печать 05.09.83. Т-18919.

Формат 60×90¹/₁₆ Бумага типографская № 1 Гарнитура

литературная. Печать высокая. Усл. печ. л 15,0. Усл. кр.-отт. 15,0.

Уч.-изд. л. 18,02. Тираж 4500 экз. Заказ 400 Цена 2 р. 30 к.

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Московская типография № 6 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 109088, Москва, Ж-88, Южнопортовая ул., 24.

В 1984 г. в Энергоатомиздате выйдут следующие книги по технике эксперимента и методам измерений:

Данилевич В. В., Чернявский А. Ф. Временные измерения в физическом эксперименте. — 8 л.

Систематизированы и даны оценки минимизации методических и аппаратных погрешностей временных измерений, временной фильтрации и селекции высокоинтенсивных потоков сигналов датчиков физических процессов, структурного и функционального синтеза информационной времяизмерительной аппаратуры и ее метрологического обеспечения.

Для научных работников, занятых в области экспериментальной физики и информационно-измерительной техники.

Цветков Э. И. Методические погрешности статистических измерений. — 12,5 л.

Даны общие определения и классификация методических погрешностей результатов измерений значений вероятностных характеристик случайных процессов. Проведен анализ статистических погрешностей, а также систематических и среднеквадратических погрешностей из-за неадекватности и неидеальности реализуемых алгоритмов измерений.

Для научных и инженерно-технических работников, занимающихся исследованием свойств случайных процессов, разработкой и эксплуатацией средств статистических измерений. Может быть полезна преподавателям и аспирантам вузов.

Грановский В. А. Динамические измерения: Основы метрологического обеспечения. — 15,5 л.

Изложены основы метрологического обеспечения динамических измерений. Сформулированы основные проблемы, даны определения исходных величин. Дано математическое описание динамических режимов средств измерений. Исследованы методы нахождения динамических характеристик, сформулированы требования к испытательным сигналам. Изложены методы оценки и коррекции динамических погрешностей.

Для инженерно-технических работников, занятых измерениями, и разработчиков средств измерений.

Бессонов А. А., Мороз А. В. Надежность систем автоматического регулирования. — 15,5 л.

Изложены основы теории, определены возможности построения количественных характеристик, планирования, испытаний, обеспечения, повышения, оптимизации и прогнозирования надежности систем автоматического регулирования (САР), в том числе с помощью ЭВМ при автоматизированном проектировании.

Для специалистов, проектирующих, испытывающих и эксплуатирующих САР, служб надежности, студентов, аспирантов и преподавателей вузов.

На интересующие Вас издания советуем оформить предварительные заказы в местных книжных магазинах, распространяющих научно-техническую литературу.

Предварительный заказ оформляется на обычной почтовой открытке. В графах «куда» и «кому» укажите свой адрес и фамилию, на обороте — фамилию автора, название заказываемой книги и порядковый номер по плану выпуска литературы.

