

ВЫПУСК

136

Библиотечка КВАНТ



Л. А. Ашкинази



РЕКОРДЫ И ПРЕДЕЛЫ



Библиотечка «Квант»
Приложение к журналу «Квант» № 1/2016

Л. А. Ашкинази

Рекорды и пределы,
или Введение в экстремальное
материаловедение

Электронное издание

Москва
Издательство МЦНМО
2016

УДК 620
ББК 30.3
А98

Ашкинази Л. А.

Рекорды и пределы, или Введение в экстремальное материаловедение
Библиотечка «Квант». Вып. 136. Приложение к журналу «Квант» № 1/2016.
Электронное издание.

М.: МЦНМО, 2016.

144 с.

ISBN 978-5-4439-3026-8

Нас окружают материалы. Еда и одежда, дома и самолеты, книги и компьютеры — все сделано из материалов. Параметры всех вещей зависят от параметров материалов, а также от конструкции и технологии. Попытки создания новых материалов, «самых-самых», с какими-то доселе не виданными и не слышанными значениями параметров упираются в физику, а также в химию.

В книге рассматриваются электрические, магнитные, электромагнитные (в том числе и оптические) и тепловые параметры материалов. Обсуждается, каковы предельные значения этих параметров, чем они определяются и ограничиваются.

Книга адресована самому широкому кругу читателей.

Подготовлено на основе книги:

Ашкинази Л. А.

Рекорды и пределы, или Введение в экстремальное материаловедение. — М.: МЦНМО, 2016. — 144 с. (Библиотечка «Квант». Вып. 136.

Приложение к журналу «Квант» № 1/2016.) — ISBN 978-5-4439-1026-0

Издательство Московского центра
непрерывного математического образования
119002, Москва, Большой Власьевский пер., 11,
тел. (499)241-08-04.

<http://www.mcsme.ru>

ISBN 978-5-4439-3026-8

© Ашкинази Л. А., 2016.

© МЦНМО, 2016.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Глава 1. Классификация параметров. Условия и размеры	7
Глава 2. Проводники	10
Массивный образец, обычные условия	10
Малое – это прекрасно	13
Давление, радиация, магнитное поле	14
Самое насущное – температура	15
К сверхвысокотемпературным вершинам	18
«Внутренние» параметры	20
Немного не рекордного	21
Глава 3. Изоляторы	24
Принципиальная роль нелинейности – пробой	24
Вакуум – проводимость и пробой	25
Вакуумный пробой – влияния и достижения	27
Диэлектрик, который вокруг нас	29
Все течет, электропрочность изменяется	33
В тихом омуте	34
Твердое со всех сторон	36
Изолятор в условиях	39
Пробой	43
Наше не маленькое ϵ	48
Короче, еще короче	51
Импульсы и частоты – близнецы, но не братья	53
Кулон и за его спиной	56
Немного о тепле	60
Глава 4. Поле, кроме электрического	61
Пара- и диа-	61
Элемент, вещество, материал	63
Ферромагнетики и зачем они	65
Про обратимость и тепло	69
Глава 5. Полупроводники	71
Ширина того, что есть не у всех	71
«Подвижный в подвижном»	75
Глава 6. Выйдем, поговорим?..	78
Ток наружу	78

Термоэмиссия	79
Эмиссия фото-, авто- и горячих без нагрева	83
Вторично-эмиссионные катоды и одна общая проблема	84
Глава 7. Оптика	90
Почему ее выделяют	90
Коэффициент преломления	91
Композиты. Кратко	96
Дисперсия	98
За границами видимого	99
Оптоволокно, поглощение, рассеивание	105
Отражение, поглощение, излучение	107
Поккельс, Керр...	109
Глава 8. Тепловые параметры	111
Начнем с самого начала	111
Плавление и температура	113
Плавление и теплота фазового перехода	119
Аккумуляция вообще и теплоаккумуляция в частности	120
Кипение и температура	121
Кипение и теплота фазового перехода	125
Обратная задача энергетики	126
Теплопроводность и тепловые трубы	129
Коротко про три «тепло»	134
Глава 9. Вроде бы заключение	135
О познаваемости	135
Про загадочное и красивое	136
Внимание, вопрос. Точнее – вопросы...	138

Книги и серии статей обычно предваряются небольшим текстом, где предвещающий общение с читателем автор сообщает, почему он это написал и кому признателен, и объясняет, почему читателю надо купить и прочесть именно эту книгу.

Итак, приступим.

Нас окружают материалы. Еда и одежда, дома и самолеты, книги и компьютеры – все сделано из материалов. Параметры всех вещей – вкус еды и непромокаемость одежды, прочность дома и надежность самолета, долговечность книги и память компьютера – зависят и от параметров материала. Почему «и» и от чего еще? От конструкции и технологии – от того, как сконструировано и как сделано.

Взаимодействие между конструктором, технологом и материаловедом, говоря предельно упрощенно, устроено так. Конструктор, когда он конструирует, исходит из имеющихся материалов и технологических процессов. Он может пофантазировать: «А здорово было бы, если бы...» и даже может поговорить на эту тему с суровым материаловедом (за стаканом кефира – см. «Улитку на склоне» А. и Б.Стругацких) или с обаятельным технологом (за чашечкой кофе и тирамису), но даже если они и решат поставленную конструктором задачу, то всяко не к утру. Поэтому основа мышления конструктора – существующие материалы и технологии. Только он может использовать предоставленные ими возможности, и от него зависит, насколько полно они будут использованы. Хороший конструктор будет использовать материалы с наилучшими параметрами или их сочетаниями. В зависимости от конкретной задачи самыми важными параметрами могут оказаться различные – поэтому постараемся рассмотреть побольше параметров.

Конструирование, технология и материаловедение – все они связаны с физикой, но по-разному. Конструктор непрерывно решает уравнения механики, оптики, тепло-, массо- и электропереноса – он это делает посредством программных систем, которыми пользуется. Кроме того, хотя уравнения касаются процессов физических, но сами-то они – математические. Знание физики поможет конструктору работать, сократит поиск и убе-

режет от ошибок, которые по наивности делают иногда программы, но вот технолог и материаловед без физики не смогут обойтись вообще. Попытки создания новых материалов, «самых-самых», с какими-то доселе не виданными и не слышанными значениями параметров упираются в физику. А также в химию.

Достичь предельных значений параметров материалов, вступить на вершину Эвереста и на дно Марианской впадины, обогнать звук на земле и десятикратно в воздухе, понять, как устроена Вселенная и как работает мозг, – все это человеческая культура. Вместе со всеми страстями и эмоциями, со всеми жертвами и победами, со всеми вернувшимися и не вернувшимися. Это человеческая культура – моя и ваша.

И поэтому мы займемся предельными параметрами материалов: каковы они, чем определяются и ограничиваются. А еще и потому, что материалы с рекордными параметрами нужны для решения всех этих задач – на земле и под водой, в воздухе и в космосе, в лабораториях и даже в мечтах.

Я благодарю всех, кто прочитал текст предлагаемой книги, но прежде всего – Анатолия Дедкова, Аллу Кузнецову, Екатерину Купраш и Дарью Холоденко, сделавших много полезных замечаний, из коих большинство я учел. А также – всех учащихся ФМШ МИЭМ, которые ходили ко мне на занятия и задавали вопросы.

КЛАССИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ. УСЛОВИЯ И РАЗМЕРЫ

Начнем мы с разбора вопроса о классификации и связи параметров.

Техника и физика – это вам не математика, классификация в них не бывает жестка и однозначна, всегда возможны (и зачастую имеются) какие-то промежуточные варианты, переходные и смешанные формы. Тем не менее, даже не слишком четкая классификация помогает пониманию, а иногда – демонстрацией прорех – наводит на интересные идеи.

Классифицировать параметры можно, заимствуя структуру из физики: механические, тепловые, электрические, оптические и так далее. Эта классификация – да и вообще деление именно на эти разделы – применяется в физике потому, что именно так «кучкуются» параметры, чаще всего попадая в одни и те же формулы, которые и применяются для решения задач. Действительно, вряд ли вам встречалась формула, в которой механические напряжения соседствуют с электрическими, хотя такую связь придумать можно. Не часто видят друг друга в одной дроби механические параметры и оптические, хотя и это можно вообразить. Однако законы Ньютона, Ома и Снеллиуса нам более привычны.

Другой возможный способ классификации – по кругу задач или области применения. Любой грамотный инженер понимает, о каких материалах и о каких параметрах в основном пойдет речь в книге с названием «Материалы мощных лазеров» или, скажем, «Вакуумные материалы». Причем физическая и инженерная классификации пересекаются, т.е. из предложенных названий книг сразу видно, параметры каких групп будут наиболее существенны для этих двух областей. Впрочем, всегда возможны – и происходят – неожиданности. И это прекрасно.

В этой книге мы будем обсуждать прежде всего все электрическое и магнитное, т.е. электрические, магнитные, электромагнитные (в том числе и оптические!) и эмиссионные параметры. Скажем сразу, что даже это деление ущербно – потому что реальная работа и проводников, и изоляторов сильно зависит от тепловых параметров, поскольку выделяющиеся в них тепло надо отводить, иначе, сами понимаете... Так что тепловым параметрам тоже будет уделено некоторое внимание.

Со школы мы знаем, что у металлов и полупроводников электропроводность зависит от температуры, а вот у диэлектриков – нет, что теплоемкости различных газов при постоянном давлении и постоянном объеме разнятся и что капля никотина радикально влияет на частоту сердечных сокращений у лошади. На самом деле электропроводность диэлектриков от температуры зависит, теплоемкости жидкостей и твердых тел при постоянном давлении и постоянном объеме разнятся тоже, а плотность жидкости, хоть последняя в школе почему-то считается несжимаемой, зависит от давления. Вопрос в том, насколько сильно зависит. Иными словами, насколько это существенно для техники, т.е. для применений, и для физики, т.е. для поумнения человечества (и в итоге – опять же для техники). Поэтому зависимость от температуры рассматривают для большинства параметров, зависимость от давления – реже, а зависимость скорости роста волос от фаз Луны – только на некоторых сайтах. Причем зависимость от температуры настолько часто важна принципиально, что есть специальный термин и параметр – термостойкость. Вообще, по-хорошему, следовало бы для каждого параметра рассматривать его зависимость от температуры, давления, электрического и магнитного полей и радиации.

Зависят параметры и от размеров. Когда-то под параметрами материалов понимали преимущественно то, что сейчас следует осторожно назвать «объемными параметрами массивного образца». Здесь два важных слова – «массивного» и «объемными». И действительно, некоторые параметры материала зависят от размеров образца – так, удельная проводимость уменьшается при уменьшении толщины образца. Среди свойств материалов есть связанные с поверхностью – например, цвет металла зависит от поверхности, а не от объема (свет в объем не проникает и оттуда не исходит). От свойств поверхности зависят и химические реакции, если один из реагентов – твердое вещество. Представление о поверхностных свойствах как о группе свойств и параметров возникло в начале прошлого века; именно тогда Вольфганг Паули сказал, что «поверхность придумал дьявол». Возникла «физика поверхности», выделенная не типом процессов и не задачей, а местом – как «физика атмосферы» или «физика океана».

Попутно. Паули был весьма интересной личностью, мало публиковался, предпочитал излагать свои результаты в письмах друзьям – физикам, как века назад. Получил результаты, важные для квантовой механики, ввел понятие «спин» и сформулирован «принцип запрета», или «принцип Паули» (Нобелевская премия). А еще

он предположил, что существует частица «нейтрино», хотя и сказал, что ее не удастся обнаружить. Правда, много позже, но удалось – гении и создатели квантовой механики тоже иногда ошибались. Когда вы сделаете нечто подобное, вы тоже получите это веселое право.

Но объем может потерять не одно измерение, превратившись в поверхность, а два или три. При потере двух измерений объем превращается в нить, линию. И если в кристалле грань – это поверхность, то нить – это ребро (про возможное значение ребер кристаллов упоминал еще В.Л.Гинзбург) или ступенька на поверхности, краевая дислокация или ось винтовой дислокации. У них своя физика – например, на ступеньке иначе идет сорбция, «прилипание» мигрирующих по поверхности атомов. А что будет, если отнять размерность у нити? Будет, как иногда говорят, «нульмерный» объект – точка, атом. В кристалле – это излом ступеньки или чужеродный атом в объеме или на поверхности. И у всех них есть свои свойства и параметры.

Попутно. Про Виталия Гинзбурга иногда говорят, что он был «физиком-универсалом», т.е. мог получать результаты во всех областях физики. Формулировка красивая, но «не физичная». А вот его более чем физичную статью «Какие проблемы физики и астрофизики представляются сейчас особенно важными и интересными?» вам стоит просмотреть. Она публиковалась много раз, с дополнениями, в разных изданиях – интернет вам в руки.

Маломерные объекты – поверхность, нить и их младшая сестра точка – могут существовать не только как часть чего-то большого (например, кристалла), но и сами по себе. Поверхность сама по себе – это графен, нанотрубки, фуллерены и все подобные структуры, и их с каждым днем становится все больше. Нить сама по себе – это монокристаллическая нить, и точка – это одинокий атом, горделиво летящий по Вселенной, а также кластер, группа из нескольких атомов.

Сами по себе маломерные материалы – при всех их фантастических свойствах – не всякий раз обладают рекордными значениями классических параметров. Но любой новый материал или любое новое физическое решение может смело претендовать на рекорд. И даже его достичь. Разговор о предельных параметрах материалов начнем с проводников. Их главный параметр – электропроводность или электрическое сопротивление. Вы, конечно, помните, как они связаны друг с другом.

ПРОВОДНИКИ

Массивный образец, обычные условия

Слово «проводник» уже нуждается в комментарии. Материал и устройство могут быть предназначены для передачи именно электроэнергии или же потока электрического и магнитного поля, тепла, вещества, механической энергии (в виде колебаний среды или без оных)... Но слово «проводник» используют в основном электрики – вот и мы поступим так же. Физика – не политика, здесь не зазорно следовать мнению большинства.

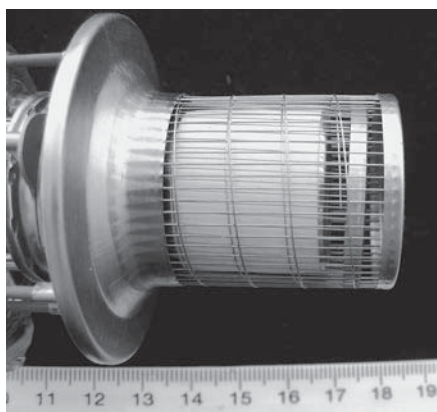
Начнем с самого простого и локального. Пусть на столе молча лежит массивный образец, никаких особых воздействий на него нет, температура и давление нормальные, нет ни полей, ни излучений. У кого будет самая большая проводимость? Ответ известен – у серебра. Чуть меньше – у меди. А следом ведь идет алюминий? Ан нет. Алюминий иногда называют третьим потому, что видели алюминиевые провода, но золото имеет большую проводимость, нежели алюминий. И если бы нуклеосинтез (или, как пишут борцы с засорением языка иностранными словами, элементогенез) шел иначе или если бы гениальный инженер Петр Гарин реализовал свой проект и золота было бы завались, то были бы у нас провода из золота. На пятом месте в списке – натрий, но он вдвое хуже золота и вдобавок лихо взаимодействует с влагой и воздухом. Зато он очень легкий (легче воды), поэтому его применяют как проводник в случаях, когда принципиально важна масса (при экспериментах в магнитной гидродинамике, когда проводник должен быть жидким и перемещаться); но тогда его приходится тщательно защищать от атмосферы.

Так что в итоге при обычных условиях у меди с серебром конкурентов пока вроде бы нет, причем по проводимости разница между ними весьма мала, а по стоимости – вполне заметна. Почему же тогда поверхность коаксиальных кабелей и СВЧ-волноводов серебрят? Обычный ответ – для уменьшения потерь, так как у серебра выше проводимость, а на высоких частотах ток концентрируется у поверхности. Но разница в проводимости составляет всего 12%, и стоит ли ради этого возиться с серебрением? Тем более, что гальванически нанесенная пленка может

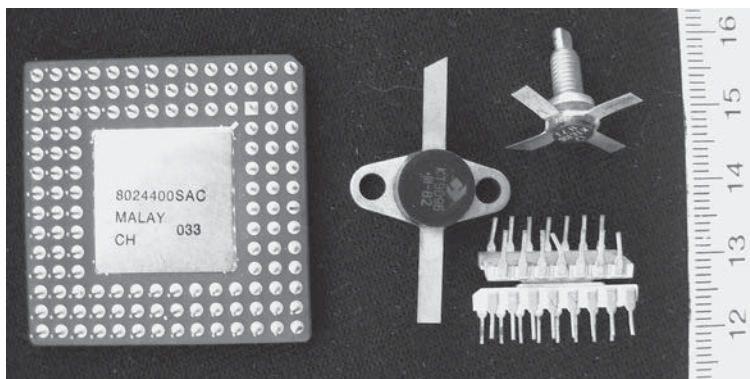
иметь меньшую проводимость, чем массивный плотный материал, для которого приведены данные в справочниках, и выигрыша в проводимости может вообще не оказаться. Тем не менее, возиться с серебрением стоит, потому что медь окисляется быстрее серебра, а оксид меди – полупроводник, и он начинает радостно поглощать СВЧ-сигнал. Вот как оно все связано, а?



Волновод для передачи электромагнитной волны на частоте около 10 ГГц, его серебрят изнутри (здесь и далее все фотографии сделаны автором, если не указано иное)



Сетка мощной электронной лампы, покрытая микронным слоем золота – не для увеличения проводимости, а для уменьшения эмиссии электронов



Транзисторы и микросхемы; все выводы покрыты микронным слоем золота для улучшения контакта

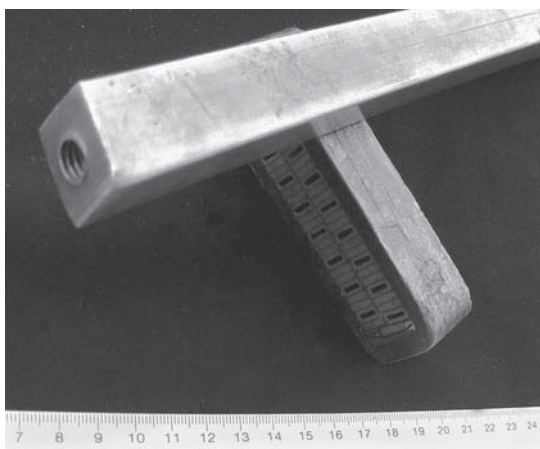
В середине прошлого века были открыты органические проводники. Это было немного непривычно, но если вы хотите заниматься физикой, начинайте понемногу привыкать к непривычности. Идея создания органического вещества с проводимостью металла по многим причинам соблазнительна – материал может оказаться дешевым, технологичным, гибким, но... пока так не получилось. Их проводимость на данный момент на два с половиной порядка меньше, чем у меди, так что о проводах, идущих к лампочке и утюгу, речь не идет. Конечно, в технике есть применения и малым токам, но – это важно! – существенная часть техники идет по пути усложнения и миниатюризации, что означает увеличение плотности тока в элементах конструкции. Поэтому область применения органических проводников пока довольно ограничена. Можно предположить, что они станут решением тогда, когда плотность тока в принципе окажется ограничена чем-то другим.

Вот еще одна попытка что-то улучшить. Раз для проводимости существенно рассеивание электронов на нарушениях регулярности кристаллической решетки, то естественна идея попробовать монокристаллы. Действительно, для монокристаллов некоторых металлов проводимость в разных направлениях различается на 10–20%. Поэтому, перейдя от поликристалла к монокристаллу и оптимально используя этот монокристалл, можно надеяться процентов десять выиграть. Но погоды это не делает.

Почему вообще важно иметь материалы с высокой электропроводностью? Ответ известен со школы – ради уменьшения

потерь электроэнергии (т.е. превращения электроэнергии в тепло), причем не там, где это может быть и полезно (у потребителя), а по дороге, в процессе передачи. Этот ответ самый простой, но далеко не единственный. Например, при увеличении проводимости уменьшаются шумы в электронных приборах и устройствах. Мешает недостаточно высокая проводимость и физикам – она становится на пути увеличения тока и поэтому не дает возможности получать большие магнитные поля. Вот почему

Ситуацию при обычных условиях и при массивных образцах мы разобрали. А что будет с нанообъектами?



Медные токопроводящие элементы с каналами для водяного охлаждения; сверху – конец обмотки магнита ускорителя (видна резьба для штуцера, на который надевается шланг), внизу – образец, вырезанный из обмотки электродвигателя, каждый третий виток его водоохлаждаемый

Малое – это прекрасно

Существенная часть техники развивается в сторону уменьшения размеров, миниатюризации. Причем миниатюризация рулит, даже если само устройство «в сборе» не предполагается делать маленьким (например, потому, что человеку должно быть удобно нажимать на кнопки, или потому, что ракета должна нести определенное количество взрывчатки). А потому, что внутри этого большого устройства находится нечто, выполняющее все больше функций, а значит, все более сложное, а

значит – содержащее все больше (а значит, все меньших) элементов.

Однако с уменьшением размеров некоторые параметры классических материалов ухудшаются: например, из-за дополнительного рассеивания электронов на границах пленки и из-за дефектов самой пленки падает проводимость. Поэтому, начиная с каких-то размеров, нанообъекты, как переносчики тока, начинают выглядеть перспективно. Тем более что для графена (как иногда пишут) уже получены сопротивления, близкие к сопротивлению меди. Но такое прямое сопоставление некорректно, причем по двум причинам – одной физической и одной технической.

Когда мы хотим характеризовать материал, мы измеряем его проводимость и по известной формуле вычисляем проводимость удельную. Для этого нужно знать геометрические параметры образца. Делаем мы это для того, чтобы потом, применяя эту же формулу, но в обратном направлении, вычислять сопротивления объектов другой формы из того же материала. Но что такое толщина графена? Понятие размеров у атома несколько условно. Конечно, измеренное сопротивление прямоугольного кусочка графена определенных размеров и так позволяет вычислить сопротивление любого прямоугольного куска его же, но тогда немедленно возникает вопрос – а зачем его сравнивать с одноатомным слоем меди? Медь я могу сделать и в тридцать таких слоев, все равно это будет тонко, а 30-слойный графен уже не будет иметь особых «графеновых» свойств. Так что применение графена просто вместо меди не интересно – важно наличие у него каких-то других свойств, которые позволят реализовать новые технические решения.

Давление, радиация, магнитное поле

Ситуацию при обычных условиях мы разобрали. А что будет при необычных, но реально встречающихся условиях? И давление, хоть атмосферное, хоть на дне Марианской впадины (около 1000 атмосфер), и растягивающие и сжимающие усилия, – все это влияет и на решетку твердого тела, и на поведение его электронов. В итоге для большинства металлов проводимость с увеличением давления растет, но очень слабо. При 1000 атмосферах она уменьшается менее чем на процент, так что надежды использовать этот эффект у нас нет. Вот живи мы на Юпитере, причем на приличной глубине... Правда, при этих давлениях перестают выполнять свои функции белки, но надо ли думать об этой мелочи, когда речь идет о проводимости! Кстати,

о Юпитере и сверхдавлениях – возможно, что в глубинах этой симпатичной планеты имеется металлический водород, т.е. водород, при этих давлениях превратившийся в металл. По немногим имеющимся данным водород при больших давлениях действительно превращается в металл, но его сопротивление при этом оказывается на несколько порядков больше, чем у обычных металлов, а главное – это состояние исчезает при снятии давления.

Радиация сопротивление металлов увеличивает – она вызывает нарушения регулярности кристаллической решетки, т.е. возникновение дислокаций. На этих нерегулярностях электроны рассеиваются, длина пробега у них уменьшается, сопротивление растет. Можно, конечно, поступить издевательски – сначала создать в металле множество дислокаций (например, деформацией при низкой температуре), а потом нагреть его облучением и поискать такие условия, чтобы дислокации быстрее «отжигались» (аннигилировали и исчезали), нежели возникали. Но мы пришли не студентов на экзамене пугать, а искать рекордные материалы, правда?

Влияние магнитного поля – это так называемое «магнитосопротивление», изменение удельного сопротивления проводника в магнитном поле из-за искривления траекторий носителей заряда под действием оногo магнитного поля. Сопротивление при этом увеличивается, но если радиус кривизны намного больше длины свободного пробега, то влияние мало. При обычных температурах и реально достижимых полях это так и есть, а про другие температуры мы поговорим немного ниже. В некоторых материалах обнаруживается отрицательное магнитосопротивление (с падением сопротивления в несколько раз), но это полупроводники – материалы, исходное значение сопротивления у них таково, что на конкуренцию с обычными проводниками им надеяться все-таки не приходится.

Самое насущное – температура

Теперь обсудим влияние температуры – по крайней мере, для техники это самое актуальное. С ростом температуры сопротивление металлов, в общем, растет. Диапазон температур, при которых могут работать технические устройства (даже если не ездить в Антарктиду), достаточен для изменения сопротивления почти на порядок: от комнатной до рабочей температуры нити накаливания в лампочке. Современная техника работает и при температурах, близких к абсолютному нулю, но об этом мы поговорим отдельно. Для применений важно еще

то, что мы умеем охлаждать. Жидкий азот при атмосферном давлении (77,4 К) – это вообще не проблема: от 30 до 200 рублей за литр при покупке от 1000 до 5 литров. Поэтому в ситуациях, когда надо уменьшить сопротивление, мысль об охлаждении – причем как для недопущения нагрева самим протекающим током, так и для уменьшения сопротивления, – вполне естественна.

Посмотрим, как изменяется сопротивление металлов при изменении температуры. Сначала отправимся вверх по шкале. С нагревом сопротивление растет, причем приблизительно одинаково для всех металлов. Поэтому у меди примерно до 1000 °С конкурентов нет. А дальше? Дальше медь не работоспособна, и примерно до 1500 °С нам придется иметь дело с железом (с увеличением сопротивления по отношению к меди сразу же примерно в 6 раз). Можно еще воспользоваться платиной (то-то радости), а выше 1500 °С и примерно до 3000 °С нам остается иметь дело с вольфрамом. Почему «примерно» и почему названы именно эти металлы? Куда делись все остальные?

Слово «примерно» вместо указания температуры плавления употреблено потому, что около температуры плавления материалы не эксплуатируют: у них там нет прочности, чихни – и развалится. Кстати, выше был упомянут параметр «термостойкость». Так вот, это не параметр материала, а параметр материала и применения – потому что для разных применений материал может перестать справляться с задачей (которая тоже может быть разной) при разных же температурах.

А что касается остальных металлов, они не упомянуты потому, что сначала у меди нет конкурентов по проводимости (ну, кроме серебра), потом у железа, а потом у вольфрама – все тугоплавкие, кто готов потягаться с ним по температуре плавления (но все равно проиграть), имеют большее сопротивление.

Реальная ситуация гораздо сложнее. Выбор материала для проводника – как и выбор любого материала – определяется сочетанием многих факторов. Медь нельзя применять для троллеев трамваев и троллейбусов – протрется, вольфрам нельзя применять на воздухе уже при нескольких сотнях градусов – окислится, платина – дорога, железо – ферромагнитно (а это иногда недопустимо) и так далее. Поэтому никаких законченных инструкций и универсальных решений нет. Но одно, самое распространенное, решение вы знаете: нагреватель электроплитки сделан из нихрома, сплава Fe–Ni–Cr. Правда, в данном случае не требовалось самое маленькое сопротивление, но дело не в этом. Нихром интересен тем, что при первом нагреве на его

поверхности образуется пленка окиси хрома, которая защищает его от дальнейшего окисления. В инженерии есть нормальные, традиционные и всем известные решения, а есть и уникальные, новые, оригинальные, прорывные и тому подобные. Умелое сочетание тех и других – важная часть инженерного мастерства.

Теперь отправимся вниз по шкале температур. Там нас ждет – можно пошутить? – общеизвестный сюрприз: сверхпроводимость. Но до нее еще нужно добраться, так что сначала – просто о пониженных температурах. С охлаждением удельное сопротивление алюминия падает быстрее, чем меди и серебра, и в районе азотных температур (77 К) он их обгоняет, а при водородных температурах (20 К) его сопротивление делается в 2–3 раза меньше, чем у меди, и в 5–10 раз меньше, чем у серебра. Цифры эти ориентировочные – они сильно зависят от чистоты металлов, но энергетиков не интересует, кто первый и кто второй, им важна экономика. В целом оказывается, что, учитывая расход энергии на охлаждение, применять для целей энергетики охлаждение жидким азотом – что меди, что алюминия – не имеет большого смысла, а вот охлажденный до водородных температур алюминий – это может быть интересно. Используют алюминий и для обмоток магнитов, посредством которых получают большие магнитные поля: его преимущество – относительно слабый рост сопротивления в больших полях (при водородных температурах – лишь в 3 раза, у меди больше).

Иногда вспоминают, что на дороге вниз по шкале температур все упомянутые материалы в районе 150 К обгоняет бериллий (при 100 К он впятеро лучше меди и до 40 К так и остается лучше алюминия, но при 30 К сдается). Почему же из него не делают провода? Некоторые считают, что он ядовит, но не понимают разницы между бериллием и оксидом бериллия, компактным материалом и мелким порошком самим по себе и попавшим в легкие. Важно ведь испугаться, правда? На самом же деле важно то, что он сложен в технологии и дорог – в 100 раз дороже меди и в 300 раз дороже алюминия. Вы уже давно хотите спросить: а почему не сверхпроводник, у него же вообще нет сопротивления?

Еще немного про тепловые параметры, о которых подробно расскажем в другом месте, и перейдем к сверхпроводимости. Раз по проводнику протекает ток и он имеет сопротивление, в нем выделяется тепло. Его надо отводить, иначе – расплавит. Поэтому для многих ситуаций важна теплопроводность. Тут нам повезло: материалы с высокой проводимостью имеют и высокую теплопроводность, и это не случайно. В результате задача конструктора упрощается – применяя медь, он и умень-

шает тепловыделение, и улучшает отвод тепла. С диэлектриками и полупроводниками ситуация сложнее – материал, оптимальный по электрическим параметрам, может оказаться очень не оптимален по теплопроводности, и аппаратура будет недопустимо нагреваться. И еще одно – если наш прибор работает в импульсном режиме, то важна не теплопроводность, а теплоемкость, способность материала запасти в себе тепло, не сильно нагреваясь, а потом, в промежутке между импульсами, его перекачать куда-то вовне. Но медь вполне хороша и по этому параметру.

К сверхвысокотемпературным вершинам

В публикациях любят приводить картинку, как с годами увеличивалась предельно достигнутая температура перехода в сверхпроводящее состояние. Смысла в этой картинке – ни малейшего: она ничего не объясняет, ничего не предсказывает и даже не подталкивает к какой-нибудь гипотезе. Тем более что само по себе значение этой температуры мало что говорит о практической применимости материала. Высокую проводимость иметь мало, надо же еще гнать по ней ток. А ток влияет на проводимость – он просто может ее разрушить. У любого сверхпроводника есть параметр – критический, т.е. предельный, ток. Причем ток может влиять на существование сверхпроводимости по крайней мере двумя способами – «сам по себе» и создаваемым им магнитным полем. Это разные эффекты – внешнее магнитное поле тоже разрушает сверхпроводимость. Теперь заметим, что магнитное поле, созданное током, зависит от его плотности, от распределения его в пространстве. Поэтому критический ток связан и с геометрией проводника.

Применения сверхпроводимости – имеющиеся и будущие – можно условно разделить на три группы. Если область применения такова, что предполагаемые токи и плотности токов малы, то важна только температура перехода в сверхпроводящее состояние. Тут все относительно просто: высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) – $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO, Y123) – 90 К, $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+x}$ (BSCCO, Bi-2223) – 110 К, $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ – 127 К, $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+x}$ – 135 К. Еще 48 – хоть кельвинов, хоть градусов Цельсия – и журналисты поставят на уши читателей, догадайтесь, какие будут заголовки... если, конечно, это когда-нибудь вообще произойдет.

Правда, говорить о малых токах и плотностях тока надо осторожно – первое не означает второго. Общая тенденция к

миниатюризации и увеличению количества элементов приводит (при прочих равных условиях) к увеличению плотности тока – в проводниках печатных плат до 250 А/мм^2 , в дорожках микросхем – еще на порядок больше.

Вторая, в некотором смысле противоположная, область применения – это электромагниты, создающие магнитные поля с высокой индукцией. Такие поля и соответствующие магниты обычно называют «мощными» – то ли по традиции, то ли по незнанию школьной физики. В этих случаях температура перехода в сверхпроводящее состояние не столь важна, а требуется, чтобы поле не разрушало сверхпроводимость. Критические поля при гелиевых температурах 4,2 К у сверхпроводников Nb_3Ge , Nb_3Sn – 30–40 Тл, у ВТСП – 100–200 Тл. Однако тут есть небольшая тонкость – это поле надо создать током. Иными словами, нужен сверхпроводник, который сохраняет сверхпроводимость при пропускании тока и при наличии внешнего магнитного поля (кроме созданного самим током). Ровно эту же проблему приходится решать энергетикам – потому что сверхпроводящий кабель состоит из большого количества проводников, каждый из которых создает магнитное поле. Для каждого конкретного проводника оно его собственное, а для всех остальных – внешнее.

Таким образом, мы получаем третью область применения – на данный момент самую важную для практики. Сверхпроводники, применяющиеся сейчас в энергетике, это тонкие ленты шириной в несколько миллиметров и толщиной в десятую долю миллиметра. Причем эта «десятая доля» состоит из нескольких (до 11) слоев разных материалов и каждый слой изготовлен по сложной технологии, а собственно сверхпроводник занимает лишь единицы микрон. Такая лента при отсутствии магнитного поля пропускает, если погрузить ее в жидкий азот, без потери сверхпроводимости ток в сотни ампер, но если сложить несколько десятков таких ленточек стопой, сделав кабель, предельный ток не увеличивается во столько же раз, он существенно меньше – поскольку возникает большое магнитное поле. Исправить ситуацию можно, естественно, понизив температуру, но уж очень не хочется переходить на жидкий водород... В результате различных конструктивных и технологических ухищрений, судя по опубликованным данным, удалось поднять ток в кабеле до 10–20 кА (при этом поле достигает около 40–80 Тл). Энергетики уже ведут опытную эксплуатацию таких кабелей, а трансформаторы и другое оборудование со сверхпроводниками применяют вполне успешно.

«Внутренние» параметры

Теперь – нечто философское: не внешние параметры, не условия среды, а то, что можно назвать параметрами внутренними. То, что неминуемо сопутствует попыткам измерить или как-то использовать электрическое сопротивление. Это ток и напряжение, а также частота. Точнее – частоты, поскольку любой сигнал разлагается в спектр, дискретный (если сигнал периодический) и непрерывный (если не периодический). Пугать слушателей тезисом, что ни периодических сигналов, ни монохроматических излучений не бывает, ибо любая синусоида когда-то началась и, скорее всего, когда-то кончится, мы не будем. Кроме того, тут скрыта, можно сказать, онтологическая тайна: у двух синусоид, которые начались одновременно, но оборвутся – одна через минуту, а другая через год, разные или одинаковые спектры? Если одинаковые, то куда делась информация, а если разные, то откуда они это узнали, мы же им не сказали, когда они оборвутся?!

Зависимость сопротивления от тока и напряжения могла бы иметь вполне прикладной смысл. Например, одну и ту же мощность при одном и том же напряжении источника можно попытаться передать током 100 А непрерывно или током 200 А за половину отведенного времени. Зная школьную физику, мы понимаем, что во втором случае потери будут (при прочих равных условиях) вдвое больше. Но если бы материал линии передачи был не линейен (например, если бы мы передавали ток не по медным проводам, а по газовому разряду)? Тогда нам было бы куда как полезно оптимизировать ток, исходя из вольт-амперной характеристики разряда в газе, а она как раз не линейна! Но мы передаем электроэнергию пока что по металлическим проводам, и поэтому в смысле потерь оптимален ток постоянный. Но какой именно? Не зависит ли сопротивление проводов от тока?

Косвенно – через нагрев, вызванный током, да, зависит. Также косвенно – через изменение сопротивления магнитным полем, в свою очередь вызванным током, тоже. Второе обычно игнорируется – большие магнитные поля, способные изменить сопротивление, получают не в том месте, где протекает ток, а вне проводника, в середине катушки или соленоида. Но магнитное поле, вызванное током, может влиять на ток и непосредственно – силой Лоренца на электроны. Правило штопора или левой руки (убедитесь, что вы его помните и что оно работает для всех вариантов заряда) говорит, что ток сжимается своим полем к оси проводника. Этот эффект заметен в плазме (Z-пинч) и в полу-

проводниках, в металле он мал, но во всех случаях он заставляет ток протекать не по всему сечению проводника и, значит, увеличивает сопротивление. На высоких частотах ток, напротив, вытесняется к поверхности проводника (скин-эффект, от английского skin – кожа), но и это вызывает увеличение сопротивления.

Закон Ома и вообще все обычное рассмотрение поведения электронов в металлах опирается на предположения о том, что длина свободного пробега электронов в металле достаточно мала и что электрическое поле достаточно мало для того, чтобы влияние на скорости электронов (в металлах они порядка 10^6 м/с) было тоже мало. Но в сверхчистых монокристаллах, когда рассеивание на дефектах мало, и при низких температурах, когда рассеивание на тепловых колебаниях ионов тоже мало, длина свободного пробега уже сейчас достигает миллиметров – в сотни тысяч раз больше обычного. В этой ситуации электроны летят свои миллиметры, примерно как в вакууме или сверхпроводнике. Разница с вакуумом состоит в том, что, поскольку заряд электронов компенсирован решеткой, они не отталкиваются друг от друга на «решеточных» расстояниях и можно получить плотность тока, много большую, нежели в вакууме. Другая особенность состоит в том, что при больших плотностях тока на поведение электронов начинает заметно – по сравнению с электрическим полем – влиять созданное самим током магнитное поле. Поэтому сверхчистые и холодные монокристаллы ведут себя сложно и загадочно, и нас еще ждут – и дождутся – многочисленные сюрпризы.

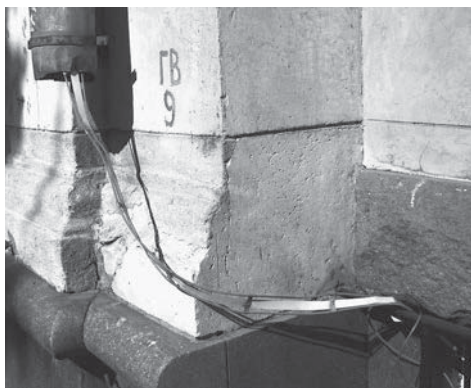
Немного не рекордного

Выше мы все время обсуждали рекордные значения проводимости, для проводников это – самые большие. Для изоляторов – самые малые, и их мы подробно обсудим ниже. Но ведь есть еще и не рекордное, и хоть это не основная наша тема, давайте немного посмотрим и на него.

Ситуация такова – проводники с наиболее высокой проводимостью нужны, если мы передаем энергию по ним, но бывает, что нам надо не передавать, а как раз наоборот – превращать ее в тепло. Но если просто подключить к источнику энергии любое сопротивление, то вся электроэнергия, переданная нагрузке, как раз и превратится в тепло – так в чем проблема? А в том, что для любой передаваемой мощности можно указать желательный диапазон сопротивлений нагрузок. Низкоомная нагрузка, т.е. большой ток, – потери в проводах, высокоомная, т.е. высокое

напряжение, – потери на коронный разряд, пробой изоляции. Бывают ситуации, когда определенное сопротивление нужно и без связи с тепловыделением.

Итак, что делать, если нужно относительно большое сопротивление? Оказывается, есть элементы, у которых одна из модификаций является металлом с большим сопротивлением. Их даже называют «полуметаллы» – висмут, сурьма, мышьяк. Их сопротивление в 20–50 раз больше, чем у меди, но они сложны в производстве, некоторые их свойства (хрупкость, легкоплавкость) неудобны конструктору, а главное – их сопротивление имеет какое-то фиксированное значение, а хотелось бы уметь управлять им.



Нагреватели для оттаивания водосточных труб

Понимая, что примеси влияют на сопротивление, материаловеды довели содержание «примесей» до того, что перестало быть понятным, кто хозяин, а кто гость, и создали «сплавы сопротивления» – константан, манганин, нихром и другие. Состав – в основном никель, хром, железо, иногда немного алюминия и других элементов. Сопротивление – в 30–60 раз больше, чем у меди, а кроме того, у них есть другие полезные свойства. Например, нихром (он используется в электроплитке) может нагреваться на воздухе почти до плавления благодаря защитной пленке окиси хрома. Сопротивление манганина особенно слабо зависит от температуры, что тоже иногда приятно.

Но что если нужно сопротивление вне этого довольно узкого диапазона? Нам придется осторожно вступить в новую область – в область композитов. Представим себе, что мы взяли порошки двух разных материалов, смешали, перемешали и – чтобы не сорить на стол – отпрессовали из этой смеси компактные образцы. Понятно, что сопротивление у них будет где-то между сопротивлениями этих двух материалов (если порошинки не слишком маленькие, т.е. преобладают объемные, а не поверхностные свойства). Меняя соотношение количеств, можно лихо управлять сопротивлением – от одного вещества (если брать только его) до другого (если брать только это). А если взять хороший проводник и хороший диэлектрик!.. Однако, как всегда, не все так просто. А точнее – почти все сложно: это физика, но не школьная.

Групп сложностей несколько. Начнем с технологических: композит надо сделать так, чтобы и он не развалился и компоненты не вздумали вступить в реакцию. Далее, сопротивление такого композита (если частицы не шарики) зависит от их ориентации. Представьте себе, что компонент с высокой проводимостью имеет вид длинных тонких проволочек. Тогда проводимость композита будет больше, если проволочки расположены вдоль поля. Слово «тонкие» должно было бы вас насторожить – по этим тонким будет течь большая часть тока, а там и до перегрева недалеко, а он стимулирует реакции... Дальше будет еще хуже. Потому что мы смешаем два порошка – проводника и диэлектрика – из примерно шарообразных частиц и в попытках увеличить сопротивление начнем уменьшать концентрацию проводящих, дойдя до того, что они будут контактировать друг с другом по маленьким контактными площадкам. А уж на них плотность тока будет, сами понимаете, обратно пропорциональна их площади. Поэтому не так уж сильно удастся поднять сопротивление.

ИЗОЛЯТОРЫ

Принципиальная роль нелинейности – пробой

Пусть проводники не обижаются, но с изоляторами все сложнее, причем как минимум по пяти крупным причинам. Во-первых, проводники мы изучали только твердые, потому что жидкие проводники хоть и применяются (расплавленные металлы в магнитогидродинамических экспериментах), но редко, а изоляторы бывают твердые, жидкие, газообразные и даже вакуум. Во-вторых, влияние поверхности на проводимость существенно, только если мы используем тонкие пленки, а на работу изолятора поверхность влияет всегда. В-третьих, проводники редко портятся со временем (электромиграция, электроперенос – большая экзотика, хотя в микросхемах встречаются), а изоляторы почти всегда рады это сделать. В-четвертых, увеличение сопротивления проводников с ростом частоты (скин-эффект) имеется только для сверхвысоких частот, а нечто вроде уменьшения сопротивления диэлектриков происходит при меньших частотах. В-пятых, нелинейность проводников, нарушение закона Ома – экзотика, а нелинейность изоляторов – норма жизни. Вот с нее и начнем.

Если приложить к изолятору напряжение и начать понемногу его поднимать, то ток будет расти монотонно. Кроме ситуации, когда злоумышленник вмонтировал внутрь вашего образца туннельный диод – но за это канделябрами! Начиная с какого-то напряжения ток начнет сильно увеличиваться при увеличении напряжения, достигнет $0,1\text{--}10 \text{ А/м}^2$, продолжит увеличиваться при прекращении увеличения напряжения, т.е. подрастет еще, но остановится, затем станет вести себя не стационарно: прыгнет, импульс выдаст и ждет – что будет? – ах, ничего? – еще импульс $0,1\text{--}10 \text{ мс}...$ и, наконец, начнет расти лавинно – до срабатывания защиты или, сами понимаете, до появления дыма, запаха горелой изоляции, в дверь просовывается голова человека из соседней лаборатории, облегченно вздыхает и понимающе кивает.

Все это называется предпробойными явлениями или пробоем. Любые явления требуют энергии, а значит, до всех этих явлений должен был протекать ток, диэлектрик должен был потреблять

энергию от источника. В диэлектрике, который совсем не проводит тока, не может быть и пробоя – на это не всегда обращают внимание. Но связь между предпробойным током и пробоем сложна и носит в значительной мере статистический характер: пробой – явление локальное, а ток мы измеряем интегрально, со всей поверхности. Поэтому больший ток не обязательно означает меньшее напряжение пробоя – но, скорее всего, означает большую его вероятность.

И еще два предварительных замечания. Есть понятие «пробой», и есть понятие «разряд». Иногда говорят, что пробой – это лавинообразное увеличение проводимости, а иногда – что лавинообразное нарастание текущего через него тока. Это разные вещи: увеличить проводимость газа, т.е. превратить его в плазму, можно и без текущего через него тока. При большой напряженности электромагнитного поля газ ионизируется, превращается в лампу и прекрасно светится. Называется это «безэлектродным разрядом», его можно реализовать и в СВЧ-диапазоне, и в оптическом. Ниже, когда мы будем говорить об электропрочности газов и о предельном поле, которое выдерживает диэлектрик, будем иметь в виду напряжение, при котором ток не растет, т.е. не происходит именно пробоя. Когда же наступит время и место поговорить о безэлектродном разряде, мы ему выделим специальный абзац – он того стоит.

Почему вообще важно иметь материалы с высокой электропрочностью? Во-первых, из-за потребностей энергетики: для передачи мощности по проводам желательно иметь повыше напряжение – тогда ток меньше и потери из-за нагрева проводов тоже меньше. Во-вторых, опять из-за потребностей энергетики, но совсем других – в природе встречается высокое напряжение (скорее всего, не более 100 МВ) и часть его может при ударе молнии попасть куда не надо, а электрикам надо это «куда не надо» защищать. В-третьих, высокие напряжения нужны для многих физических исследований, а в-четвертых – для технических применений.

Так что приступим к проводимости и – осторожно – к пробоям. И начнем мы с «самого простого» диэлектрика – такого, в котором ничего нет. Иными словами, с вакуума.

Вакуум – проводимость и пробой

Пусть у нас имеется идеальный вакуум между двумя поверхностями. Приложим к ним напряжение. Пусть поверхности плоски и бесконечны, или их форма такова, что напряженность поля на поверхности постоянна («профиль Чен-

га», «профиль Эрнста»), или мы делаем вид, что ничего не знаем про краевые эффекты. Тогда все просто – ток есть сумма термо- и автоэлектронного тока, а пробой наступит тогда, когда притяжение пластин (Кулон рулит!) станет больше прочности материала пластин. И не надо удивляться, что поле может порвать металл, как Тузик – грелку. Оно реально это делает – металл сам виноват. А скорее всего – люди, которые делали электроды.

Посчитать эти два тока, если известны температура и работа выхода, и посчитать поле, которое порвет металл, если известна прочность, легко – формулы есть в любом справочнике. Но делать этого не нужно, потому что ничего идеального нет: автоэлектронный ток определяется локальной напряженностью поля, а она – микрошероховатостью поверхности, выступами, чешуйками, отслоениями, заусенцами, усиками-вискерами, которые иногда растут на поверхностях, и прочей небритостью. Термоэлектронный ток от этой гадости зависит слабо, но он сам обычно не виден на фоне автоэлектронного. Этими же особенностями поверхности обусловлен пробой – чешуйки и вис커ры отрываются полем раньше, чем поле порвет идеальный металл. Поэтому если мы хотим получить как можно более хороший вакуумный диэлектрик, то надо делать электроды из однородного, прочного, гладкого материала. В идеале – из монокристалла, потому что примеси концентрируются на границах зерен, и если они образовали «вторую фазу», включения, то на них тоже может возрасти поле. Ужас ситуации состоит в том, что в процессе эксплуатации электронно-вакуумных приборов даже на самых идеальных поверхностях – могут даже в идеальном вакууме! – расти выступы. Материал для них может поступать посредством поверхностной диффузии, а также быть материалом самой этой поверхности, если выигрывает энергия из-за смещения заряженной поверхности навстречу полю покрывает работу по увеличению поверхности при наличии поверхностного натяжения. Другими словами, при высокой напряженности поля поверхность оказывается неустойчива!

То, что происходит при сильном нарастании тока, текущего через вакуум, принято называть вакуумным пробоем. Название это не точно – на самом деле это смесь тех самых иницилирующих токов, разряда в газе, десорбированном с электродов током или полем, а далее – разряда в парах испаренных частиц электрода и просто разогретого током электрода. Частицы – те, которые поле отодрало от электрода, – летели через промежуток, ускоряясь полем, и испарились при ударе о другой электрод. Помните предпробойные импульсы тока? – так это они самые. Кроме того,

возможно еще испарение выступов, нагретых самим протекающим по ним током.

Проводимость металла мы характеризовали одной величиной – удельной проводимостью. Это было удобно именно потому, что проводники с хорошей точностью «линейны» – ток пропорционален напряжению. Если бы это было не так, пришлось бы при упоминании проводимости всякий раз добавлять, о какой именно напряженности поля мы говорим, и расчеты бы усложнились. С вакуумом дело обстоит именно так, ибо ток автоэмиссии нелинейно зависит от напряженности поля на неровностях поверхности, всяческих выступах и особенно – на остриях, нитевидных кристаллах, т.е. вискерах. Эта напряженность поля зависит не только от напряжения на зазоре и зазора, но и от формы острия, а кроме того, как было показано автором, может возникать электромеханическая неустойчивость – острие при некотором значении поля может изгибаться скачком, резко увеличивая напряженность поля.

Поэтому, чтобы характеризовать электроизолирующие свойства вакуума, придется просто сказать, насколько удастся понизить токи и поднять напряжения пробоя при тех или иных зазорах, если максимально правильно выбирать материалы и обработку. Но сначала – о прочих влияниях.

Вакуумный пробой – влияния и достижения

Для проводников мы рассматривали влияние на их параметры множества факторов. Влияют ли эти факторы на изоляционные свойства вакуума? На вакуум, очевидно, не влияет ничего – там не на что влиять. Но радиация и нагрев могут уменьшать прочность материала электродов и способствовать пробоям. Время тоже влияет: если со временем из-за поверхностной диффузии растут вискеры, то токи утечки должны расти, а электропрочность – падать; если же из-за частичных пробоев или разогрева током вискеры разрушаются, то – наоборот. Второй процесс называется тренировкой и при изготовлении высоковольтных вакуумных приборов применяется всегда. Магнитное поле способно повлиять на полет заряженных частиц в вакууме, причем простенький расчет показывает, что при энергии 10 кэВ в поле с индукцией 0,1 Тл радиус орбиты электрона будет 3 мм. Иными словами, вполне умеренное поле способно отклонять электроны с этой энергией. Что если оно не пустит их на анод, а направит на другой электрод, находящийся под меньшим потенциалом? Напряжение пробоя при этом может возрасти. Правда, оторвавшиеся от электрода микрочастицы

поле не развернет – отношение массы к заряду, которым определяется радиус, у них больше на много порядков. Но в условиях, когда доминируют электронные процессы, магнитное поле действительно способно подавлять пробой.

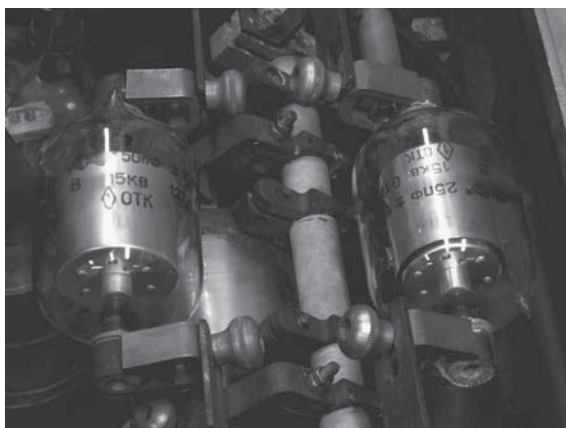
Наконец, «внутренние параметры» – как именно подается напряжение. Так вот, при наносекундных импульсах электропрочность оказывается больше на порядок, потому что процессы, ведущие к пробое, имеют свое время нарастания и не успевают «созреть» за время импульса. Нечто подобное должно происходить и при пробое в других материалах, к рассмотрению коих мы и перейдем чуть ниже.

Что в итоге достигнуто? При правильном выборе материала и обработки электродов (но без экстремизма в виде монокристаллов) можно ориентироваться на электропрочность 30–100–300 кВ при зазорах 0,1–1–10 мм и на 1–3–10 МВ при зазорах 0,1–1–10 м соответственно. Токи утечки сильно зависят не только от материала и обработки, но и от того, насколько близко мы рискуем подбираться к предельным напряжениям. В литературе для электродов обычных размеров в единицы квадратных сантиметров обычно называют величины 0,001–0,1 мкА, хотя если подобраться поближе, то можно зафиксировать значения, большие на порядок или два. Изготовители вакуумных конденсаторов называют в качестве гарантированных максимальных значений величины около 10 мкА, но это лишь означает, что при рабочем напряжении (когда изготовитель гарантирует надежную работу) ток не будет превышать этих величин – но может быть и намного меньше. Далее мы сопоставим эти величины с данными для других диэлектриков, более материальных. Но в любом случае надо иметь в виду, что вакуум – единственный диэлектрик, «потери» в котором не растут с частотой, и что, поскольку мы живем в атмосфере, вакуум отделен от нас «вакуумным объемом», корпусом прибора, который включен параллельно вакуумному зазору и в котором обязательно есть свои токи утечки и вполне возможен свой пробой. Поэтому гарантированные «не более 10 мкА», скорее всего, просто токи утечки по поверхности изолятора. А что с ними делать, мы еще обсудим.

Почему вообще важно иметь и исследовать вакуум? Не только потому, что в нем летают Солнце, Земля, человек и вообще все-все-все. А еще потому, что без вакуума не было бы в нашей истории рентгена и физики элементарных частиц, а радио и телевидение возникли бы – если вообще возникли – на целый век позже. А может и на два, т.е. до них был бы еще целый век.



Вакуумный конденсатор (25 пФ, 15 кВ)



Вакуумный конденсатор в мощном радиопередатчике, переключение емкости (25 и 50 пФ), изменяет резонансную частоту контура (формула Томпсона, помните?)

Диэлектрик, который вокруг нас

Это воздух. Представьте себе, что воздух – проводник: вся электротехника выглядела бы иначе, вместо проводов было бы... были бы... правильно, трубки из диэлектрика. Проблемы постоянного тока это бы решило, но это еще не все. Про радиосвязь можно было бы забыть: электромагнитное поле в проводящую среду не проникает. Так что электрические

свойства воздуха исследовать придется. А тут недалеко и до других газов. Итак, газ как диэлектрик.

У газа как объекта рассмотрения есть огромные преимущества перед всеми прочими средами: если объем не слишком велик и не слишком мал и мы не рассматриваем стационарные режимы, газ однороден. Кроме того, у газа нет проклятия ужаса конденсированных сред – поверхности, а диэлектрические свойства газа восстанавливаются (не всегда полностью) после пробоя – в отличие от твердого тела. Все эти пункты требуют комментариев. Если объем мал, то в нем поместится одна молекула или, по крайней мере, две. Будет ли это однородным газом? Если объем велик, то газ при некоторых условиях не заполнит его весь – иначе мы бы умерли через четыре минуты. В динамическом режиме, например при истечении через сопло в вакуум, у газа есть поверхность. При пробое из-за химических процессов может меняться состав газа – он может разлагаться или, если это смесь, компоненты могут начать взаимодействовать, а еще газ способен взаимодействовать и с материалом электродов.

Теперь сделаем важное методологическое замечание. Здесь и далее мы рассматриваем материалы, разделив их на группы – вакуум, газы, жидкости, твердые тела. Насколько обосновано такое деление? Под него, как и под всякую классификацию, можно подкопаться, потому что найдутся какие-то переходные, смешанные формы. Например, если понижать концентрацию газа, мы доберемся и до вакуума. Если повышать, то при давлениях порядка тысячи атмосфер мы доберемся до плотности жидкости. Если при этом температура будет выше критической, то получившееся по одним свойствам станет газом, а по другим – жидкостью. Поэтому к классификациям вообще надо относиться с некоторой настороженностью и осторожностью – как всякое упрощение, жизнь они нам облегчают, но мы можем пропустить нечто интересное и важное. Теперь вернемся к электрическим свойствам газов.

Электропроводность газов зависит от концентрации способных перемещаться носителей заряда (электронов и ионов) и их подвижности – того, как они отзываются на электрическое поле, т.е. на приложенную силу. Стало быть, ток переносят электроны – у них масса в две и более тысячи раз меньше, чем у ионов. Электроны в газе появляются (если это не автоэмиссия с острий, как в вакууме – помните?) из-за ультрафиолета и естественного радиационного фона. Концентрация их мала, они поголовно вытягиваются на электрод уже при совсем маленьких полях (порядка $0,05$ В/м) и далее – вплоть до начала нараста-

ния тока из-за ионизации, преддверия дуги, пробоя и всех прочих страстей – ток уже не растет. Этот ток насыщения составляет при расстоянии между электродами 1 см примерно 10^{-14} А/м². Поэтому характеризовать газ «удельной проводимостью» трудно – получится, что она сначала, при сверхмалых напряжениях, постоянна и составляет примерно $2 \cdot 10^{-13}$ 1/(Ом · м), а потом начинает уменьшаться, достигая при приближении к пробую (в самом плохом случае при 0,2–0,3 кВ) аж 10^{-16} 1/(Ом · м) (все для зазора в 1 см). Причем ток этих заблудших электронов зависит не от температуры и давления, как это должно быть во всех веществах, а от специфических внешних условий – от того, взлетели ли мы достаточно высоко над землей или зарылись ли мы в нее и в каком именно месте. На практике проводимость воздуха, в общем, редко принимается во внимание – обычно доминируют включенные параллельно с ним другие элементы конструкции.

С пробоем в газе дело обстоит так. Напряжение, при котором пробивается промежуток, зависит, естественно, от рода газа и зазора. Но зависимость от зазора выглядит интересно: для одного и того же газа при равных произведениях «зазор на давление» напряжения пробоя будут одинаковы – закон Пашена.

Попутно. Был такой физик Фридрих Пашен, родился он в 1865 году, а позже открыл этот закон, изучал излучение и спектры (серия Пашена, эффект Пашена–Бака), славился виртуозной техникой и высокоточными измерениями, с нацистами не сотрудничал, а в 1947 году – голодно было в Германии и холодно – получил пневмонию и умер. И осталась после него, кроме перечисленного выше, кривая Пашена во всех учебниках.

Кривая, отражающая этот закон, выглядит так: минимум достигается при произведении «давление на зазор» от 1 до 3 Па · м (напомним, что атмосферное давление равно 10^5 Па), и напряжение пробоя при этом составляет 0,2–0,3 кВ. При меньших давлениях напряжение пробоя растет, в итоге оно ограничивается вакуумными механизмами. При больших давлениях оно также растет, а ограничивается, как это ни забавно, теми же процессами на электродах. Сами кривые для обычных газов различаются не слишком сильно, напряжения меньше для инертных газов, а больше для воздуха, что удобно для электриков. Обычная цифра для воздуха при атмосферном давлении – 2,5 МВ/м, так что не стоит ближе сантиметра подносить палец к высоковольтным цепям телевизора с кинескопом или прибора ночного видения.

Электриков, как всегда, интересует, как можно поднять электропрочность. Пашен дает ответ: если речь идет об атмосфере – то увеличивая зазоры. Если мы говорим о внутренности аппаратуры, то увеличивая давление, электропрочность при этом растет пропорционально. Можно еще использовать газы с высокой электропрочностью – это электроотрицательные (легко захватывающие электрон) газы с большой молярной массой, но увы – чем она выше, тем выше температура кипения, шаг, другой – и бултых. Так что электрики используют реально только элегаз (также гексафторид серы или шестифтористая сера) SF_6 , его электропрочность втрое выше, чем у воздуха. Фреон C_4F_6 чуть лучше, но он кипит уже при -5°C . Вообще-то и элегаз с точкой кипения -64°C в Антарктиде использовать на улице не удастся. Но об этом у электриков голова пока не болит. С ростом температуры электропрочность газов падает примерно обратно пропорционально абсолютной температуре, так что на Земле проблем не возникает. Вот если мы собираемся со своим электрооборудованием на Венеру (470°C) или на Земле в работающую доменную печь (до 2000°C), то тут надо иметь эту зависимость в виду. Правда, на Венере будет работать на нас давление – около 100 атм.

Что касается влияния частоты напряжения, что принципиально важно для мощной радиотехники, то данные разных авторов несколько различаются, и в этом нет ничего странного – условия испытания на разных частотах, если охватывать диапазон от постоянного напряжения до частоты в 10 ГГц, уж очень различаются. В общем можно сказать, что если с ростом частоты в этих пределах напряжение пробоя и падает, то не более чем на 20% для частот 1–10 МГц и не более чем вдвое для частот 1–10 ГГц (по отношению к постоянному напряжению). При дальнейшем увеличении частоты электропроводность газов начинает расти и для оптического диапазона превосходит электропрочность воздуха уже в несколько сотен раз, до 1000 МВ/м , что соответствует плотности мощности более 10^5 МВт/см^2 .

Теперь немного нарушим логику повествования и упомянем о влиянии давления не на параметр материала, а на нечто другое – но о влиянии, интересном для физики и важном для техники. У некоторых кристаллов, если их сжать или растянуть, на противоположных плоскостях возникают заряды, между плоскостями возникает разность потенциалов, напряжение. Эти кристаллы имеют довольно высокое сопротивление, поэтому большую мощность из них не извлечь, но зато напряжение может быть вполне заметным – киловольты. Это называется пьезоэф-

фектом, и вы все его видели – он используется в зажигалках: искровой разряд поджигает газ. Кроме того, вы могли застать проигрыватели для грампластинок («винила») с пьезоэлектрическими головками. В них колебания иглы передавались на пьезоэлемент – кристалл с контактами, на которых при деформации кристалла возникало напряжение. Пьезоэффект обратим, т.е. если на кристалл подать напряжение, то он изменит размеры. Этот эффект используется для преобразования напряжения в звуковые колебания в жидкости (ультразвуковая мойка в быту, ультразвуковые ванны в промышленности) и в воздухе (высокочастотные динамики, «пищалки»). «Отзывчивость» материала определяется пьезомодулем – отношением плотности заряда ($\text{Кл}/\text{м}^2$) к механическим напряжениям ($\text{Н}/\text{м}^2$). Эта величина имеет рекордное значение для сегнетовой соли $\text{С}_4\text{Н}_4\text{О}_6\text{КNa} \cdot 4\text{Н}_2\text{О}$ – $79 \cdot 10^{-11}$ Кл/Н (для того кристаллографического направления, для которого он максимален), но сильная зависимость пьезомодуля от температуры и гигроскопичность соли делают техническое применение ее очень редким. Удобнее ниобат лития LiNbO_3 ($7,3 \cdot 10^{-11}$ Кл/Н) и керамики на основе титаната бария BaTiO_3 ($10 \cdot 10^{-11}$ Кл/Н) и титаната-цирконата свинца $\text{Pb}(\text{Ti},\text{Zr})\text{O}_3$ ($40 \cdot 10^{-11}$ Кл/Н). Всем этим материалам свойственны хитрые зависимости параметров от температуры и давления, что и определяет возможность их применения.

Заметим, что особенность, важная в одном случае, может оказаться совершенно не важной в другом – например, гигроскопичность не важна в вакууме и открытом космосе. Более того, особенность, мешающая применению в одном случае, может как раз решить техническую задачу в другом. Так, сильная зависимость какого-то параметра от температуры может позволить создать чувствительный температурный датчик.

Все течет, электропрочность изменяется

Увеличение электропрочности газов с ростом давления, т.е. концентрации, естественно приводит к мысли о диэлектрических жидкостях. Что мы о них знаем – хорошего и плохого? Если жидкость диссоциирует на ионы, то она не диэлектрик – в ней есть подвижные носители заряда. Разумеется, могут быть малы их концентрация (например, как в очень чистой воде) или подвижность (в силу большой массы и малой длины свободного пробега). Между прочим, в быту мы с проводимостью жидкостей не сталкиваемся (если не роняем включенный электроприбор в наполненную ванну) и поэтому не

задумываемся: проводники они или нет? Так вот, очень многие жидкости – вполне себе ионные проводники, электролиты. Мы так часто говорим о воде и о растворах всяческих веществ в ней, что забываем о том, что спирты, эфиры, кетоны, амины, амиды, сульфиды, сульфоксиды, фенолы, ..., фтороводород, диметилформамид, диметилсульфоксид, ацетон, ацетонитрил, уксусный ангидрид, нитробензол, нитрометан, фурфурол, диметилацетамид... и многие другие – электролиты. Их так много и нам так хочется «отстроиться» от воды, что химики употребляют специальное выражение: «неводные электролиты». Правда, проводимость у них не может конкурировать с хорошими металлами, но и в диэлектрики их зачислять никак нельзя.

Заметим, что вещество, которое с точки зрения физики – проводник, вполне может использоваться в технике как изолятор, и наоборот. Например, если параллельно соединить сверхпроводник и медь, то в медь ток не пойдет – как в изолятор. А если в линию передачи, передающую мегаамперный импульс, залить воду, то последняя вполне будет работать как изолятор, по которому течет ток величин в амперы и более! Для инженерных применений важны не определения, а относительные значения параметров. И ампер – это очень мало, если рядом мегаампер.

В истинно диэлектрических жидкостях, т.е. в тех, в которых нет своих собственных ионов, механизм проводимости напоминает газовый. Есть какой-то способ генерации ионов (ультрафиолет, примеси, эмиссия с электродов) – при относительно небольших напряжениях ток этих ионов растет пропорционально напряжению, затем наступает насыщение, «плато», а потом пробой. Отличия – участок роста на 7 порядков шире по напряжению, он доходит до 1 МВ/м, но и ток в конце этого участка на 2–4 порядка больше. Поэтому жидкости – хорошие диэлектрики, на линейном участке их проводимость на 3–5 порядков меньше, чем у газов. Далее – участок насыщения, который идет до 20–200 МВ/м и, соответственно, короче, чем у газов (к примеру, на 1–2 порядка короче, чем у воздуха «без ухищрений»). Даже если сравнивать с элегазом, жидкости выигрывают. Именно поэтому электрики и физики их тщательно исследуют.

В тихом омуте

В книгах иногда пишут, что в жидкостях проводимость и пробой устроены сложнее и изучены слабее, чем в газах и твердых телах. Сравнить трудно, но по количеству процес-

сов, которые могут повлиять на ток и пробой, жидкость действительно выглядит сложнее газа. Кое-что у них общее – например, процессы на электродах (термо- и автоэмиссия, поставляющие электроны в среду). Шероховатость, включения, пленки, газо-выделение из электродов – все это может и увеличить ток, и спровоцировать пробой, и все это есть и в вакууме, и в газе, и в жидкости. Но в жидкостях имеются твердые, жидкие и газовые включения, причем капельки жидких примесей и газовые пузырьки могут в электрическом поле изменять свою форму, а пробой в газовом пузырьке вряд ли пойдет на пользу жидкости. Далее, жидкости могут взаимодействовать с материалом электродов (например, нефтяные масла охотно взаимодействуют с медью). Газы это тоже могут делать, но там меньше реагента, а состав проще: жидкие диэлектрики – не всегда индивидуальные вещества, часто это смеси, причем если они получены из природных продуктов (скажем, нефти), то состав у них весьма сложен. При частичных разрядах, «маленьких пробоях», состав жидкости почти наверняка будет изменяться; с газами это может происходить, но не со всеми.

Еще одна сложность с жидкостью – ее труднее выбрать. Потому что раз процессов больше, то определить лучшую для тех или иных условий эксплуатации сложнее. Вдобавок, некоторые параметры для выбора жидкости существеннее, чем для выбора газа. Это теплоемкость, теплопроводность и вязкость – жидкости часто используют для охлаждения аппаратуры; хотя и с газами это случается.

Каких параметров в итоге удастся достигать? Для нефтяных масел, хлорированных углеводородов и кремнийорганических масел обычно указывают значения сопротивления 10^{10} – 10^{13} Ом·м, для углеводородов с хлором и фтором (фреонов) – 10^{12} – 10^{15} Ом·м. Электропрочность для реальных ситуаций – до 20–30 МВ/м. При очень тщательной очистке сопротивление может достигать 10^{17} – 10^{18} Ом·м, а электропрочность можно увеличить до 200–400 МВ/м, но, как пишут, такое состояние нестабильно – при эксплуатации жидкости загрязняются, хотя можно им обеспечить циркуляцию и очистку.

Это все при обычных условиях. С ростом температуры электропрочность уменьшается, но данных мало и они не надежны, потому что это влияние зависит от состава примесей. С ростом давления электропрочность растет – из-за роста электропрочности газа в пузырьках – и учетверяется при давлении 60 атм. При укорочении импульса электропрочность растет: при 1–10 мкс – в 2 раза, при 3 мкс – в 3 раза, при 4 нс – в 10 раз.

Понятное дело – всякому процессу нужно время на развитие. А за наносекунды какое развитие? Только успел эмитироваться, а импульс и кончился.

Когда мы доберемся до твердых диэлектриков, мы узнаем, что в их темном и страшном лесу есть еще такой зверь – пробой по поверхности. Формально это выглядит просто – помещаем между электродами кусок вещества, подаем напряжение и видим пробой именно по поверхности, т.е. искру или (если хватает мощности) змеящуюся по поверхности маленькую молнию. Причем это не пробой по газу (в отсутствие диэлектрика пробой не происходит) и не пробой по объему (его напряжение много меньше, чем при последнем). Что это такое и что с этим делать, мы обсудим ниже. А здесь зададим два вопроса, один умный и один «глупый», в одном: возможен ли пробой по поверхности жидкости и газа? Ответ прост: да. Пробой по поверхности жидкости был открыт в 1997 году, но позже, кажется, не изучался. А насчет пробоя по поверхности газа, то ваше удивление понятно – газ, как известно, заполняет весь... и так далее. Хорошо бы нам было, если бы, например, атмосфера Земли заполнила весь предоставленный ей объем, т.е. весь космос. Можно даже не весь... Подумайте сами, когда заполняет и не заполняет. А пока что заметим, что если плотный газ истекает через сопло в вакуум, то граница у потока газа вблизи сопла есть. И пробой по ней возможен, причем в данном случае даже понятно и почему, и по чему – по оптимальному, с точки зрения Пашена, пути. И этот эффект в 1981 году также был назван своим именем – «пробоем по поверхности газа».

А теперь займемся твердыми диэлектриками.

Твердое со всех сторон

Жидкие диэлектрики, как правило, скрыты от наших глаз корпусами емкостей и устройств, а газовый диэлектрик – воздух – мы не видим. Если, конечно, не смотрим на небо – но часто ли мы это делаем? Твердые диэлектрики – самые очевидные: изоляция всех проводов, изоляторы на столбах, изолирующие ручки инструментов. Рассмотрение начнем, как когда-то начинали рассмотрение проводников, с самого простого случая: хорошего большого куска при нормальных условиях. Ни тебе радиации, ни повышенного давления, ни особых температур, за окном поют птички... не тут-то было. У проводников поверхность влияла только тогда, когда «объема» было мало, т.е. в случае тонких пленок или нитей. У диэлектриков все хуже – если просто взять кубик материала разумного размера, то и сопротив-

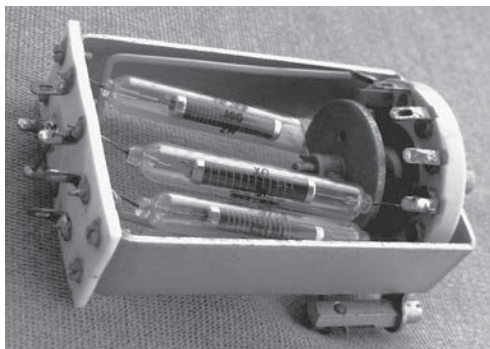
ление, и электропрочность будут определяться поверхностью. Поверхность включена параллельно объему, ее сопротивление и электропрочность много меньше, чем у объема, так что сами понимае. Для того чтобы измерить объемные свойства, а также для того чтобы сделать изолятор с большим сопротивлением и высокой электропрочностью, надо удлинить путь по поверхности, уменьшить напряженность поля, отношение напряжения к пути. Способ известен – сделать поверхность изолятора ребристой. Изоляторы, на которых подвешены провода линий электропередач и контактные провода трамваев, а также автомобильные «свечи» – все они именно поэтому ребристые.

Предположим, что мы сделали все достаточно «ребристым» и изучаем именно объемные явления. Проводимость диэлектриков зависит от того, могут ли в них перемещаться носители заряда. А кто там носители заряда? Ионы (если решетка ионная), электроны (если энергии хватает для заброса в зону проводимости), заряженные включения. Последнее, кстати, имеет место в жидких диэлектриках – там это называется «молионной проводимостью», движением заряженных капелек примеси. Есть ли такой механизм в твердых диэлектриках, неизвестно, но в отсутствие примесей его быть не должно. При наличии их такой механизм может иметь место. При подаче напряжения на твердый диэлектрик иногда наблюдается такой эффект – ток сначала возрастает, а потом медленно убывает и стабилизируется. Этот начальный ток называют «током абсорбции» или «током поляризации», он может быть связан с перераспределением зарядов и поля в диэлектрике и с процессами на электродах. Длится он десятки секунд, затухая в основном за минуты, а превышать установившееся значение тока может и вдвое. Однако в электротехнике характерным режимом эксплуатации является либо режим постоянного напряжения, либо режим переменного – но на частоте 50 Гц и выше. Ни в том, ни в другом случае токи абсорбции большого значения не имеют, поэтому ими обычно пренебрегают. Однако по их величине можно определить свойства изоляции и спрогнозировать ее срок службы.

Наличие примесей должно влиять и на ионную проводимость, если примесь образует ионы. Отдельный вопрос – возможность получения большой ионной проводимости в твердом теле. В этом направлении достигнуты значения около 10^{-2} Ом · м – для Ag_4RbI_5 , $\text{Cu}_4\text{RbCl}_3\text{I}_2$. Твердые ионные проводники – это одна из наиболее поражающих воображение (разнообразием подходов, методов и результатов) областей. Как жаль, что объем статей и книг ограничен...

Что же касается максимальных достигнутых значений сопротивления, то это, как ни странно, тефлон, он же «фторопласт 4», $(-\text{CF}_2-)_n$ – его максимальное объемное сопротивление в большинстве источников указывают как $10^{17}-10^{20}$ Ом·м, в одном источнике есть значение 10^{23} Ом·м, выглядящее неправдоподобно. Но и без него разброс максимальных значений составляет три порядка. Это может быть результатом ошибок при измерении или при переписывании чужих данных, а может быть и разбросом содержания примесей в материале. Другой претендент на корону – янтарь: для его сопротивления в большинстве источников приводятся значения $10^{17}-10^{18}$ Ом·м. (Правда, большинство этих источников – тупой копипаст, признак чего – одинаковое неправильное указание размерности.) Заметим дополнительно, что представление о высоком объемном сопротивлении тефлона и янтаря может быть следствием высокого их поверхностного сопротивления, а оно – следствием того, что эти материалы слабо сорбируют влагу и прочие загрязнения. На это обстоятельство указывает то, что в технике, используя янтарь и фторопласт в качестве экстремально высокоомных изоляторов, у них не всегда применяют меры для увеличения пути по поверхности. И более того, иногда пишут о покрытии изоляторов лаком на основе янтаря – для увеличения поверхностного сопротивления. Достойным конкурентом янтарю и тефлону является сера: по некоторым источникам ее сопротивление достигает $2 \cdot 10^{18}-2 \cdot 10^{19}$ Ом·м.

Теперь обратимся к поверхностной проводимости. Формально, метрологически ее определить легко – это то, что включено параллельно проводимости объемной. И при достаточной точности приборов хватит двух измерений на образцах разной формы, чтобы эти проводимости разделить. Физически же ее можно представить в виде двух параллельно соединенных проводимостей. Одна – это «настоящая», связанная с самим существованием обрыва решетки. При этом возникают поверхностные энергетические уровни, лежащие в запрещенной зоне, – вот вам и проводимость. Другая – это проводимость объемная, но по тонкой пленке на поверхности, состоящей из сорбированных компонентов атмосферы. Поэтому, если мы хотим уменьшить поверхностную проводимость, надо поверхность вымыть, высушить, обеспечить ей гладкость и гидрофобность. Тогда есть шансы получить рекордные значения. Данные по поверхностной проводимости не очень надежны, поскольку поверхностное сопротивление сильно зависит от примесей, от загрязнений поверхности, от влажности атмосферы, а для некоторых диэ-



Фторопласт (белая пластинка) в качестве сверхвысокоомного изолятора, а сопротивления заключены в герметичные стеклянные корпуса для увеличения поверхностного сопротивления

лектриков – вроде бы и от освещенности. Обратите внимание на размерность: по определению, удельное поверхностное сопротивление – это сопротивление квадрата любых размеров, выделенного на поверхности материала, если ток проходит через две противоположные стороны этого квадрата.

Изолятор в условиях

Как мы это делали и раньше, посмотрим, как условия (внешние и те, которые мы назвали внутренними) влияют на сопротивление диэлектриков. Влияние магнитного поля – это то, что у проводников называется «магнитосопротивлением», т.е. изменение удельного сопротивления проводника в магнитном поле из-за искривления траекторий носителей заряда под действием магнитного поля. Сопротивление при этом увеличивается, но если радиус кривизны намного больше длины свободного пробега, то влияние мало. О влиянии на движение ионов можно и не упоминать – их масса больше, чем электронов, а длина свободного пробега порядка постоянной решетки. Но и на электроны влияние будет мало – как и для металлов.

Влияние давления на сопротивление диэлектриков исследовали в основном в области тысяч и более атмосфер. При таких давлениях происходят чудеса – например, превращение диэлектриков в проводники. Но поднять сопротивление диэлектрика разумным увеличением давления – как это делают с газами в электротехнике и мощной СВЧ-электронике – не удастся.

Влияние облучения на диэлектрики многообразно: оно может инициировать химические реакции и влиять на состав, может

изменять концентрацию носителей заряда – электронов проводимости, может создавать дефекты в решетке, уменьшая подвижность ионов. А если учесть, что само облучение может вестись разными частицами и с разной энергией, то понятно, сколь разнообразны имеющиеся данные. В общем можно сказать, что сопротивление скорее уменьшится, чем увеличится, и что уменьшение вряд ли окажется больше чем на порядок, а увеличение – вряд ли больше чем втрое.

Вот что сильно влияет на сопротивление – так это влажность. Конечно, если диэлектрик пористый и на него пошел дождик, все ясно. Но и на абсолютно плотный материал при отсутствии атмосферных осадков влажность влияет – и очень сильно. Потому что на поверхности многих (а может, и всех) материалов существует сорбированный слой из компонентов атмосферы, в частности – воды. Этот слой и создает часть той самой «поверхностной проводимости». У гидрофобных материалов влияние влажности относительно невелико (если не доводить дело до конденсации), а у гидрофильных сопротивление может уменьшиться на 3–4 порядка при увеличении относительной влажности с нуля до нормальных для помещения 60%. Так что если нужны рекорды, вещества должны быть чистые, поверхности – чистые, гладкие и сухие, а температура... Вот теперь поговорим о ней.

С увеличением температуры проводимость, естественно, увеличивается (ионная – из-за увеличения диффузии ионов, электронная – из-за увеличения концентрации в зоне проводимости). По идее, должна бы увеличиваться и поверхностная проводимость, но с ростом температуры может истончаться или вовсе исчезать поверхностная пленка. Тут возникает философский вопрос – учитывать эти изменения или нет? Другими словами, если при подъеме температуры проводимость сначала возрастет, а потом убывает, становясь даже меньше исходной (поверхность высушилась), – это как считать, увеличением или уменьшением? Между прочим, похожий вопрос у нас появится и позже.

Однозначного ответа на этот вопрос нет – все зависит от условий эксплуатации. Если наш изолятор будет работать при стабильно высокой температуре или в сухой атмосфере, то про эти (т.е. хорошие) условия нам и нужны данные. А если он будет намокать в одних условиях, а потом еще и нагреваться, но так, что испарение не успеет его очистить до подачи напряжения... Ладно, не будем о страшном.

Но проблема еще вот в чем. У любого вещества – и в том числе у изолятора – есть термостойкость, предельная рабочая темпера-

тура такая, при которой он не сильно (и где-то оговорено, как именно) ухудшает свои свойства. Поэтому диэлектрик с рекордным сопротивлением, такой всеобщепотребительный, как фторопласт, и тем более такой экзотический, как янтарь, не может претендовать на внимание даже при небольшом повышении температуры. Янтарь размягчается уже при 100–150 °С, а термостойкость фторопласта-4 хоть и 260 °С, но после 150 °С его сопротивление быстро уменьшается. Поэтому возникает вопрос – а у кого высокие сопротивления при больших температурах? А то ведь рекордсмен тугоплавкости TaC (карбид тантала) плавится при 4000 °С, вдруг он заодно и диэлектрик?

В электротехнике к изоляционным материалам особо высокой нагревостойкости принято относить асбест, слюду, стекло и керамики. Максимальная рабочая температура асбеста и слюды достигает 500 °С и 1100 °С соответственно. На звание рекордсмена по сопротивлению асбест не претендует (уже при комнатной температуре оно составляет 10^8 – 10^{10} Ом·м), а сопротивление слюды при 200 °С достигает 10^{11} – 10^{12} Ом·м, а при 800 °С – 10^7 – 10^8 Ом·м. Поскольку оба рассматриваемых материала – природные, то все их параметры имеют большой разброс. Вообще же стоит отметить, что широкое распространение этих материалов в электротехнике (а слюды – и в электронике!) было связано с их специфическими свойствами. Асбест – это естественные нити, волокно, а слюда – естественные сверхтонкие пластины (она расщепляется на пластинки тоньше микрона).

Стекло – вот уж кто более чем разнообразен. В зависимости от состава максимальная рабочая температура, определяемая размягчением, может быть от 350 °С до 1200 °С. Последняя цифра – это чистый плавный кварц, претендент на рекорд, его сопротивление (максимальные имеющиеся в литературе цифры) при 500–800–1000 °С составляет 10^9 – 10^7 – 10^6 Ом·м, но оно, естественно, сильно зависит от примесей. На поверхностную проводимость, как и у всех стекол, сильно влияет влажность, но, конечно, не при этих температурах. С кварцем охотно соперничают керамики, которых много разных и которые не столь привередливы технологически, как кварц. Оксидные керамики (самые обычные и традиционные) – это и фарфоровые тарелки, и электроизоляторы на столбах. Их основа – оксиды SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , ZrO_2 (других оксидов – единицы процентов), рабочая температура достигает 2000 °С. Сопротивление сильно зависит от состава, но в справочниках для температур 500–800–1000 °С можно найти значения 10^{10} – 10^6 – 10^5 Ом·м, т.е. близкие к чистому кварцу – при одних температурах больше,

при других меньше. Для чистых оксидов Al_2O_3 и BeO значения сопротивления, естественно, выше (они при тех же температурах больше примерно на порядок: 10^{11} – 10^7 – 10^6 Ом·м), а для рекорсмена – оксида MgO – больше еще на порядок. Повторим, что разброс данных в разных источниках может быть в несколько порядков, это определяется прежде всего примесями и какой ценой получены лучшие данные, которые мы, осторожно округлив, приводим. Но этого лучше вам не знать. А то пропадет стремление к рекордам, которое, естественно, у вас есть!

До 1000°C мы добрались, оксидные керамики могут работать и дальше, но сопротивление у них уже не то, которое должно быть у хорошего диэлектрика. Но лучше никого и нет – на роль высокотемпературных изоляторов могут претендовать только нитриды, а именно BN , имеющий при 500 – 1000°C сопротивление $2 \cdot 10^8$ – $3 \cdot 10^2$ Ом·м, и AlN , имеющий при 500 – 1000°C сопротивление 10^7 – 10^3 Ом·м. Но оба они уступают оксидным керамикам.

Тут надо сделать небольшое философское отступление. Что такое большое и малое сопротивление, хороший и плохой изолятор и так далее? Все определяется условиями эксплуатации, задачей и выбранными для ее решения (с учетом возможностей материалов) методами. В какой-то ситуации и полупроводник может оказаться проводником – по сравнению с остальными, а в другой он же может работать как изолятор. Проблема с температурой в том, что с ее ростом проводимость металлов падает, а изоляторов – растет. Они, так сказать, сближаются... что должно радикально изменять характер электротехники, традиционно построенной на чудовищности различия между медью и тефлоном. Оно намного больше, чем различие в массе между вами, уважаемый читатель, и планетой Земля.

А почему вообще важно иметь материалы с высоким сопротивлением? Электрикам это не слишком важно, их устроили бы и меньшие значения. Но есть ситуации, когда надо измерить очень маленький ток или очень большое сопротивление – в этом случае сама измерительная схема должна иметь возможно более высокое входное сопротивление, иначе вы не увидите сигнала. Кроме того, с ростом температуры сопротивление падает, и, наконец, мы попадаем в ситуацию, когда материал, рекордный и избыточный при низкой температуре, еле справляется с задачей, когда температура перевалила за тысячу или две и устройство уже светится...

Пробой

Естественное желание электрика – увеличить напряжение, а естественное желание любого человека – увеличить напряжение и посмотреть, что получится. Рано или поздно получится пробой – сильное (лавинное) нарастание тока и, соответственно, мощности. А если источник справится и защита замешкается – это произойдет с необратимыми последствиями для изолятора: с образованием оплавленного отверстия, с разложением материала, с ростом проводимости и хорошо если не с пожаром. В отличие от жидких и газообразных диэлектриков в твердых диэлектриках последствия пробоя остаются на месте, поэтому пробой там, как правило, выводит их из строя. Разве что очень быстро отключать источник или жестко ограничивать мощность. Тогда происходят так называемые «частичные пробои», последствия коих не летальны (пока, опять же, их немного – напоминаю, мы ж говорим о твердых диэлектриках, последствия пробоев в которых остаются на местах, накапливаются и – см. выше).

Сначала – о механизмах пробоя. Их несколько – два больших и несколько маленьких. Большие – это чисто электрический и электротепловой. Чисто электрический устроен так: поле разгоняет электрон, он ионизирует при столкновении атом, порождая новый электрон, далее – цепная реакция, как говорят химики и атомщики, или лавинный процесс, как говорят остальные физики, с отбором энергии у источника и перекачкой ее посредством поля и частиц в диэлектрик. Электротепловой пробой можно рассматривать как отдельный процесс, а можно и как путь эволюции электрического. При нем размножение электронов, ускоряемых полем, происходит не столько за счет ионизации, сколько за счет роста проводимости диэлектрика при нагреве. Это процесс намного более медленный и при малой длительности импульса он не успеет произойти. Согласно некоторым публикациям, заметную роль в пробое играет образование дефектов в кристаллической решетке диэлектрика, когда он находится в поле высокой напряженности.

Малые механизмы пробоя следующие. Электрохимический – по материалу сочится ток и тихо-тихо идет электролиз, разрушающий материал и увеличивающий проводимость. Ионизационный – в порах материала возникает газовый разряд, и его продукты делают что-то плохое с материалом. Электротермомеханический – при нагреве материал трескается. Электромеханический – упоминаемый в литературе странный пробой, вызванный давлением электродов на материал. Автоэлектронный, ини-

цированный шероховатостями на электроде. Сколько же можно придумать гадостей!

Теперь немного цифр. Электропрочность тефлона достигает 30 МВ/м, кварца – 40 МВ/м и не снижается до 500 °С, керамик на основе Al_2O_3 – 80 МВ/м и почти не снижается до 800 °С. Это максимальные цифры, в литературе попадаются и существенно меньшие. Причем это цифры для относительно толстых – миллиметровых – образцов. Для тонких – микронных – пленок цифры существенно выше: например, для тефлона, слюды и стекла 250 МВ/м, для BN – 300 МВ/м, для AlN – 400 МВ/м. Встречаются в литературе и бóльшие величины (например, 800 МВ/м для майлара). Причем некоторые авторы приводят данные по электропрочности, тактично умалчивая о размерах образцов, и поэтому сравнение оказывается не всегда возможным.

Увеличение электропрочности при уменьшении толщины объясняется несколькими причинами. Основная (в том смысле, что работающая всегда) – улучшение теплоотвода, подавление механизма электротеплового пробоя. Три дополнительные: уменьшение толщины уменьшает вероятность того, что в пленке найдется какой-либо дефект, с которого начинается пробой; пленки изготавливают по иным технологиям, нежели массивные образцы, и некоторых дефектов в них быть не может вообще; при изучении пленок не только толщина меньше, но, как правило, меньше и площадь – а это также уменьшает вероятность нарваться на дефект.

Кроме пробоя по объему материала есть еще пробой по поверхности. Он похож на один из вариантов поверхностной проводимости – это пробой по чему-то, что образуется около поверхности и благодаря ей. Примерно так, как для поверхностной проводимости по сорбированному слою воды с примесями нужна поверхность, на коей бы эта водичка сорбировалась. Устроен поверхностный пробой так. Из электрода эмитируются (автоэмиссией) электроны, они бомбардируют поверхность диэлектрика, вызывая десорбцию воды, перераспределение зарядов по поверхности, изменение распределения электрического поля, эмиссию вторичных электронов. А раз эмиссия – то возможна электронная лавина, но не в объеме материала, а вдоль его поверхности. Обычно ее трактуют как разряд в газе, но существующий благодаря процессам на поверхности. Однако пробой по поверхности происходит и в вакууме, причем это явно не «вакуумный пробой», поскольку отрыва частиц не происходит (и автоэмиссия для него тоже не обязательна). Правда, можно

сказать, что поверхностный пробой в вакууме – это пробой в газе, десорбированном с поверхности. Ну а если поверхность нагрета и очищена от сорбированной влаги и газа? Теперь вы понимаете, почему теория пробоя далека не то чтобы от завершения, а даже от середины?



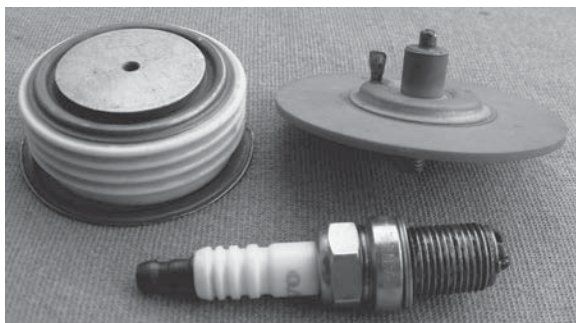
Изолятор с удлинненным путем по поверхности (это и два следующих фото сделаны А.Кузнецовой)



Вообще ребристый изолятор



И еще один ребристый изолятор



Автомобильная свеча



Конденсатор; при пробое давление в канале пробоя было таким, что керамика раскололась



Монтажная площадка на изоляторах – для безопасности

В целом можно сказать примерно так: хороший, т.е. чистый и сухой, диэлектрик при правильно изготовленных контактах (таких, чтобы не происходило локального усиления поля и эмиссии) почти не уменьшает напряжение пробоя по сравнению с воздухом. При плохо выполненном контакте напряжение пробоя может уменьшаться в 2–3 раза, а при влажном диэлектрике – еще сильнее. Если диэлектрик помещен в вакуум, то ситуация, кажется, хуже – диэлектрик уменьшает напряжение пробоя в 2–2,5 раза. Однако люди научились с этим бороться – поверхность изолятора делают ребристой, увеличивая в несколько раз путь по поверхности – это работает и в вакууме, и на воздухе.

Влияют ли на пробой давление, радиация, магнитное поле и температура? Из описания механизма видно, что давление и магнитное поле если и влияют, то при обычных своих значениях – пренебрежимо мало. Радиация может влиять на пробой, просто создавая в диэлектрике пространственный заряд или иные дефекты. Что касается температуры, то она должна влиять, по крайней мере, на электротепловой пробой. Нагрев будет уменьшать электропрочность, поскольку он сдвигает материал ближе к опасной ситуации.

Наше маленькое ϵ

Проводимость – линейную и нелинейную – мы обсудили и даже кое-что сказали про ее зависимость от времени и частоты. Кое-что – потому, что к этому вопросу мы еще обратимся. А пока посмотрим на знаменатель в законе Кулона $F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r^2}$. Мы увидим там две греческие буквы «эпсилон», причем одна из них с индексом «ноль». Из школьного учебника физики вы знаете, что то, которое с индексом, называется электрической постоянной, у нее есть значение и она имеет размерность. А то, которое без – оно разное для разных сред и безразмерное, называется относительной диэлектрической проницаемостью (или просто диэлектрической проницаемостью). Так вот, различие между ними столь глубоко и принципиально, что тому, кто обозначил их одной буквой, должно быть стыдно (на самом деле ситуация еще ужаснее – их долго и называли одинаково!). То, которое с размерностью, не является свойством этого мира (как степень в той же формуле), не является характеристикой объекта (как то, что стоит в числителе) и не является характеристикой среды (как то, которое без индекса). Оно зависит от системы единиц, и если бы мы, скажем, стали измерять расстояние не метрами, а сантиметрами, то оно бы тут же радостно (или нет – но его бы все равно никто не спросил) уменьшилось в десять тысяч раз. Потому что формула должна давать правильный численный ответ.

Заметим, что формулы физики, известные вам, делятся на две группы: в которых нет коэффициентов с размерностями (законы Ньютона, Ома) и в которых есть (законы Кулона, Био – Савара – Лапласа, гравитация). Это различие означает простую вещь – первые когда-то использовались как определение какой-то входящей в них величины (силы и тока соответственно). Вторые – нет, причем когда связи входящих в них величин и оказались установлены, то это всегда была пропорциональность, а не равенство! А единицы измерения для всех входящих в них величин уже существовали. И поскольку никто не выбирал параметры Вселенной так, чтобы коэффициент был ровнехонько «1», то он оказался каким попало. Конечно, мы можем изменить систему единиц так, чтобы эти коэффициенты оказались равными единице (и такие системы есть), но тогда возникнут коэффициенты в других формулах.

Теперь обратимся к самому ϵ . В математике этой симпатичной буквой обозначают малые величины, в физике это не так – у нас она бывает и малой, и большой. В школьной физике эта

величина встречается два раза – в законе Кулона (или в формуле для поля точечного заряда – это одна и та же формула) и в формуле для емкости конденсатора (например, для плоского конденсатора $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$). На всякий случай учтите, что первая формула верна, только если все пространство заполнено этим веществом с этой самой ϵ , а вторая формула вообще приближенная.

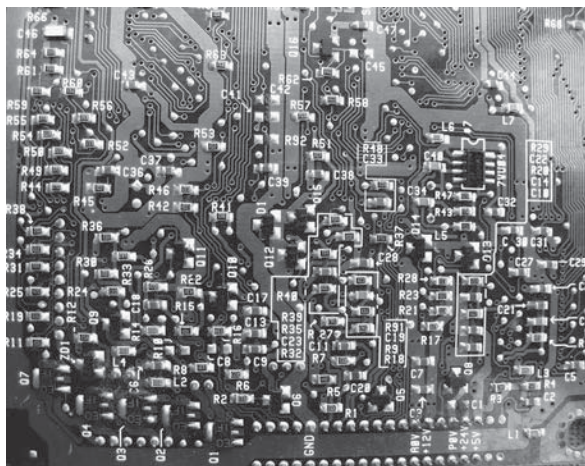
С диэлектрической проницаемостью есть одна странность – она интересует в основном тех, кто занимается радиотехникой. Разумеется, эта величина зависит от частоты, и радистов она интересует на «их» частотах. В низкочастотной же области, о которой мы сейчас говорим, диэлектрическая проницаемость влияет на распределение электрического поля, а значит – на электропрочность всех высоковольтных устройств. Но выбор изоляционных материалов для высоковольтной техники определяется электропрочностью материалов, изменить же ϵ , не заменяя материал, невозможно. Поэтому сами значения ϵ большого значения не имеют. Однако на всякий случай – раз уж мы говорим о рекордах – приведем и максимальные значения. На низких частотах диэлектрическая проницаемость определяется дипольным моментом молекул, поэтому из жидкостей рекордсменами по ней, как и следовало ожидать, являются H_2O – 81, H_2O_2 и HF – по 84, H_2SO_4 – 101, CH_3ON (формальдегид) – 110 и HCN – 115. Из газов – естественно, пары этих соединений, да только все равно диэлектрическая проницаемость их около 1, поскольку плотность у паров мала (при нормальном давлении). Что касается твердых диэлектриков, то там ситуация много сложнее. Большинство ионных кристаллов имеет ϵ до 10, некоторые окислы – выше: например, PbO – 26, TiO_2 – 110 (это поликристалл, а монокристалл вдоль одной из осей – так и вообще 173). Оксиды на основе нескольких ионов могут иметь и большую диэлектрическую проницаемость, например SrTiO_3 – 250. А дальше – царство сегнетоэлектриков, в некотором смысле электрических аналогов ферромагнетиков (те имеют домены со спонтанной намагниченностью, а эти – домены со спонтанной электризацией). Что касается ϵ , то она у них достигает 10^4 (у соединений на основе окислов BaCaTiSnZr) со всеми прелестями в виде петли гистерезиса. Рекордное же значение составляет 10^5 , а при некоторых ухищрениях – еще немного больше ($\text{La}_{15/8}\text{Sr}_{1/8}\text{NiO}_4$). Поскольку это значение входит в числитель формулы для емкости конденсатора, то понятно, кто облизывается на такие значения – разработчики конденсаторов для всего

миниатюрного (и того, что в карманах, и того, что на столе, и того, что летит к звездам).

Впрочем, это можно сказать обо всех материалах с рекордными значениями всех параметров. А если не сегодня днем, то завтра к вечеру. Конструкторы ненасытны – дайте нам рекордных материалов, и побольше!

От внешних условий диэлектрическая проницаемость или не зависит (как от магнитного поля и давления), или зависит слабо. Например, для оксидов она изменяется (обычно растет) на несколько процентов при изменении температуры на 100 °С. Казалось бы, немного, но в радиоэлектронике иногда нужна существенно большая стабильность емкости конденсатора при изменении температуры. Поэтому разрабатываются материалы, у которых с температурой ϵ изменяется мало (или изменяется в разных направлениях, а соответствующие конденсаторы соединяются в цепочки). Природа разнообразна, а человек хитроумен.

Совсем особо ведут себя сегнетоэлектрики. У них диэлектрическая проницаемость растет, достигает максимума при некоторой температуре, а затем уменьшается. Аналогично может вести себя зависимость от давления – разница в том, что температуры для такого поведения нужны самые обычные, а давления –



Если около детали написано «R» – это сопротивление, если «С» – это конденсатор. В компьютере, телефоне, смартфоне, у вас на столе и в кармане их сотни. Или тысячи. А тех, около которых ничего не написано, – на несколько порядков больше

весьма высокие (например, 2000 атм). Поэтому отношение к этим зависимостям в технике различается. Зависимость от давления может быть использована для измерения высоких давлений, но она не слишком заботит разработчиков конденсаторов. Зависимость же от температуры может быть использована для измерения, но она же во многих случаях вредна и должна учитываться, так как делает емкость конденсаторов зависящей от колебаний температуры. На этом сегнетоэлектрические чудеса не кончаются, ибо у некоторых сегнетоэлектриков ϵ сильно зависит от напряженности электрического поля (например, при увеличении поля до 0,1–1 МВ/м она может увеличиваться более чем на порядок и достигать 10^5). А если учесть, что все эти «поведения», т.е. зависимости от температуры, давления и поля, переплетаются: зависимость от любого параметра сама зависит от остальных... то вот уж где можно быть уверенным, что загадок и работы хватит на всех желающих. Впрочем, не про любую ли область физики это можно сказать?

Короче, еще короче

Некоторые параметры – и проводников, и изоляторов – зависят от времени. Иными словами, если мы даже мгновенно изменяем что-то, что как-то влияет на объект, то объект «отзывается» не мгновенно. Пример – у электронов есть масса, и если мы создадим в проводнике электрическое поле, то электроны приобретут соответствующую дрейфовую скорость не сразу. Попробуйте оценить это время и убедитесь, что при нормальных условиях оно существенно меньше времени распространения света на расстояние порядка размеров проводника, т.е. мы не сможем создать поле во всем объеме проводника «так мгновенно», чтобы можно было почувствовать, что электроны реагируют не мгновенно. Но если мы возьмем монокристалл и охладим до криогенных температур, то шансы заметить эффект есть. Впрочем, проводимость в любом случае не увеличивается, а падает, проводник становится «хуже».

Пробой в вакууме может развиваться по разным механизмам. В самом упрощенном виде это либо нагрев анода предпробойным током, испарение и пробой в парах, либо отрыв частички от электрода, полет, удар, испарение – и пробой в парах. И тот, и другой процессы имеют свое время развития, и если импульс кончился раньше, то пробой может и не развиваться. До какой-то степени укорочение импульса может быть скомпенсировано ростом напряжения – при нем некоторые из процессов станут развиваться быстрее.

В диэлектриках ситуация сложнее и (по крайней мере частично) лучше. Действительно, если носители заряда, имея массу, реагируют не сразу, то, значит, на коротких импульсах проводимость окажется меньше, а электропрочность выше. Но конкретные величины зависят от механизма. Например, в вакууме проводимость – это авто-, фото- и термоэмиссия. Это поверхностные процессы, при них электроны перемещаются на столь малые расстояния, что надеяться на уменьшение тока за счет того, что они «не успели», не приходится. Вот если вслед за импульсом ускоряющего поля последует смена знака и тормозящее поле не даст электрону долететь до анода – ток действительно окажется меньше.

В диэлектриках длина свободного пробега носителя заряда, на которой он набирает энергию от ускоряющего поля и создает ток проводимости, мала. Собственно, поэтому диэлектрик и является диэлектриком – в нем эта длина мала (меньше, чем в металле), а электронов, ускоряемых полем, тоже намного меньше. А раз мала длина пробега, то малы и время пробега, и время реагирования материала на приложенное электрическое поле. Поэтому в диэлектриках проводимость на коротких импульсах не должна отличаться от проводимости на постоянном токе. Кроме, конечно, ситуации, когда под действием приложенного поля и протекающего тока в диэлектрике происходят какие-то процессы, изменяющие сам диэлектрик (например, электролиз).

Заметим, что у нас есть один «диэлектрик», в котором концентрация электронов мала, но длина пробега может быть и поболее метра, – это вакуум. Его обоснованно считают диэлектриком, но если в него поместить катод и анод, подать напряжение и получить анодный ток, то называть такой вакуум диэлектриком как-то неловко. Все физические и технические термины являются обобщениями – и поэтому у всех них есть область применимости, и она ограничена.

С пробоем диэлектриков ситуация намного сложнее. Процессов, которые важны для пробоя, много, скорости и времена развития этих процессов самые различные: те же химические и диффузионные процессы могут тихо-тихо идти часами и годами, а есть процессы, развивающиеся за микросекунды. Правда, самые медленные называют «старением» изоляции и рассматривают их отдельно от собственно пробоя. Но и без них сложностей хватает. Большинство процессов, протекающих при пробое в газе, развиваются за милли- и микросекунды, в жидкостях и твердых телах – за десятки и десятые доли микросекунд. В них все происходит быстрее – прежде всего потому, что от атома до

атома существенно ближе. Кстати, на вопрос, во сколько раз в воздухе при нормальных условиях (22,4 литра, 29 граммов) молекулы дальше друг от друга, чем, например, в воде (1 литр, 1 кг), большая часть отвечает неправильно.

Поэтому, укорачивая импульс до этих величин, можно поднять поле пробоя – но опять же, не до бесконечности (обычно – в несколько раз). Потому что, как сказано выше, при увеличении поля некоторые процессы начинают идти быстрее. И потому, что если не успел один процесс, то пробой может осуществиться и по другому механизму. Напряжение пробоя возрастает вдвое при укорочении импульса (например, для газов – до 2 мкс, для жидкостей и твердых тел – до 20 нс).

Импульсы и частоты – близнецы, но не братья

Рядом с короткими импульсами лежит проблема высоких частот – потому, что при высокой частоте значения электрического поля изменяются быстро (как и при приложении коротких импульсов, а точнее – импульсов с коротким фронтом). Это важное сходство, но дальше начинаются различия. Импульс высокого напряжения – он один, или, если их и несколько, то они редко следуют один за другим. А высокочастотное электромагнитное поле выглядит как непрерывно следующие один за другим синусоидальные импульсы – то положительные, то отрицательные. И в такой ситуации почти все происходит по-другому.

Заметим, что переход здесь плавный, а люди для простоты делят все на «импульсный режим» и «частотный режим». А если импульсов два? А если десять? А если сто? А если импульсы длиннее промежутков между ними? И так далее... Рассуждать действительно легче в дискретной ситуации, но надо понимать, что это упрощение, а значит – приближение. И что всегда может возникнуть (и часто возникает) промежуточная, «смешанная», более сложная задача. Но пусть ситуация не самая сложная – просто высокочастотное поле.

По части проводимости проводников тут нам ничего хорошего не найти – на высоких частотах ток протекает по поверхности проводника, сопротивление, опять же, увеличивается. Иными словами, можно сказать, что на коротких временах и высоких частотах проводник делается хуже, чем при постоянном токе. С этим приходится мириться: коаксиальные линии, волноводы, полосковые линии и вообще почти все, что используется для передачи СВЧ-сигналов (а это радиолокация, связь, TV, компьютеры), – почти все сделано из металла. Правда, есть еще

диэлектрические волноводы, низкочастотные братья оптоволоконна, и до недавних пор они применялись редко – в них больше потери на излучение. Но люди все больше осваивают миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны, а в них потери обычных волноводов столь высоки, что одно капустное от другого по содержанию углеводов не отличается, т.е. хрен редьки не слаще. И можно ждать расширения применения волноводов диэлектрических.

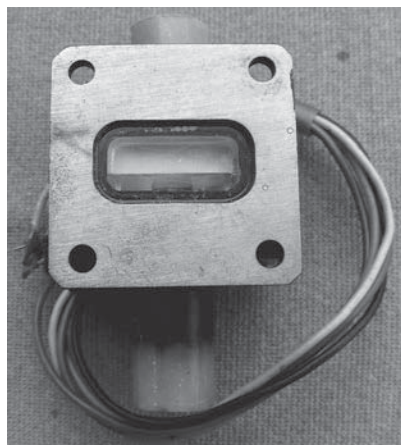
По части диэлектриков ситуация сложнее. В вакууме основной механизм проводимости – эмиссия с электродов, а основных механизмов пробоя – три (через разогрев остриев на катоде током автоэмиссии, разогрев анода током эмиссии, отрыв и ускорение частичек). Эмиссия – процесс чисто поверхностный, можно считать – мгновенный. Но вырвавшийся из электрода на свободу электрон может не долететь до противоположного электрода, если за время его полета успеет смениться направление поля и его затормозят. Так что на СВЧ проводимость вакуума (интересное словосочетание, да?) может оказаться и меньше. Но надеяться на это не надо – уж очень тонкое совпадение параметров должно случиться. Что касается пробоя, то если за полупериод напряжения какой-то из трех механизмов пробоя вакуума успеет поставить в зазор пары материала электрода, достаточные для пробоя в газе, то мы получаем ситуацию пробоя в газе. Если частота столь велика, что не успеет – то это произойдет за несколько полупериодов, нагрев будет суммироваться и существенно большей, чем на постоянном напряжении, электропрочности ждать все равно не приходится.

Вообще же эти процессы исследованы не слишком хорошо, и вот почему. Большие мощности СВЧ-колебаний получают для вывода в атмосферу (радиолокация), и тогда ограничителем мощности оказывается пробой в газе, в атмосфере. Или в плазме токамака, если мы вводим СВЧ-излучение в токамак для нагрева плазмы. Правда, в обоих этих случаях СВЧ-излучению все равно придется проходить через диэлектрическое «окно», разделяющее вакуумный объем прибора, генерирующего СВЧ-излучение, и атмосферу либо плазму. Выше было рассказано про поверхностный пробой диэлектриков, помните? Так вот, в данном случае он и происходит, причем ситуация осложняется и усугубляется тем, что в какие-то моменты СВЧ-поле ускоряет эмитированные электроны в сторону керамики, увеличивая тем самым вторичную эмиссию и помогая развиваться разряду.

Это что касается поверхности, а данных по объемному пробую на СВЧ-частотах в диэлектриках, кажется, нет. Вот если

когда-то люди начнут всерьез осваивать космос, делать в космическом вакууме – который не везде и не очень вакуум – мощную СВЧ-технику, тогда интерес к СВЧ-пробою может сильно возрасти. Кстати, на Луне аппаратура, которую создаст кто-то из читателей этой книги, будет работать в хорошем вакууме, а вот на Марсе с разрядом и пробоем будут проблемы: 0,01 атм. (см. кривую Пашена) – это очень нехорошо. И даже CO_2 – хоть он в этом случае и лучше воздуха – не спасет.

Высокочастотное электромагнитное поле, как сказано выше, похоже на короткие импульсы скоростью изменения напряженности поля. Но оно отличается их частотой, их количеством. Это



Вывод энергии сверхвысокочастотного прибора – за слюдой вакуум



Выводы энергии мощных сверхвысокочастотных приборов, на левом внизу – след пробоя, металлизированный (блестящий) участок

означает, что все эффекты, которые могут накапливаться от импульса к импульсу, «на частоте» будут принципиально важнее. Например, тепло – т.е. превращение энергии поля в нагрев. Действительно, именно этот процесс принципиально важен для применения диэлектриков на СВЧ. Но сначала мы вернемся к Кулону и еще поговорим о маленькой букве ϵ .

Кулон и за его спиной

Выше были названы вещества с большими значениями диэлектрической проницаемости – но эти значения относились к постоянному полю или низким частотам. Механизм ослабления поля известен – материал создает свое поле, направленное навстречу исходному, суммарное поле оказывается меньше исходного в ϵ раз. Способ, которым материал создает свое поле, один – это перемещение зарядов. Но заряды в диэлектрике могут перемещаться многими способами. Самый быстрый процесс – поляризация атомов, смещение электронного облака относительно ядра. Этот механизм можно считать мгновенным (по крайней мере, до инфракрасного диапазона, до 10^{14} Гц). Если это ионный кристалл, то могут смещаться друг относительно друга ионы решетки, характерное время этого процесса на несколько порядков больше, т.е. уменьшение ϵ ввиду «отключения» этого механизма наступает обычно на частотах 10^{12} – 10^{13} Гц, выше диапазона СВЧ (частота 10^9 – $3 \cdot 10^{11}$ Гц, длина волны 30 см – 1 мм). А более медленных механизмов перемещения зарядов в диэлектриках несколько, самый распространенный и часто упоминаемый – вращение полярных молекул. Спад ϵ из-за медленных механизмов перемещения может начинаться со звуковых частот, с 10^4 Гц и даже еще раньше, и понемногу продолжаться вплоть до 10^8 Гц, захватывая весь радиодиапазон – от сверхдлинных волн почти до СВЧ. Между тем, значения диэлектрической проницаемости влияют не только на емкость конденсаторов, они влияют на распространение электромагнитной волны во всех устройствах и приборах: в коаксиальных кабелях, волноводах, антеннах, словом – везде. Примерно как коэффициент преломления света, тот самый « n », влияет на распространение света в биноклях и моноклях, в телескопах и микроскопах, в вазах и люстрах, в окнах и иллюминаторах. Причем именно по тем же причинам, поскольку – не удивляйтесь – $\epsilon = n^2$, т.е. это почти одно и то же, только вам забыли об этом сказать. Да, вот еще что – медленные процессы поляризации сильно зависят от температуры. Так что устройство, хорошо

ведущее себя зимой, может повести себя плохо летом, и наоборот, а хорошо работающее при малом уровне мощности – плохо повести себя при большом. Почему-то наоборот не бывает, и догадайтесь сами, почему.

В итоге ситуация такова – среди великого множества диэлектриков есть такие, у которых в диапазоне СВЧ ϵ достигает нескольких сотен (рекорд – 1200), но другие их параметры настолько плохи, что на практике применять их невозможно. Основных причин ограничений две: одна – это потери в материале, о них поговорим ниже, а другая тривиальна и встречается всегда. Это – термостабильность: параметры материала и, стало быть, прибора с этим материалом и устройства на этих приборах не должны сильно изменяться с температурой. Казалось бы, есть универсальное решение – термостатирование аппаратуры. Но это усложняет, удорожает, увеличивает вес и потребление энергии и так далее. Кроме того, термостатирование может быть не эффективно, если источник тепла – сам материал, процессы в нем. Потому что в этом случае материал греется изнутри, а охлаждается снаружи. В результате – неравномерный нагрев, внутренние слои оказываются горячее наружных, и параметры все равно изменятся. И наконец: разработка нового материала – это более умное решение. Например, потому, что материалы – фундамент, и новый материал будет применен много-много раз. А термостатирование придется городить каждый раз заново. Правда, есть еще промежуточное решение – новая конструкция на старом материале. Ну что ж, иногда удается вывернуться этим способом. Но физик не должен простаивать, а технолог не должен вешать всю проблему на шею конструктору. А разумное совместное решение задачи – большое искусство, и для этого недостаточно трех гениальных специалистов. Есть такое полузабытое слово – команда.

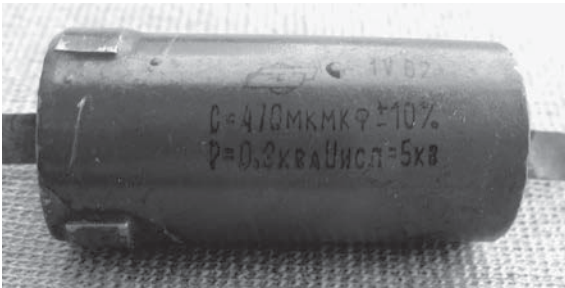
Технические решения проваливаются, педагогические команды распадаются, альпинисты гибнут – не всегда из-за слабости отдельных участников. А иногда из-за того, что некоторые участники с какого-то момента начинают тянуть на себя все одеяло, а не думать о деле. Особенно часто это происходит – по моим личным наблюдениям последних лет – при ухудшении внешней обстановки, именно тогда, когда это наиболее опасно. Не знаю, почему. Может быть, из-за трусости? На всякий случай учтите – эгоист выигрывает у альтруиста, но команда альтруистов выигрывает у команды эгоистов.

Что же до диэлектрической проницаемости, то в диапазоне СВЧ при, скажем так, допустимой температурной нестабильно-

сти и приемлемых потерях реально применение диэлектриков с ϵ около 40 (например, $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$), а дальше начинается область компромиссов, когда для конкретных применений можно смириться с большими потерями и меньшей термостабильностью, но зато получить ϵ около 150 (TiO_2) или 300 (монокристаллы BaTiO_3), а то и больше. Но понятие «рекордный материал» здесь сильно размывается – рекордный по какому параметру? А даже если он рекордный, то можно ли его для чего-то применить, если у него другие параметры – ну совсем никудышные? Заметим, что это направление активных поисков физиков и технологов, что связано с попытками продвижения в область более высоких частот.

Кроме термостабильности, важны еще диэлектрические потери. Когда мы пропускали – хоть через проводник, хоть через диэлектрик – постоянный ток, выделялось тепло, т.е. электрическая энергия, расходуемая источником, превращалась в тепловую. Если к материалу приложено переменное напряжение, то с таким же результатом будет течь переменный ток. Теперь возьмем конденсатор, заполним его – не пугайтесь, это ненадолго – проводником и приложим к нему переменное напряжение. Синусоида тока будет пропорциональна синусоиде напряжения – закон Ома рулит! А теперь выкинем этот проводник и заполним конденсатор, как и положено хорошим детям, диэлектриком. Если диэлектрик идеальный, то синусоиды тока и напряжения раздвинутся по фазе на $\pi/2$, на 90° . Если же у диэлектрика есть небольшая проводимость, то суммарная синусоида тока (нарисуйте и убедитесь) немного сдвинется. Так вот, угол, на который она сдвинется, и принято использовать в качестве характеристики качества диэлектрика. А почему не просто сопротивление? – изумитесь вы. Потому, что при переменном напряжении, особенно на высоких частотах, сдвиг кривых и переход энергии поля в тепло определяется не сопротивлением постоянному току, а передачей энергии от поля. Поле раскачивает заряды, значит, передает им энергию, а колебания ионов решетки – это и есть тепло. Из-за способа представления переменных токов и напряжений векторами (в некоторых школьных учебниках об этом рассказано, но здесь это неважно), вышеупомянутый сдвиг суммарной кривой от теоретической для идеального диэлектрика характеризуют не самим углом, а его тангенсом: параметр принято называть $\text{tg}\delta$, где δ – этот самый угол в радианах. Другое дело, что в интересной практически области $\text{tg}\delta$ равен самой δ , но все говорят и пишут « $\text{tg}\delta$ ».

Так вот, для самых-самых хороших диэлектриков он равен 10^{-4} . Эта величина растет с увеличением температуры, а для многих диэлектриков – с ростом влажности (из-за обычной проводимости) и, кроме того, сложно зависит от частоты. Требования к величине зависят от области применения: электрики мирятся со значениями 10^{-2} , а вот для электроники СВЧ это недопустимо много – там обычны значения 10^{-3} – 10^{-4} . Рекордно низкие потери у монокристаллов Al_2O_3 и алмазных пленок – около 10^{-5} при $20^\circ C$.



На конденсаторе указана максимальная мощность, т.е. та электрическая мощность, которая, превратившись в тепло, не выведет его из строя



Срок службы конденсаторов уменьшается с увеличением напряжения, процессы в изоляции ее разрушают

Немного о тепле

Разговор о теплопроводности – вообще это большой и сложный разговор, но сейчас надо все-таки немного об этом сказать. Потому что эксплуатация электрооборудования, если речь не о сверхпроводниках, обязательно влечет тепловыделение, и это тепло надо отводить. Тепло выделяется и в проводниках, и в диэлектриках, но обычно доминирует тепловыделение в проводниках. Если сам проводник можно охлаждать воздухом или диэлектрическим жидким теплоносителем – хорошо. Но чаще всего проводник электроизолирован, и тепло надо передать через электроизоляцию. Поэтому бывают случаи, когда именно теплопроводность диэлектрика влияет на его выбор. А иногда и почти диктует – в электронной технике применяются керамики из оксида бериллия BeO или алмаза C именно за их высокую теплопроводность. У BeO она примерно в 7 раз выше, чем у MgO и Al_2O_3 , и примерно такая же, как у меди Cu . Однако у алмаза – рекордсмена – еще вчетверо больше. Поскольку среди механизмов пробоя есть и связанный с локальным разогревом, высокая теплопроводность должна увеличивать электропрочность. Но это влияние «спрятано» в данных об электропрочности. Электрики свои провода алмазом пока не покрывают, и оксидом бериллия тоже – это технологически сложно, да и дорого. А вот в вакуумной электронике эти покрытия используют. Еще раз мы вспомним об этом ниже, в разделе о полупроводниках.

ПОЛЕ, КРОМЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО

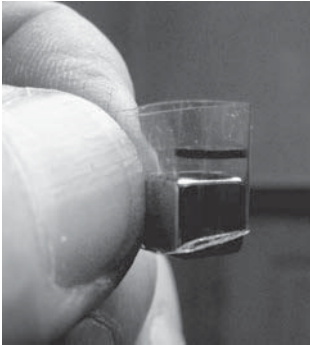
Пара- и диа-

Кроме электрического поля существуют (в школе) еще магнитное и гравитационное. Примечание: так в школе; на самом деле – т.е. в остальной Вселенной – все сложнее. Но это можно сказать обо всем – и о физике, и о химии, и о математике... и о литературе, и о языке... а уж об истории с географией... И тут же добавить: и интереснее!

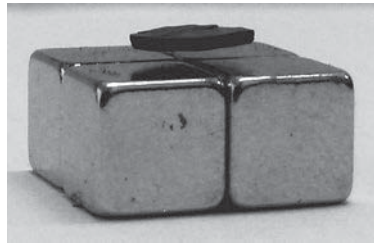
О материалах с рекордными параметрами по части гравитационного поля мы в этой книге говорить не будем, а о магнитных параметрах – сейчас. Прежде всего, магнитное и электрическое поля изучаются в школе так: электрическое, причем постоянное, не зависящее от времени; постоянное магнитное; электромагнитное, когда существуют оба поля, причем определенным образом связанные. Иногда эту связь объясняют тем, что переменное электрическое поле порождает магнитное, а переменное магнитное порождает электрическое. Само это утверждение правильно, но это не объяснение – линейно нарастающее со временем поле (любое из двух) порождает постоянное другое – и только. Поэтому электромагнитное поле – это нечто более сложное. И интересное – я же вас предупреждал. Тут надо заметить, что все пространство, которое мы видим, наполнено и электромагнитным полем, и магнитным, и электрическим. Электромагнитное – это свет, магнитное – это компас и, вроде бы, навигация птиц, а электрическое – поле над поверхностью Земли, в атмосфере. А есть у некоторых дома, на кухне, такое место, где не просто все три, а с такой мощностью, что еду готовят.

Однако раз есть поле, то оно на кого-то действует, и действие это зависит от параметров вещества. Для гравитационного поля таким параметром является плотность (или удельный вес), для электрического поля – ϵ , для электромагнитного – ϵ и $\text{tg } \delta$ (позже мы это обсудим подробнее), а для магнитного – магнитная проницаемость (восприимчивость) μ и еще кое-то, но сначала обсудим μ . Эта величина входит и в формулу для поля, создаваемого током (закон Био–Савара–Лапласа), и в формулу для взаимодействия токов. Ровно так же, как диэлектрическая проницаемость ϵ входит в формулу для поля, созда-

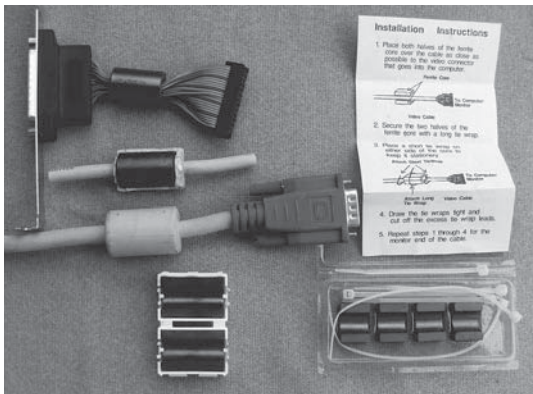
ваемого зарядом, и в формулу для взаимодействия зарядов (закон Кулона). Но в отличие от ϵ , которая всегда больше единицы, μ может быть немного меньше единицы, немного больше единицы или очень большим. Вещества, у которых магнитная проницаемость немного меньше единицы, называются диамагнетиками, у которых немного больше – парамагнетиками. Отличия от единицы важны для понимания «как это все устроено», но они малы и техни-



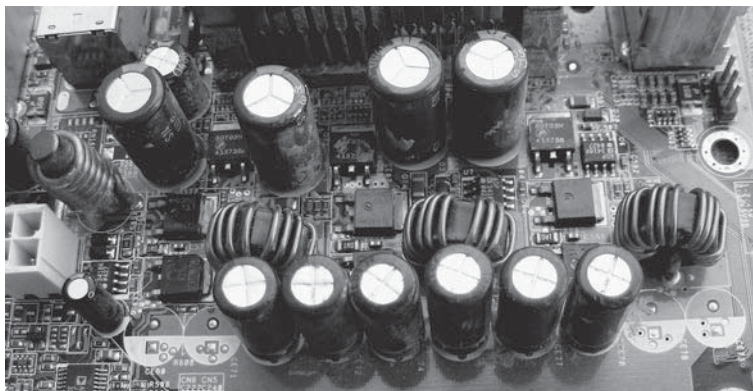
Пластина монокристаллического углерода парит в магнитном поле одиночного магнита, равновесие неустойчиво по горизонтали, пластинка упирается в прозрачное ограждение



Пластина монокристаллического углерода парит в магнитном поле четырех магнитов, равновесие устойчиво



Использование высокой магнитной проницаемости: ферромагнитная втулка, надетая на провод, увеличивает индуктивность и подавляет высокочастотные помехи



Использование высокой магнитной проницаемости: индуктивности на ферритовых колечках (в середине) и стержне (слева) на материнской плате

ческого применения не имеют. Рекордсмены по этому параметру общеизвестны: это диамагнетики С (углерод; 1-е место), Вi (висмут) и Sb (сурьма), причем все три имеют бóльшую магнитную проницаемость вдоль одной из их кристаллографических плоскостей, меньшую вдоль других и промежуточное значение для поликристалла. Поскольку диамагнетики отталкиваются магнитным полем, а углерод легче Вi и Sb, то пластинка из монокристаллического С (углерода) может парить в сравнительно небольших полях обычных магнитиков на основе NdВ. Что касается парамагнетиков, то рекордсмены – Pd (палладий; 1-е место), Рu (плутоний) и U (уран). Если рассматривать не только обычные температуры, то, добравшись до 77 К и превратив кислород в жидкость, мы получим парамагнетик с проницаемостью, большей, чем у Pd, примерно в 50 раз. Но даже этот суперпарамагнетик изменяет магнитное поле лишь на 0,03 %.

Элемент, вещество, материал

Если взять толстый трехтомный справочник по материалам, охватывающий все материалы, для которых важны именно электрические свойства, то окажется, что диэлектрическим материалам отведено два тома, а всем остальным, в том числе проводникам и магнитным материалам, отведена всего половина тома (про вторую половину третьего тома мы поведаем чуть ниже). Можно ли утверждать, что проводников и магнитных материалов вшестеро меньше, чем изоляторов? Для того чтобы хоть что-то разумное сказать по этому поводу, надо дать

определение материала. Причем не просто «набор слов ни о чем», а конструктивное определение, т.е. такое, которое можно применить для «процедуры определения». Другими словами, когда нам принесут кусок чего-то серо-буро-малинового в крапинку или покажут нечто еле различимое в могучий супермикроскоп, мы сможем сказать: о, это новый материал! И окружающие кивнут и представят себе нас, читающих Нобелевскую лекцию.

Понятие «элемент» определено довольно четко, хотя и здесь есть некоторая шероховатость – какое время должен существовать атом, чтобы мы сказали, что новый элемент создан? Самые короткоживущие изотопы последних открытых элементов существуют 7–14 мс, самые долгоживущие 60–160 мс, и некоторые из них зафиксированы в количестве 1 (один) атом. А если следующий элемент будет иметь самый долгоживущий изотоп с временем жизни 3 мс? Или 1 мс? Конечно, вопрос о том, открыто или нет, малоосмыслен, это важно только журналистам и потребителям телевизора, а страсти вокруг вопроса «кем открыт» – вообще признак психического заболевания. Важно, как это сделано и что можно нового понять и, следовательно, сделать завтра.

Что такое «вещество», тоже определено не вполне точно. Начнем с того, что химики говорят «индивидуальное вещество». Это такое, у которого все молекулы одинаковые. Хотя они могут слегка различаться – например, один и тот же элемент может входить в них разными изотопами. В воде есть вода с кислородом-16 и с кислородом-17, но химик удивится, если ему сказать, что идеально чистая аш-два-о – это смесь нескольких веществ. Он вас поймет, но удивится. А вот аш-два-о и дэ-два-о, обычную воду и тяжелую, H_2O и D_2O – он охотно признает за два вещества. Химические свойства? Так есть много реакций, в которых «одинаковые» молекулы с разными изотопами ведут себя по-разному. А еще «одинаковые» молекулы могут иметь разную пространственную структуру и еще кое-какие разные свойства. Например, ортоводород и параводород – обычно пишут, что они имеют разные физические свойства. Но раз они имеют разные, например, температуры кипения, значит, при некоторой температуре какие-то химические реакции будут идти с разной скоростью.

Ладно, «не будем о страшном на ночь», как говорит мой приятель Л.Х. Индивидуальных веществ известно более шести миллионов (из них более ста тысяч – неорганика), есть их список, непрерывно растущий. Что такое смеси веществ – вроде бы понятно. А что такое разные смеси? Каковы должны быть

различия? Смеси A и B в отношениях 1:1 и 1:2 – разные? Да, конечно. А 1:1 и 1:1,1? Тоже разные, но менее? А 1:1 и 1:1,01?.. Ответ явно зависит от порога различения. Физик скажет: от различия свойств. Метролог добавит: от возможности измерить содержание или хоть какое-то свойство. Инженер скажет: от возможности применения, от того, повлекла ли эта разница такое различие в свойствах, которое я, инженер, технолог или конструктор, должен учесть или смогу применить.

Но теперь можно задать вопрос – почему история электрофизики, электротехники, энергетики сложилась так, что разнообразие изоляционных материалов оказалось больше, чем проводников? Ответ на этот вопрос прост и «химичен» – потому что органических веществ больше, чем неорганических! Но за спиной этого вопроса стоит и второй: а почему органические вещества по большей части диэлектрики, а не проводники, а если проводники, то очень плохие?

Физика вся состоит из вопросов, стоящих за спиной вопросов. И если это вас увлекает сильнее, чем напрягает, то физика – это ваше. А если нет – то нет.

А дальше – больше. Проводники имеют сопротивление, при протекании тока они греются, в качестве проводникового материала людям досталась медь, а в качестве технологически удобного изолятора (по крайней мере поначалу) – органика. Из нее можно делать и компактные детали, и ткани для изоляции обмоток, и лаки для изоляции проводов, а из керамики... тоже, в общем, можно – но сложнее. Органические изоляторы менее термостойки, нежели медь, а слюды и асбеста на всех не напасешься (и, опять же, проблемы с технологией). Поэтому усилия материаловедов и физиков, работающих в этой области, многие десятилетия были направлены на разработку новых диэлектриков, и поэтому в электротехнических справочниках они занимают больше места.

А будь изначально у человечества сверхпроводники, провода и электрооборудование не грелись, то и вся эта область выглядела бы иначе. И еще есть группа материалов, без которых электротехника, энергетика и в значительной мере физика выглядели бы совершенно иначе. Это – ферромагнетики.

Ферромагнетики и зачем они

В самом простом понимании ферромагнетики – это высокая магнитная проницаемость μ . Для чего она нужна? Смотрим в формулы учебника и немедленно видим два ответа. Проницаемость входит в формулы, связывающие ток и индук-

цию созданного им поля, а значит, в силу взаимодействия токов и в индуцированную при перемещении контура или изменении поля ЭДС. Иными словами, все, что движется (и электродвигатели, и генераторы), все требует μ , и побольше, побольше, побольше! Но это не все: она входит в формулы для индуктивности, а значит – в электротехнику (трансформаторы) и во всю электронику и радиотехнику, и чем более миниатюрную аппаратуру мы хотим создавать, тем большие μ нам нужны, чтобы получить нужные индуктивности. Так что без ферромагнетиков вся электротехника, радиотехника и электроника выглядели бы иначе. Это самый примитивный взгляд. Теперь присмотримся к μ подробнее.

Прежде всего – поведение ферромагнетиков принято в первую очередь описывать зависимостью индукции B от напряженности H , которую вы знаете под именем «петля гистерезиса». Впервые получивший и изучивший эту кривую Гистерезис жил в 11 веке... шутка, шутка! Слово «гистерезис» происходит от греческого *hysteresis* – отставание, запаздывание. На самом деле это распространенные неточности – называть отставанием то, что вообще не связано со временем, или путать в речи зависимость от пространства и времени (т.е. вместо «однородный» или хотя бы «постоянный по пространству» говорить «постоянный»). Для энергетиков важны не собственно значения μ , а значения намагниченности насыщения, т.е. максимальные значения B – для электрических машин и трансформаторов, значения остаточной намагниченности, т.е. максимального $B(H=0)$ – для постоянных магнитов и устройств магнитной памяти и коэрцитивной силы, т.е. максимального $H(B=0)$ – опять же для магнитной памяти. Поскольку она реализована посредством намагничивания участков покрытия на жестком диске, то сигнал при считывании информации будет тем больше, чем больше эта величина, а чем больше коэрцитивная сила, тем меньше будет подвержена информация помехам, но и тем труднее будет ее стереть.

Заметим, что петлей гистерезиса описывают и поведение сегнетоэлектриков, но там это делается значительно реже. Такова роль традиции в физике и технике, причем в данном случае традиция правильно отражает удобство описания и применения. Бывают традиции чисто случайные (например, указание полярности выводов источников ЭДС, из-за которого обижаются электроны – почему это ток им навстречу?). Жизнь состоит из огромного количества традиций, и многие из них случайны, а среди случайных, как и положено по теории вероятностей, половина – дурачки. Физик должен это видеть и понимать.

Вернемся в мир ферромагнетизма, не менее загадочный, нежели остальная жизнь с ее традициями. И прежде всего вспомним про температуру Кюри, «точку Кюри» (названа по имени Пьера Кюри, соавтора открытия пьезоэффекта и исследователя радиоактивности, нобелевского лауреата). При этой температуре ферромагнетик перестает быть ферромагнетиком, превращаясь в парамагнетик (ферромагнетизм связан с одинаковой ориентацией магнитных моментов атомов, нагрев ее нарушает). Значение точки Кюри важно по двум причинам – во-первых, на планете, где мы живем, может быть и теплее, а во-вторых, выделение тепла в нашем устройстве может поднять температуру до этого значения на любой планете. Нам повезло: хоть рекордсмен по точке Кюри – Co (кобальт), 1130 °C, но и Fe (железо) тоже ничего – 770 °C. В простеньких книжках пишут, что ферромагнитных элементов три, еще Ni (никель) с точкой Кюри 358 °C. В книжках получше называют четвертый (Gd, гадолиний, 25 °C), а в нормальных – еще пять (Tb, Dy, Tm, Ho, Er – тербий, диспрозий, туллий, гольмий, эрбий с все более низкими точками Кюри – от –54 °C до –253 °C). До какого-то момента можно было считать, что они нам понадобятся только тогда, когда, покинув Землю с ее проблемами, мы станем строить электротехнику и электронику на криогенной планете с большим содержанием редкоземельных элементов. Но сейчас электротехника понемногу осваивает криогенную область, так что ситуация может стать разнообразнее. Да и в области малых размеров килограммы не нужны.

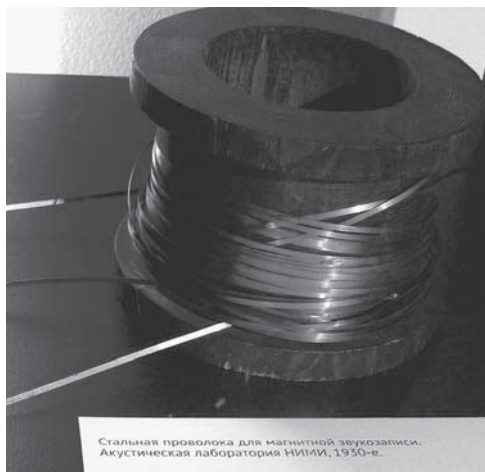
Теперь посмотрим на петлю гистерезиса. Рекордсмены по намагниченности насыщения – сплавы Fe–Co, 2,6 Тл. Рекордсмены по коэрцитивной силе – SmCo_5 , 700 кА/м, по μ – сплав Fe–6,5% Si, 3800000. Правда, эти рекордные значения получают на монокристаллах, применив для их выращивания сложную и длительную технологию. И эти рекорды встречаются вместе только на страницах книг – в реальных материалах они никогда не видят друг друга. И хоть все они относятся к ферромагнетикам, но к разным классам материалов. Так называемые магнитомягкие материалы предназначены для проведения через себя магнитного потока, и это для них важны большие максимальная индукция и проницаемость (в том числе на высоких частотах, об этом ниже). А материалы с высокой остаточной намагниченностью и большой коэрцитивной силой – это «магнитожесткие материалы» для постоянных магнитов, и важная их часть (материалы с прямоугольной петлей гисте-

резиса) применяется в цифровой технике. Именно им обязаны своим существованием жесткие диски компьютеров.

И еще один важный параметр – потери при перемагничивании, или, как говорят, потери на перемагничивание. При работе в переменном магнитном поле часть энергии поля превращается в тепловую. Происходит это и по «магнитным» причинам, и по «электрическим». Магнитные потери в основном определяются площадью петли гистерезиса и ей пропорциональны, электрические – электрической проводимостью материала. Поэтому материал с малыми потерями – это материал с узкой петлей, с малой коэрцитивной силой и с низкой проводимостью. Для электротехнических сталей, в которые добавляют кремний для увеличения сопротивления, удастся снизить потери до 1 Вт/кг (при частоте 50 Гц и максимальной индукции 1,5 Тл). С увеличением индукции потери бодро растут (при 1,7 Тл – уже 1,5 Вт/кг), растут они и с увеличением частоты.

Естественно, ради уменьшения потерь приходится отчасти жертвовать другими параметрами. Прежде всего – делать сердечники трансформаторов из тонких пластин или лент, переходить на сплавы Fe–Ni–Co и с небольшими концентрациями других элементов – пермаллои. А потом переходить на композиты, ферромагнитные металлические частицы (Fe или сплавы Fe–Al–Si), распределенные в диэлектрической матрице, или применять вообще не металлы, а почти диэлектрики – ферриты, соединения (Mn, Zn, Ni)Fe₂O₄. Причем магнитные потери пропорциональны частоте, а электрические – ее квадрату. Поэтому роль электрических потерь возрастает с частотой, и если на радиочастотах применяют и композиты, и ферриты, то в СВЧ-диапазоне (радиолокация, сотовая связь, TV) – только ферриты. Более того, потери в них характеризуют не величинами с размерностью Вт/кг, как электротехнические стали, а $\text{tg } \delta$, как диэлектрики. Так область применения и традиция управляют языком. Назвать конкретные величины трудно, потому что они сильно зависят от частоты и индукции, но получить $\text{tg } \delta$ меньше 0,01 и даже побороться за 0,001 можно, а у некоторых ферритов на основе Mg–Cr–Al и Y–Al есть шансы даже на 0,0002. В основном это хуже, чем у хороших диэлектриков, но бесплатная магнитная проницаемость бывает только в сказках. Да, чуть не забыл: можно сделать и магнитодиэлектрик с частицами феррита. Межвидовое скрещивание в технике – на каждом шагу. Это вам не биология.

Высокая коэрцитивная сила вместе с высокой остаточной



Стальная проволока для магнитной звукозаписи.
Акустическая лаборатория НИИИ, 1950-е.

Магнитная лента для записи – не слой ферромагнитного порошка на полимерной основе, как стали делать позже, а металлическая лента. Были и магнитофоны с записью на проволоку

намагниченностью – это другой не только вид, но и семейство: магнитожесткие материалы для постоянных магнитов. До недавних пор рекордсменами по остаточной намагниченности были сплавы Fe–Ni–Al–Co–Cu–Ti (их обычно называют «сплавы ЮНДК», буквы обозначают некоторые входящие в их состав элементы) с 1,4 Тл, а по коэрцитивной силе – SmCo_5 (560 кА/м). Но недавно произошел дворцовый переворот – появились так называемые «неодимовые магниты» на основе $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ с примерно такой же остаточной намагниченностью, но с в 3–4 раза большей коэрцитивной силой.

Про обратимость и тепло

Выше было указано, что пьезоэффект обратим: если к кристаллу, обладающему этим свойством, приложить электрическое поле (разность потенциалов), он изменит свой размер, а если растянуть или сжать, то на его гранях появятся заряды, возникнет разность потенциалов. Нечто подобное есть и в магнетизме: если поместить ферромагнетик в магнитное поле, то его размер изменится. У обычных ферромагнетиков этот эффект невелик – в полях, вызывающих насыщение, относительные размеры изменяются на величину порядка 10^{-5} при комнатной температуре, при низких температурах – сильнее. Но есть вещества с так называемой гигантской магнитострикцией –

например, Dy, Tb и некоторые их соединения. В поле 150 кЭ монокристаллы Tb, TbFe₂, SmFe₂ могут изменять свой размер на 0,1–0,25% при комнатной температуре и в несколько раз сильнее при охлаждении до 78 К. А вот с обратным эффектом дело обстоит сложнее. При изменении размеров, при деформации, кристалл не создает магнитное поле сам, но начинает иначе реагировать на внешнее поле. Например, Gd при всестороннем сжатии давлением 10⁹ Па уменьшает намагниченность насыщения вдвое.

Подробнее про тепловые параметры мы расскажем в другом месте, дальше. Но совсем чуть-чуть можно и здесь. Все по той же причине – раз тепло выделяется, его надо отводить. А раз оно выделяется в ферромагнетике, его должен проводить (или поглощать, если режим импульсный) этот ферромагнетик. Но именно тепловыделение существенно для работы устройств только в мощных установках низких частот, т.е. в энергетике, в электроснабжении. А там ферромагнетики – стали, у которых и теплопроводности, и теплоемкости примерно одинаковы. Какие есть, такие и есть, выбирать не приходится.

ПОЛУПРОВОДНИКИ

Ширина того, что есть не у всех

Не у всех веществ есть запрещенная зона на энергетической диаграмме: у металлов ее нет, а вот у полупроводников и диэлектриков она есть. Это область энергий, запрещенных для электронов данного полупроводника. Ширина запрещенной зоны – один из факторов, ограничивающих предельную рабочую температуру полупроводника, при которой еще возможна работа p - n -переходов. Чем запрещенная зона шире, тем выше ограниченная этим фактором рабочая температура: для Ge (германий) это 50–60 °C, для Si (кремний) – 150–170 °C, для GaAs – 250–300 °C, для SiC – 900 °C. По ширине запрещенной зоны соперниками для SiC являются GaP, GaN и AlN, а также C, т.е. алмаз. Но рабочую температуру первых трех ограничивают другие физические факторы. В алмазе трудно получить легирование, хотя в принципе это сделано – использованы P (фосфор) или S (сера) для получения алмаза n -типа и B (бор) для p -типа. Но вот p - n -переход, кажется, то ли еще не получен, то ли еле-еле получен. И поэтому до приборов еще далеко – «долг путь до Типперери». Хотя, надо признаться, цель ну очень соблазнительна.

Кстати – а что такое «еле-еле получен»? Разные бывают «получено». Вот первое – один человек на одном образце один раз заметил нечто странное. Важный момент, между прочим, – большинство проходит мимо, а потом огорчается, что Нобелевка досталась другому. Ну да, надо было срочно очередной отчет писать, тут не до наблюдений странного! Вот второе «получено» – один человек на одном образце один раз заметил, почесал затылок и... повторил. Развилка – повторилось или не повторилось. Предположим, повторилось. Берем другой образец. Развилка. Зовем приятеля и показываем. Да, говорит он, действительно – A зависит от B . А ты пробовал C ? Развилка. Развилка. Развилка... И все это – разные «получено». Вплоть до прайслиста на сайте фирмы X , которая поставляет приборы Y по технологии Z , предложенной когда-то тем самым N , который получил тот самый первый «получил» и десять раз повернул на развилках в правильную сторону.

Ширина запрещенной зоны влияет на три важных параметра диодов – на падение напряжения при прямом токе, на ток при обратном напряжении и на пробивное обратное напряжение. Чем ширина этой зоны больше, тем прямое напряжение больше (это плохо), обратный ток меньше и пробивное напряжение больше (а вот это хорошо). Прямое падение и пробивное напряжение интересуют в основном электриков, а обратный ток важен в радиоэлектронике, и то нечасто. Поэтому, казалось бы, электрики должны предпочитать Ge, если их волнует КПД, и Si, если важнее пробивное напряжение. Реально они предпочитают Si и даже подумывают о SiC (в частности потому, что важны и другие параметры этих материалов). Что не исключает, однако... и так далее. Одна из причин, по которой стоит знать физику, – возможность в конкретной ситуации найти конкретно лучшее решение.

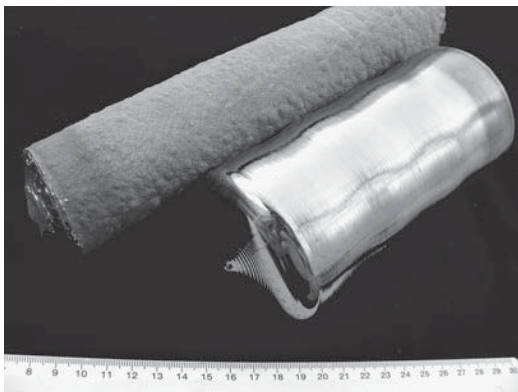
У технологов, однако, поводов для радости меньше – ширина запрещенной зоны хорошо коррелирует с температурой плавления. Обе эти величины возрастают с ростом энергии связи атомов в решетке, поэтому у широкозонных полупроводников высокие температуры плавления, а значит – трудно выращивать чистые и совершенные монокристаллы. А именно от чистоты и совершенства зависит пробивное напряжение. А еще оно зависит от нашего старого знакомого – поверхностного пробоя. Того самого, который был так важен для диэлектриков.

Для светодиодов ширина запрещенной зоны определяет цвет их света – чем запрещенная зона шире, тем большую энергию может отдать кванту электрон и тем, стало быть, короче будет длина волны и выше частота. Но материалы с широкой запрещенной зоной сложнее технологически, поэтому люди сначала освоили инфракрасный и красный конец спектра и уж потом отправились к синему концу. Хотя и тут не обошлось без сюрпризов – например, синие светодиоды на SiC были созданы довольно давно.

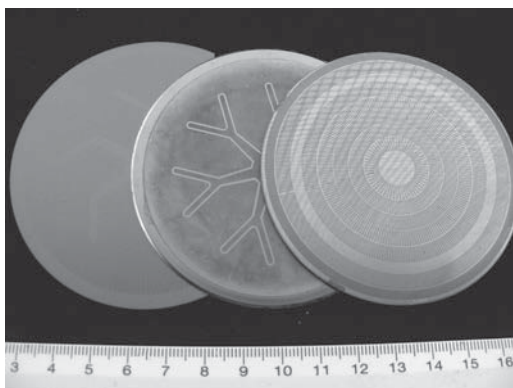
Для некоторых оптических применений нужно нечто прямо противоположное – малая ширина запрещенной зоны. А именно, приемник излучения чувствителен к тем более длинноволновому излучению, чем меньше ширина запрещенной зоны, поскольку тем меньшая энергия будет требоваться от кванта, чтобы он справился с задачей переправления электрона через запрещенную зону – в зону проводимости. Когда-то считалось, что рекордсмен тут InSb с шириной 0,18 эВ, но позже научились управлять этим параметром, изменяя состав и сплавливая в разных соотношениях CdTe и HgTe. Так удалось получить любую

ширину (вплоть до нулевой), но тут начинает мешать тепловой переборс электронов через запрещенную зону в зону проводимости.

В начале этого раздела было сказано, что у диэлектриков тоже есть запрещенная зона. Она шире, чем у полупроводников, и немедленно возникают два вопроса – чем же отличаются диэлектрики от полупроводников и разве не диэлектрики с их широкой запрещенной зоной были бы замечательными полупроводниками, работоспособными при весьма высоких температурах? Различие между диэлектриками и полупроводниками действительно несколько условно: иногда пишут, что вещества с шириной запрещенной зоны менее 6 эВ – полупроводники, а

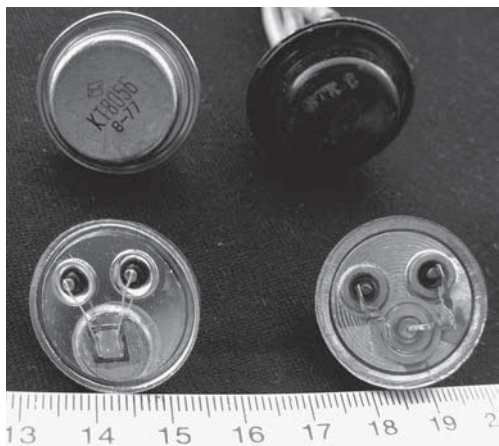


Слитки кремния

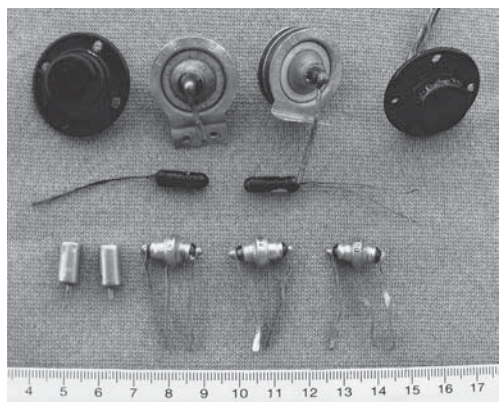


Кремниевые пластины: промежуточные фазы изготовления мощных полупроводниковых приборов – тиристоров

более – диэлектрики. Но дело не в конкретной величине, а в использовании. Когда в каком-то приборе используют полупроводник, то через него протекает ток, и именно этот ток нужен для работы прибора. Когда используют диэлектрик, ток тоже протекает, но он не нужен, а часто и вреден. Идеальный диэлектрик – это материал с бесконечным сопротивлением при любых напряжениях, т.е. заодно и с бесконечной электропрочностью. Для полупроводника это совершенно не так, более того, при прочих равных условиях часто хорошо бы, чтобы сопротивление



Мощные транзисторы: слева – кремниевый, справа – германиевый



Первые советские транзисторы – точечные С-1, С-2 и плоскостные П-1, П-2, П-3, П-4, П-5

было поменьше – для уменьшения нагрева протекающим током. Что же до увеличения термостойкости, то это, конечно, хорошо, но нет смысла делать термостойкость полупроводника выше термостойкости остальных материалов прибора, металлов и диэлектриков.

Выше упоминалась теплопроводность как параметр, важный для напряжения пробоя. Причина – один из механизмов пробоя, «электротепловая неустойчивость», связан именно с локальным разогревом, с плохим теплоотводом. Вообще говоря, теплопроводность важна всегда, когда по прибору, имеющему сопротивление, протекает ток и выделяющееся тепло надо отводить – иначе сами понимаете, что произойдет. Среди полупроводников наибольшая теплопроводность у GeTe и SnTe – 340 и 380 Вт/(м·К), у SiC вдоль одного из кристаллографических направлений она 360–380 Вт/(м·К) (рекордное значение – 490 Вт/(м·К)). Но GeTe и SnTe теплопроводность не очень нужна, так как в силовых приборах, работающих с большими токами, эти материалы не применяют. А вот SiC она в самый раз, причем тут он обгоняет и Si (109 Вт/(м·К)), и Ge (58 Вт/(м·К)).

«Подвижный в подвижном»

Наверное, вы читали в детстве книгу, в которой приведен этот лозунг. Несколько поколений детей во многих странах были обязаны автору этой и многих других книг развитием своей фантазии и мышления. Полупроводниковые приборы обязаны подвижности носителей заряда своей возможностью работы на высоких частотах. А продвижение в область все более высоких частот – одно из двух главных стремлений всей электроники (второе – в область больших мощностей). Подвижность – это способность переносчика заряда (например, электрона) реагировать на изменение электрического поля, ускоряться этим полем. Разумеется, в вакууме эта способность у электронов одинакова, но в среде это не так. Способность электрона реагировать на поле зависит от взаимодействия электрона с атомами и от температуры. Поскольку этого понятия нет в учебнике, дадим определение. Подвижность – это отношение средней дрейфовой скорости к напряженности поля, которое вызвало этот дрейф. Соответственно, плотность тока равна произведению заряда носителей, их концентрации, подвижности и напряженности поля.

До какого-то момента людей вполне устраивали Ge с подвижностью $0,39 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ и Si с подвижностью $0,14 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, но со

временем люди озаботились поиском полупроводников с большей подвижностью. Рекордсменами оказались соединения группы $A^{III}B^V - \text{InSb}$ с подвижностью $10 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ и InAs ($3 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$). Однако «нос вытащил – хвост увяз»: ширина запрещенной зоны у них столь мала (0,17 эВ и 0,35 эВ соответственно), что уже при комнатной температуре область применимости у них сильно ограничена. И в результате «практическим рекордсменом», т.е. применяемым массово и наиболее перспективно, оказался GaAs с подвижностью $1 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ и с приличной шириной запрещенной зоны (1,43 эВ). Правда, в графене подвижность может достигать $20 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, но только если он свободный, без подложки, что делает его применение проблематичным. Кстати, обычно упоминающиеся данные о его фантастических теплопроводности и допустимой плотности тока приводятся некорректно – для двумерных материалов данные, приведенные в такой форме, нельзя сравнивать с данными для классических материалов.

А что это за странное обозначение – $A^{III}B^V$? Римские цифры – указания на то, что под «А» понимается элемент третьей группы, а под «В» – наверное, вы уже догадались? В самом начале мы обсудили классификацию параметров и по ходу дела еще несколько раз чуть-чуть касались вопроса о классификации материалов, даже указав на ее размытость – где, например, кончается газ и начинается вакуум? Классификация материалов в значительной мере вещь традиционная и возникшая в ходе развития области. Главными факторами являются применение, параметры, история открытия и освоения. Например, проводниковые материалы обычно делят на материалы собственно для передачи энергии, т.е. металлы с низким сопротивлением (медь, алюминий), «сплавы сопротивления» (сплавы с высоким сопротивлением, применяющиеся, в частности, для нагревателей), материалы для контактов и так далее – по областям применения. Для диэлектриков основное деление – по агрегатному состоянию (вакуум, газ, жидкость, твердое), оно в значительной мере определяет применение. Обычно следующее деление – по нагревостойкости; оно также сильно влияет на область применения. Магнитные материалы стали классифицировать по составу (сплавы, композиты, ферриты), но сама разработка новых материалов была вызвана потребностями применения, и это повлияло на классификацию. А вот судьба полупроводников сложилась немного иначе. На их классификацию повлияли прежде всего исторические причины и Периодический закон.

Полупроводниковые свойства разных веществ становились известны в разное время, причем в зависимости от того, какое свойство рассматривать, временная отметка будет меняться. В общем можно сказать, что люди осознали и стали использовать полупроводниковые свойства сначала PbS и Se (селен) – с 70-х годов позапрошлого века («гален» как детектор и селеновые выпрямители). Позже в практику вошел Cu_2O – с 20-х годов прошлого века (купроксные выпрямители). И наконец, Ge и Si, 40-е годы прошлого века (диоды и транзисторы). Но «как группу» первыми люди стали воспринимать элементарные полупроводники (Ge, Si, Se и Te (теллур)) с очень узкой областью применения. А дальше классификация стала опираться на Периодический закон: соединения стали обозначать буквами латинского алфавита A и B с верхними индексами – римскими цифрами, номерами групп. Поэтому SiC – это единственный полупроводник группы $A^{IV}B^{IV}$. Упомянутая выше группа $A^{III}B^V$ – это соединения, где «A» – это B (бор), Al, Ga, In, а «B» – это N, P, As, Sb. Причем «B» может состоять не из одного элемента, а более – например, есть GaAs и GaP, но существует и применяется также и $\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$, где x – от 0 до 1. По «A» такая ситуация тоже возможна: например, $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$. А еще есть группы $A^{II}B^{VI}$ и $A^{IV}B^{VI}$. В первой «A» – это Zn, Cd, Hg, а «B» – S, Se, Te. Во второй «A» – это Si, Ge, Sn, Pb. Кстати, в группе $A^{II}B^{VI}$ есть HgSe и HgTe с такими маленькими запрещенными зонами, что их иногда называют уже не полупроводниками, а полуметаллами. Но через сколько-то миллионов лет, когда Солнце погаснет, станет холодно и вы будете создавать на Земле криогенную полупроводниковую технику, они вполне могут вам пригодиться как классические полупроводники. Все дело в рабочей температуре.

И в заключение этой главы отметим вот что. Здесь рассказано только о самых основных параметрах. На самом деле параметров много, а связей между условиями эксплуатации и параметрами, естественно, в несколько раз больше. Например, если мы знаем 20 параметров (а в хорошем справочнике указывают и больше) и 5 условий (а вы легко назовете и еще), то связей будет уже не менее 100. И исследованы далеко не все – даже для традиционных материалов, а ведь появляются новые... И на каждой связи может быть построен прибор для измерения условий. А если мы не делаем специальный прибор для измерений, то все равно связь надо учитывать – она может влиять на измерения параметров материалов и на работу всех приборов, в которых эти материалы использованы.

ВЫЙДЕМ, ПОВОРОРИМ?..

Ток наружу

Когда в проводнике идет ток, он идет по объему. В длинном однородном проводнике постоянного сечения иногда он распределяется по сечению равномерно, иногда концентрируется у оси (в плазме или в полупроводниках), иногда у поверхности (на высоких частотах). С проводником коротким или сложной формы – особая история: когда вода вливается в бассейн из трубы, она же не начинает сразу течь по всему его сечению с одинаковой скоростью? В диэлектрике ток идет, распределяясь по объему, но часто – в некотором приповерхностном слое (это называется поверхностной проводимостью). Когда ситуация приближается к пробоя или когда он уже происходит, ток концентрируется в канале пробоя, но проводник в такой момент уж никак нельзя назвать однородным. Однако это не все – есть еще поверхностный пробой. Тут ситуация сложнее – ток идет в некоем приповерхностном слое, но не внутри, а снаружи диэлектрика. И наконец, вот самая «снаружная» ситуация – вакуумный пробой: автоэлектронный ток летит через вакуум. А внутри проводника, внутри электрода ток идет в этом случае перпендикулярно его поверхности.

Ничего особенно странного в этом нет – это происходит не только при автоэлектронной эмиссии, но и еще в нескольких случаях. Например, при эмиссии термоэлектронной, когда электрон пользуется для выхода энергией, которую имеет потому, что материал нагрет. При эмиссии фотоэлектронной, когда он получает энергию от квантов электромагнитного излучения, фотонов. При эмиссии вторичноэлектронной, когда он получает энергию от падающих на поверхность электронов. При эмиссии ион-электронной, когда электрон получает энергию от падающих на поверхность ионов. И еще в некоторых совсем уж экзотических вариантах, до которых мы тоже доберемся. Все эти виды эмиссии используются и для изучения материалов, и во многих электронных приборах. Причем условия применения весьма сильно влияют и на те самые рекордные параметры эмитирующего электроны материала, и на возможность их использования.

При выходе электрона из материала в вакуум он должен расплатиться – отдать энергию, называемую работой выхода. Все виды эмиссии можно разделить на две группы – те, при которых работа выхода принципиально важна, и те, при которых она существенно менее важна. Вторая ситуация возникает, когда электрон в металле получает такую большую энергию, что «таможенные расходы» влияют на него слабо. Первая ситуация – это, прежде всего, термо- и фотоэмиссия. И тут очередной раз выясняется, что мало получить рекордный параметр – надо его использовать в реальных условиях, а это-то и трудно. Смотрите: электрики давно мечтали о материалах с высокой проводимостью, и физики сделали им рекорд – сверхпроводимость. Но сколько прошло лет, пока ее начали активно использовать в энергетике? Причем пока даже не «массово», а лишь «активно».

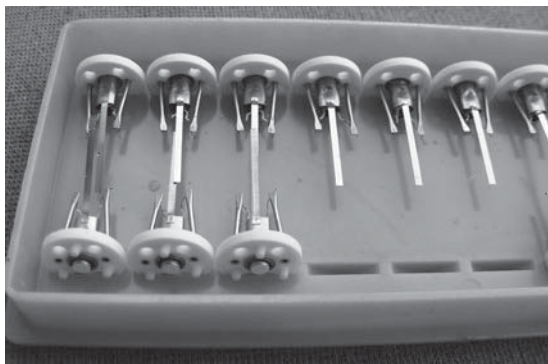
Термоэмиссия

С ней ситуация такова: чтобы получить технически интересные токи, материал даже с относительно низкой работой выхода надо нагревать примерно до 700–900 °С, а с высокой – до 1600–2000 °С. Такой нагрев – это уже проблема, но важнее, что при этих температурах скорости испарения материалов таковы, что срок службы получается меньше, чем хотелось бы. Человеку обычно хочется срока службы в 10 лет (или 100000 часов) и более, до так называемого морального устаревания и замены техники, а приходится иметь дело с величинами в 10, а иногда и в 100 раз меньшими. Само равновесие между параметрами устанавливается в ходе эволюции, и если бы максимальные сроки службы оказались меньше еще в 100 раз, то развитие этой части техники пошло бы по другому пути (и можно порассуждать, по какому).

К сожалению, материалы с низкой работой выхода, которые надо меньше греть, испаряются быстрее. Причем настолько, что при температурах, обеспечивающих одинаковую эмиссию, скорость испарения и срок службы разных катодов оказываются тоже сравнимыми. Поэтому выбор между материалами приходится делать на основании каких-то других параметров. Термоэлектронные катоды работают чаще всего в вакуумных приборах и существенно реже – в газоразрядных (например, в люминесцентных лампах). Абсолютного вакуума не бывает, а то, что в нем остается, «остаточные газы», может влиять на работу катода. Это влияние сильнее для катодов с низкой работой выхода и при менее высоких температурах, поэтому в технике термокатодов сложилось несколько направлений.

Одно (направление сроков службы в 10 лет и более) – это спутниковая и вообще космическая техника, а также легендарные лампы для усилителей сигнала, встроенных в трансатлантические кабели связи (они работали десятки лет). В этих случаях лезут из кожи, получают вакуум 10^{-10} торр, т.е. 10^{-13} атм, а иногда и более высокий. Летит космический аппарат и удивляется – вакуум внутри него намного выше, чем вокруг. В таких лампах применяют «оксидные катоды» – на основе тройного оксида (Ba, Sr, Ca)O – или же катоды на основе композитов (пористых матриц из тугоплавких металлов W, Re, Os, пропитанных солями опять же соединений Ba); эмитируют в них микрокристаллики BaO, вырастающие на поверхности катода. Работа выхода оксидного катода – около 1,6 эВ, катода второго типа (его называют «импрегнированным», «пропитанным»), немного больше – около 1,9 эВ (на самом деле поверхность неоднородна, и правильнее было бы говорить о функции распределения поверхности по работе выхода).

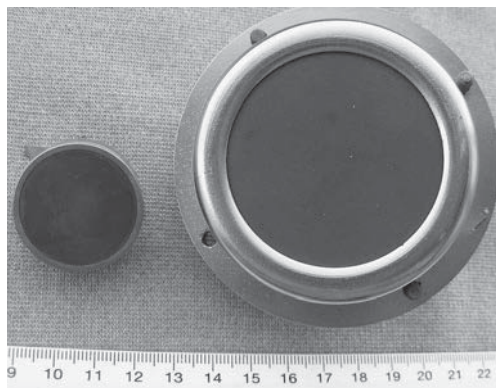
Второе, прямо противоположное направление, это ситуации, когда высокий вакуум получить невозможно. Например, в случае вакуумной печи для плавления тугоплавких металлов – о каком вакууме, о каком сроке службы может идти речь, если бурлит металл и летят брызги (и не воды, а, например, тантала)? В этих и подобных случаях применяют катоды из W – с работой выхода 4,5 эВ, неприхотливые, но требующие для работы высоких температур и работающие недолго. В чуть более спокойных условиях (например, в некоторых ускорителях и в электронных микроскопах) – катоды из LaB₆ с работой выхода 2,9 эВ. А в промежуточной ситуации, когда и вакуумные условия «промежуточные», и срок службы большой хоть и не помешает,



Оксидные катоды (Ba, Sr, Ca)O кинескопов

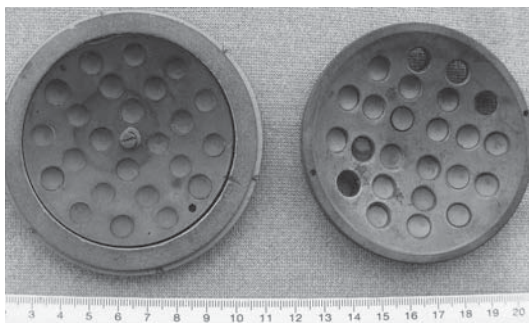


Импрегнированный катод, губка W (вольфрама), пропитанная солями соединений Ba (бария)

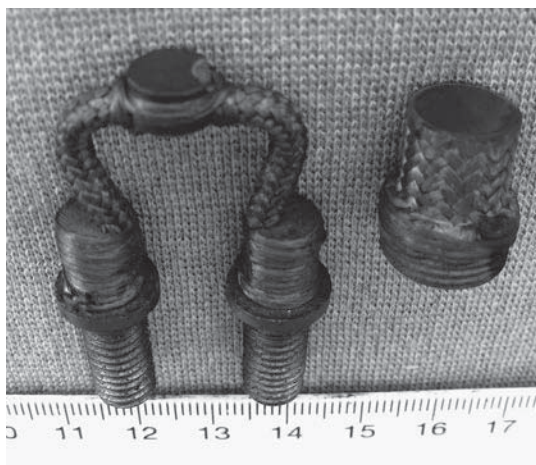


Мощные термоэлектронные катоды из гексаборида лантана, LaB_6

но и не на спутник лампы ставим, вопрос решается в значительной мере исходя из традиции и экономических соображений. Обычно ставят оксидный или импрегнированный катод, которому предстоит работать при температурах, при которых он хоть и быстрее испаряется, но зато сможет компенсировать вредные последствия взаимодействия с остаточными газами.



Термоэлектронный катод мощного многолучевого электронно-вакуумного прибора; kern — углерод, вставки — гексаборид лантана, LaB_6



Термоэлектронные прямонакальные катоды для мощного электронно-вакуумного прибора; kern — углерод (пиролизованная углеродная ткань), вставки — гексаборид лантана, LaB_6 ; ; правый — с коаксиальным нагревателем для компенсации магнитного поля

На эту тему написаны книги — и не одна. И можно написать еще, причем не методом копипаста, а вполне содержательно. Впрочем, это можно сказать обо всей физике и обо всей технике. Были бы заинтересованные и готовые работать читатели. Потому что чтение — это работа; я надеюсь, что интересная.

А на термоэлектронной эмиссии работали все электронные лампы, которые в течение трех четвертей века были всей

электроникой, всей радиотехникой и всем телевидением. В последнюю четверть прошлого века они начали понемногу уступать область мощностей и не слишком высоких частот полупроводниковым приборам. Но и по сей день именно электронные лампы – это космическая связь, радиолокация, телевидение, ускорительная техника. И так будет, скорее всего, всегда – потому, что человек продвигается в область больших частот и мощностей. Правда, в самих электронных лампах начала понемногу – пока очень понемногу – просматриваться возможность использования не термоэлектронной эмиссии, а автоэлектронной. Но – и это вполне характерная для техники ситуация – нельзя просто перейти с одного вида эмиссии на другой. Требуется сильно изменить то, где она используется, – сам электронный прибор, лампу. Скорее, даже не изменить, а разработать заново.

Эмиссия фото-, авто- и горячих без нагрева

При фотоэмиссии электрон получает энергию от кванта, почти всегда прилетевшего снаружи. Хотя он не побрезгует и квантом, родившимся внутри материала (например, в результате какой-то из люминесценций). Фотокатоды не приходится нагревать, следовательно, отпадают проблемы с испарением. Но жизнь не становится проще, потому что эти катоды не менее, а иногда и более чувствительны к остаточному вакууму. Низкая работа выхода обеспечивается монослоем – слоем толщиной в 1 (один) атом на поверхности. Причем слой этот состоит из атомов Cs, который – не повезло, так не повезло! – более чем охотно взаимодействует с многими остаточными газами. Собственно, у некоторых термокатодов ситуация такая же, но там слой Ва пополняется диффузией из глубины катода. А без нагрева какая диффузия? Одно огорчение...

В вакууме 10^{-10} торр, т.е. 10^{-13} атм, на поверхность за несколько часов падает из «вакуума» монослой молекул газа, и если все они взаимодействуют с Cs и если последний не будет пополняться, то катода не станет. На самом деле ситуация не столь чудовищна, взаимодействуют не все и пополнение идет, но все равно плохо. На материалах типа $\text{Na}_2\text{KSb-Cs-O}$ и $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{AsP-Cs-O}$ удается достигать квантового выхода около 50%, т.е. при попадании на катод кванта с вероятностью около 0,5 из катода вылетает электрон – человеческий глаз уже не рекордсмен. «Красная граница» у этого катода – 1,3 мкм (это соответствует энергии 0,9 эВ), что тоже лучше, чем у человека. Со стороны коротких волн фотокатоды дотягивают до 0,17 мкм

с квантовым выходом около 10% – это SbRbCs-катод. Причем, как и всегда, рекордные параметры не встречаются друг с другом: при одних вариантах состава и технологии получается рекордное одно, а при других вариантах – другое. Или вообще ничего рекордного – эти катоды весьма чувствительны к колебаниям состава и технологии.

Автоэмиссия, или полевая эмиссия, – это квантовый эффект, проникновение электронов сквозь потенциальный барьер на выходе из металла. Вообще-то потенциальный барьер – это ситуация, когда частица (в данном случае электрон), чтобы куда-то переместиться (в данном случае выйти из металла) «почестному», должна иметь какую-то энергию. Но электрон может покинуть металл, не имея этой энергии, может «просочиться» насквозь. Такое возможно лишь при малой толщине барьера, а толщина зависит от напряженности поля и работы выхода. Высокая напряженность поля получается на остриях или лезвиях, поэтому применимость материала в качестве термоэлектронного эмиттера определяется не работой выхода, а возможностью изготовления из него острия или лезвия и – как это ни обидно – способностью работать в не слишком хорошем вакууме. Потому что электронный пучок ионизует оставшиеся в вакууме атомы, и, ускоренные полем, они бомбардируют катод. В итоге применяются металлы (за их технологичность) и (с недавних пор – весьма активно) углеродные волокна и нанотрубки, «естественные острия». При том, что работа выхода у них у всех большая. А из-за ионной бомбардировки не представляется эффективным понижение работы выхода какими-либо монослойными покрытиями.

Ну, а «горячие без нагрева» – это электроны, которым передало часть своей энергии электрическое поле в проводнике. Иными словами, поле разгоняет электроны, а поднабравшись энергии, они и пытаются выскочить в вакуум. Из параметров материалов тут важна, как и для фотокатодов, работа выхода. Соответственно, эти катоды не требуют нагрева, зато требуют высокий вакуум. Приборы на их основе пока в практику не вошли.

Вторично-эмиссионные катоды и одна общая проблема

Классифицировать материалы можно по структуре, по химическому составу, по значениям параметров, по области применения. Эти классификации в значительной мере пересекаются. Вторично-электронные материалы делят на чис-

тые металлы, диэлектрики, металло-оксидные системы и полупроводники. Но рассмотрение мы начнем с определения параметров. И тут оказывается, что вторично-эмиссионные катоды имеют одно радикальное отличие от остальных. Они вынуждены работать при постоянной и зачастую весьма мощной электронной бомбардировке.

Это безобразие случается и с другими катодами, но редко, а вторично-электронные катоды предназначены именно для работы в таких условиях, поэтому и выбор материала, и разбиение материалов на группы в значительной мере определяется устойчивостью при электронной бомбардировке. Наиболее мощную электронную бомбардировку выдерживают только металлы и сплавы, причем со сплавами дело обстоит плохо. Те из них, которые имеют низкую работу выхода и высокую вторичную эмиссию, добиваются этого за счет моноатомной пленки одного из компонентов на поверхности – но она разрушается бомбардировкой. Поэтому в тех приборах, где катод работает в самых тяжелых условиях, применяют только чистые металлы. В приборах, где бомбардировка не слишком сильна, применяют сплавы металлов. В ситуациях, когда условия еще полегче, в ход идут окисленные сплавы или композиты металлов и оксидов. Смысл применения таких материалов вот в чем – у оксидов высока вторичная эмиссия, а металлические частички обеспечивают подвод к ним тока. Наконец, для самых гуманных условий эксплуатации есть полупроводниковые катоды той же группы, что и эффективные фотокатоды.

Главный параметр вторично-эмиссионных катодов – коэффициент вторичной эмиссии σ , т.е. отношение количества электронов, летящих от мишени, «вторичных», к количеству упавших на мишень «первичных». Вторичные электроны – это и упруго отраженные первичные, и неупруго отраженные, и электроны, выбитые из материала мишени первичными (их еще называют «истинно вторичными»). Коэффициент вторичной эмиссии σ зависит от энергии летящих к мишени электронов E : при малой энергии они мало что могут отдать электронам самой мишени, а при большой – проникают в мишень глубоко, так что получившие энергию электроны самой мишени не могут вылететь наружу. Вторичную эмиссию упрощенно характеризуют тремя параметрами – максимальным значением σ (его обозначают σ_m), энергией первичных электронов, при которой этот σ_m достигается (E_m), и энергией первичных, в случае когда $\sigma = 1$ (обозначают эту величину E_1). Инженерный смысл величин понятен – если прибор работает за счет увеличения количества

электронов, то оно начинается при E_1 , максимально эффективно при E_m , а эффективность эта характеризуется величиной σ_m . Разумеется, для работы многих приборов важна вся зависимость $\sigma(E)$, а стало быть, она важна и для расчета приборов. Но упрощенно катоды характеризуют именно так.

Из чистых металлов применяется в основном Pt (платина). Для нее $\sigma_m = 1,85$, $E_1 = 100$ эВ, $E_m = 0,8$ кэВ. Почти такие значения вторичной эмиссии у Rh, Pd, Ir, Os, Au (рутений, родий, иридий, осмий, золото). Среди граней монокристаллов можно найти и лучшие эмиттеры (максимум у Ir: $\sigma_m = 2,1$), но по технологическим причинам применяется исключительно Pt – в случаях, когда не стоимость, а срок службы является определяющим параметром. В случаях, когда стоимость важна (например, в магнетронах для бытовых СВЧ-печей), применяется WCTh-катод (вольфрам с присадкой ThO_2 , насыщенный с поверхности углеродом). Заметим, что хотя в WCTh-катод Th вводится в виде ThO_2 , но по механизму работы этот катод является монослойным. Эмиттером является монослой Th на W_2C с $\sigma_m = 1,9$ (у чистого W $\sigma_m = 1,4$). Такой катод дешевле Pt, но срок службы его ограничен временем, в течение которого сохраняется на поверхности монослой Th, пополняющийся диффундирующим из объема катода и расходующийся на испарение и распыление. Кроме того, срок службы зависит от декарбидизации – от ухода C (углерода) путем окисления. После расходования углерода скорость испарения Th увеличивается и концентрация его на поверхности падает.

Неоднократно предпринимались попытки сделать эффективный вторично-электронный катод из сплавов металлов (WНf, WТа, WRe), но хороших эмиттеров среди них не найдено, а данных по таким катодам мало. Более подробно исследовались катоды Ni–ЩЗМ, (ЩЗМ – это щелочноземельные металлы), Pt–ЩЗМ, (Ir, Re, Os)–РЗМ, (РЗМ – это редкоземельные металлы). В группе катодов Ni–ЩЗМ достигнут $\sigma_m = 4,2$ при $E_m = 0,8$ кэВ для катода Ni–(Al, Cu, Sn)–Ва. В группе Pt–ЩЗМ достигнут $\sigma_m = 3,4$ при $E_m = 0,8$ кэВ и $E_1 = 30\text{--}50$ эВ для катодов PtВа. В группе (Ir, Re, Os)–РЗМ достигнут $\sigma_m = 2,6$ при $E_m = 0,6$ кэВ и $E_1 = 150$ эВ для катода IrLa. Возможно, что в некоторых случаях увеличение σ при введении в сплав ЩЗМ или РЗМ связано с частичным окислением активного металла: например, если ионной бомбардировкой ввести немного O (кислорода) в PtВа, то σ_m увеличится до 9,5.

Сами окислы могут использоваться при температурах, когда их проводимость достаточна для того, чтобы не происходило их

заряжения при тех токах, при которых они эксплуатируются. Потому что если поверхность катода приобретет какой-то заряд, то электрическое поле в приборе изменится и электроны станут летать не как хотел конструктор, а как-то иначе. Например, если поверхность катода приобретет отрицательный заряд, то электроны могут просто перестать до нее долетать, катод начнет их отталкивать. Поэтому в катодах, предназначенных для работы при больших плотностях тока (в магнетронах), используют ThO_2 , Y_2O_3 , Lu_2O_3 с $\sigma_m = 2,4-2,9$, $E_m = 0,7$ кэВ и $E_1 = 50$ эВ при температурах, обеспечивающих проводимость ($> 1000^\circ\text{C}$). При работе прибора окись испаряется и разрушается, поэтому стараются увеличить количество оксида, применяют слои окислов на шероховатых подложках и композиции оксид-металл. Так, для смеси W-ThO_2 (30%), например, $\sigma_m = 2,5$, $E_m = 0,8$ кэВ, $E_1 = 150$ эВ. В качестве вторично-электронных эмиттеров применяются и обычные термокатоды, тем более что во многих случаях от катодов требуются одновременно и термоэмиссия, и вторичная эмиссия (именно так часто бывает в магнетронах). Так, для $(\text{BaSrCa})\text{O}$ $\sigma_m = 4-10$, $E_m = 1-1,5$ кэВ и $E_1 = 20$ эВ, для WBa -катода $\sigma_m = 1,5-2,5$, $E_m = 0,8$ кэВ, $E_1 = 100$ эВ.

Другим способом придания проводимости оксиду является частичное восстановление. Именно такой способ применяется для изготовления микроканальных умножителей почти монополюсно, хотя известны успешные попытки изготовления их из керамик $(\text{BaSrGe})(\text{TiSn})\text{O}_3$ и $(\text{ZnTi})\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3$. Обычная же технология такова – стеклянные трубочки складываются в пучок, нагреваются, сильно вытягиваются и сплавляются между собой. Полученный стержень, пронизанный каналами, режется на шайбы и нагревается в водороде (H_2), при этом некоторые окислы, входящие в стекло, частично восстанавливаются, обеспечивая проводимость. Известно применение (или попытки применения) самых разных стекол – обычных свинцовосодержащих (Pb, Si, K, Na), стекол с добавкой Bi, стекло системы V-P-Cs, V-P-Ba-W и других. В основном полученные данные таковы: $\sigma_m = 3-4,5$, $E_m = 0,2-0,4$ кэВ, $E_1 = 15-50$ эВ.

Наконец, последний способ получить проводящий оксид, – это частично окислить металл. Понятно, почему частично: полностью окисленный станет сплошным оксидом с высоким σ_m , но с низкой проводимостью. На практике удобно использовать по меньшей мере двухкомпонентные сплавы, в которых один компонент образует оксид, эффективный вторично-электронный эмиттер, а второй не окисляется, служа и ограничителем окисле-

ния первого, и токопроводящей матрицей, в которой и находятся собственно эмиттеры – частицы оксида. В качестве этих сплавов известно применение AgMg, CuBeAl, CuAl, CuMg, CuBe, PtBe. В случае CuBeAl окисляемых компонентов два. Иногда и пассивных компонентов бывает два и более. Параметры получающихся катодов зависят от их структуры, а она – от режима окисления: давления кислорода, температуры, времени. Наилучшие эмиссионные параметры получаются при толщине оксидной пленки в десятки нанометров. В общем, характерные величины таковы: $\sigma_m = 5-15$, $E_m = 0,5-1$ кэВ и $E_1 = 20-50$ эВ. В некоторых случаях удается добраться до $\sigma_m = 30$ (в случае MgCs, MgLi). Механизм работы эмиттеров из окисленных сплавов до сих пор не вполне ясен; сложной (и с нетерпением ждущей исследователей... не вас ли?) проблемой является проводимость диэлектрических частиц и пленок.

Полупроводниковые катоды (с ними мы уже встречались – тогда они были фотокатодами) – это, как правило, GaP, GaAs, GaPAs, чаще всего одна из граней кристалла, но иногда и поликристалл; иногда это определенная грань кристалла Si. Во всех случаях поверхность активирована Cs и слегка окислена. С ростом энергии первичных электронов σ_m растет почти линейно до тех пор, пока глубина проникновения первичных электронов не станет больше максимальной глубины выхода вторичных. Значения σ_m и E_m определяются максимальной глубиной, с которой могут выходить получившие энергию электроны, и если она велика, значения E_m могут вообще не достигаться (и тем самым σ_m остается неизвестным). Так, известны работы, в которых при $E_1 = 20$ эВ получалось $\sigma_m = 1800$, но при этом E_m не достигалось. В других работах достигалось $\sigma_m = 200-500$ при $E_m = 4-20$ кэВ. Величина E_1 может быть уменьшена до 12 эВ. Иногда вместо Cs применяют чередующиеся слои Cs и Sb или Cs и Te с некоторым увеличением σ . Отдельную группу составляют катоды SbCs и мультищелочные. Это SbCs₃, BiCs₃, TeCs₃, SbNa₂KCs, SbK₂Cs и подобные. Для них характерны $\sigma_m = 20-40$, $E_m = 0,7$ кэВ и $E_1 = 10-15$ эВ.

И в заключение – об одном важном параметре всех катодов. Чтобы электроны могли вылетать из катода долго и счастливо, материал катода должен быть проводником. Но даже в хорошем проводнике, металле, выделяется тепло, которое влияет на его работу, а иногда может вызвать и его разрушение – например, в автоэлектронных катодах с их высокой локальной плотностью тока. Термоэлектронные катоды часто являются полупроводниками, и хотя плотность тока в них поменьше, но разогрев иногда

определяет срок службы. Хуже всего обстоит дело с некоторыми вторичноэлектронными и фотоэлектронными катодами. Мало того что некоторые из них – полупроводники, так их еще и выполняют в виде тонких пленок. И проблема проводимости, проблема подвода тока к эмитирующей поверхности становится важной и сложной.

А вот если бы медь или серебро имели заоблачную фото- и вторичную эмиссию... Впрочем, тогда самыми важными и сложными стали бы другие физические и инженерные проблемы. И люди, которым нравится решать такие проблемы, занимались бы проблемами, которым, как мне кажется, нравится, когда ими занимаются те, кому это нравится. Может быть, это относится и к вам.

ОПТИКА

Почему ее выделяют

В курсе физики Ландау и Лифшица оптические явления рассмотрены в томе «Электродинамика сплошных сред». В курсе Фейнмана они рассмотрены в двух томах: «Физика сплошных сред» и «Излучение, волны, кванты». Это логично: то, что принято называть «оптикой», – как раз электромагнитные волны в сплошной среде. В более традиционных курсах физики оптику выделяют в отдельный раздел, хотя для физики она лишь маленький кусочек спектра электромагнитных волн. Примерно одна октава (от 0,35 мкм до 0,65 мкм) из чудовищного диапазона более чем в 17 порядков или 50 октав, освоенного человеком – от сверхдлинных волн в 4000 км для связи с подлодками до рентгеновского излучения с длиной волны менее 0,1 нм. Причина, простите за каламбур, очевидна – именно в этом узеньком диапазоне мы посредством фотохимических процессов преобразуем электромагнитную волну в электрический сигнал в нервах, и потом наш мозг делает с ним нечто еще более загадочное, т.е. мы видим. Причем не нужно отождествлять передачу импульса по проводам и по нерву – во втором случае это сам по себе сложный электрохимический процесс, поэтому передача идет в миллион раз медленнее, чем по проводам. И это у гигантских кальмаров, а у человека еще в сто раз медленнее. Кроме того, человек способен воспринимать не только видимое, но и инфракрасное излучение – просто через нагрев кожи и ощущение тепла. Правда, для этого восприятия нужны совершенно другие мощности и все равно не будет «изображения», т.е. возможности установить форму объекта и его излучательные и отражательные характеристики – цвет и рельеф поверхности. А вот это принципиально.

С точки зрения человека, особенностью оптического диапазона является то, что длина волны намного меньше размеров тех объектов, с которыми человек обычно имеет дело. Именно это позволяет узнавать форму объекта и характеристики его поверхности. В этом смысле нам повезло с Солнцем – излучай оно на больших длинах волн, трудно было бы создать чувствительный «глаз» (энергия кванта меньше), но даже если бы это произош-

ло, очень трудно было бы получить большое пространственное разрешение. А одно из свойств цивилизации – освоение большого диапазона размеров, 17 порядков (от размера Земли до межатомных расстояний). Объекты размером с Землю – это маршруты самолетов и кораблей, межатомные – это полупроводниковые приборы. Причем для освоения краев диапазона (верхних 4 порядков, от 10000 км до 1 км, и нижних 7 порядков, от 1 мм до 0,1 нм) принципиально нужна письменная культура, «внешняя память» (ну, или огромный объем «внутренней» памяти). Потому что края диапазона мы не видим непосредственно, и нам приходится строить приборы и накапливать информацию, иными словами, создавать науку.

Эта ситуация имеет свои следствия и для физики – повышенное внимание к электромагнитным параметрам материалов именно для оптического диапазона. Причем поскольку электро- и радиотехника долгое время развивались отдельно друг от друга, то одни и те же, по сути дела, свойства стали характеризовать разными параметрами. Например, в электро- и радиофизике – диэлектрическая проницаемость ϵ , а у оптиков – коэффициент преломления n , причем $n^2 = \epsilon$. Кроме того, оптики обращают внимание на параметры, которые для всех остальных не очень важны.

Кстати, если бы нам сильно не повезло с Солнцем, можно было бы попробовать создать ультразвуковое зрение, только на очень высоких частотах. При частоте 3 ГГц, т.е. при длине волны 0,1 мкм, разрешающая способность такого зрения была бы лишь в несколько раз меньше, чем электромагнитного (при той же длине волны). К сожалению, звуковые колебания таких частот в воздухе очень быстро затухают.

Коэффициент преломления

В смысле распространения оптического излучения среды делят на прозрачные и непрозрачные. Понятно, что такое деление условно, как и многие другие. Связано оно в первую очередь с практикой – в большинстве случаев вещества применяют в ситуациях, когда чем прозрачнее, тем лучше (линзы, призмы, окна), или прямо наоборот (зеркала). Промежуточные ситуации встречаются, но реже. И мы о них еще поговорим. Оптические свойства прозрачных сред характеризуют, прежде всего, коэффициентом преломления n – тем самым, который входит в «угол падения равен углу отражения, а синус угла...». При демонстрации формулы $n^2 = \epsilon$ обычно возникает вопрос: для воды $\epsilon = 81$, а $n = 1,33$. Как так? Ответ прост: «81» – это

в постоянном поле, в электростатике и на низких частотах, а с ростом частоты, когда молекулы перестают успевать реагировать на изменение направления поля и переориентироваться, ϵ падает. Сами обозначения – вопрос истории: когда-то кто-то из создателей физики так обозначил, и это вошло в традицию. Возможно, что на солнцеподобной звезде Тау Кита тамошние физики не используют разных обозначений и в их книгах везде, где у нас стоит n – стоит $\epsilon^{1/2}$. Или наоборот – вместо ϵ стоит... Вы уже догадались, что?

Вот с жидкостей и начнем. Самые маленькие n имеют, судя по справочникам, H_2O и C_2H_5OH – по 1,33. Жидкости с высокими коэффициентами преломления называют «иммерсионными», от латинского *immersio* – погружение. Их применяют для определения показателей преломления – прозрачную частичку исследуемого вещества помещают в иммерсионные жидкости с известными n , при равенстве преломлений она делается невидимой. Стандартные наборы из 30–100 таких жидкостей с n , начинающимися с 1,4, готовят из смесей керосина и йодистого метилена CH_3I ($n = 1,74$) и затем – растворов S в CH_3I ($n = 1,74$ – $1,78$). Дальше начинаются совсем уж страсти – растворы S, SnI_4 и SbI_3 в CH_3I ($n = 1,78$ – $1,83$), P и S в CH_3I ($n = 1,78$ – $2,06$), «жидкости Мейровитца» – растворы S и As_2S_2 в $AsBr_3Se$ (до $n = 2,02$) и As_2S_2 в $AsBr_3$ (до $n = 2,11$).

Но твердые вещества все равно берут верх, хоть минимальные значения n примерно такие же (у NaF $n = 1,32$), но зато максимальные существенно больше. Правда, у стекол они еле дотягивают до $n = 1,9$, но у алмаза $n = 2,4$, рядышком с ним – $CaTiO_3$, $SrTiO_3$ и TlI ($n = 2,4$), TiO_2 ($n = 2,5$) и почти рекордсмен SiC ($n = 2,6$). Именно поэтому SiC , муассанит, используется как имитатор бриллиантов в украшениях (а также фианит ZrO_2 с добавками – но у него n меньше) – высокое n при соответствующей огранке обеспечивает то, что ювелиры называют «игрой». А именно, вспышки, которые видит глаз, когда в зрачок попадает луч света, преломленный и/или отраженный бриллиантом в ушках красавицы. Которой кто-то их уже купил и подарил. Правда, тут важны еще некоторые параметры, о которых ниже. А «почти» – потому, что недавно было синтезировано соединение $Al_3C_2B_{48}$ с $n = 2,9$ – $3,1$. Правда, у Si $n = 3,5$, но это в ИК-диапазоне, а мы говорим о видимой части спектра.

Теперь о газах. В обычной жизни их коэффициенты преломления мало кого волнуют – они слабо отличаются от вакуума с его $n = 1$ по определению. Впрочем, если зимой открыть окно и посмотреть, как елозит пейзаж... или просто посмотреть вверх,

вспомнив не знаю кем сказанное «человек отличается от известного животного тем, что иногда поднимает глаза к небу», и заметить, как загадочно подмигивают начинающим интересоваться физикой звезды... и задуматься, почему елозит и подмигивают...

При нормальных условиях минимальное преломление у Не ($n = 1,000035$), а вот с определением максимального значения возникает проблема. Коэффициент преломления газов при не слишком больших давлениях линейно зависит от концентрации. Именно от концентрации, а не от давления – вообще часто вместо «концентрация» говорят «давление», а это совершенно разные вещи. Поэтому если мы хотим сравнивать разные газы, то надо сравнивать их при одной концентрации. Но тогда кто-то придет с куском W, рекордсмена тугоплавкости среди элементов, попросит нас нагреть его до 5000 К (или еще немного выше – какая, дескать, вам разница) и измерить коэффициент преломления. Чтобы не было таких страстей, надо чем-то ограничиться. Например, можно рассматривать только вещества, у которых давление насыщенного пара при 20 °С больше 1 атм, т.е. которые не нужно дополнительно нагревать. Газы, которые проходят по этим условиям, – прежде всего те, которые когда-то называли «истинными газами», потому что их нельзя было сжатием, но без охлаждения превратить в жидкость. Поскольку критическая точка, т.е. температура, выше которой их нельзя сжатием превратить в жидкость, лежит у них ниже 20 °С, и при этом давление насыщенного пара у всех них более 2,3 атм (кстати, именно столько у Не). Но могут быть газы, которые не входят в этот список, однако имеют давление насыщенного пара при 20 °С в 1 атм и более (например, Br₂). Газов, проходящих по этим двум спискам, чуть более двух десятков и не для всех известны оптические параметры. Но рекордсменами по преломлению являются, скорее всего, PCl₃ ($n = 1,0017$) и, возможно, PF₃. Немного не дотягивают н-пентан C₅H₁₂ ($n = 1,0016$), а также CS₂ и диэтиловый эфир C₄H₁₀O ($n = 1,0015$ при 1 атм), но для достижения этой концентрации все три надо немного подогреть. Хватает давления как раз у Br₂, но у него $n = 1,0011$.

В заключение этого раздела – немного об экзотике. Если упорядоченно расположить в среде из одного материала много маленьких включений из другого материала, то мы получим композит, композиционный материал. Композиты вообще известны несколько тысяч лет; обычно первым называют железобетон, но это многократная ошибка – и железобетон не материал, и бетон сам по себе уже композит.



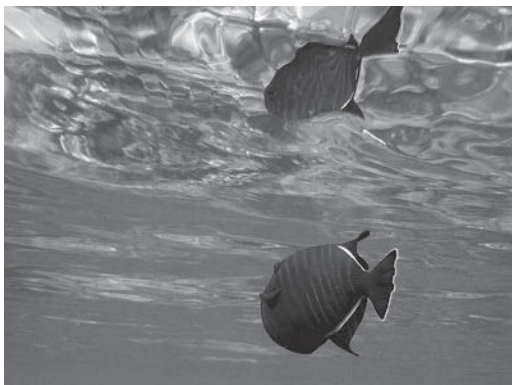
Линза на радиостанции — читать мелкую шкалу



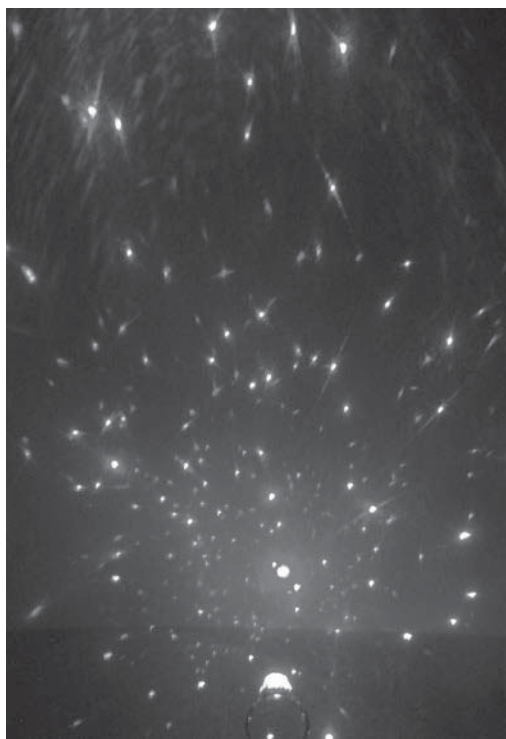
Цилиндрическая линза на радиостанции



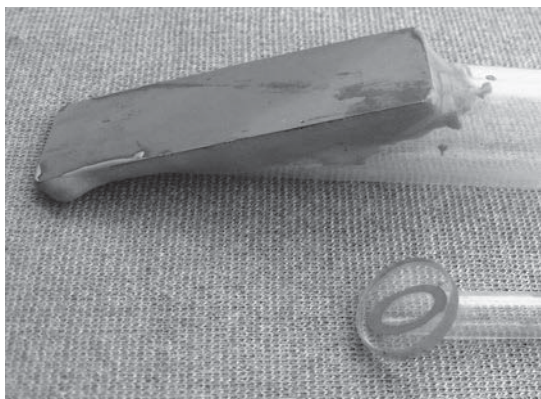
Капли воды как линзы (фото Н.Сьяновой)



Полное внутреннее отражение, снимок из-под воды (заимствовано из интернета)



Рефлексы, отражения и отражения с преломлением от бриллианта (внизу) освещенного зеленым лазером сверху



Выходные окна лазеров (кремний, кварц), наклоненные для уменьшения отражения для определенной поляризации

Но если среда – диэлектрик, а расположенные упорядоченно включения – проводники, то полученный композит может иметь необычные свойства по отношению к электромагнитному излучению. Например, при определенной форме включений он может иметь очень высокий коэффициент преломления (и не при каких попало длинах волн, а при тем более коротких, чем мельче включения). Скажем, при размере включений 0,06 мм и определенной их форме был получен коэффициент преломления $n = 33$ на волне 1 мм – это, конечно, еще не оптический диапазон, но ведь и 0,06 мм для современной техники еще не предел. Например, уже предлагались антенны из нанотрубок для прямого преобразования энергии света в электричество – не через фотохимию, как в глазках, а напрямую, как в той антенне, что на крыше.

Вы сидите? Дышите ровно? Так вот – еще есть метаматериалы с отрицательным показателем преломления. Попробуйте представить себе, как они преломляют...

Композиты. Кратко

По просьбе одного из первых читателей (Е.К.) – немного о композитах. С точки зрения основных электрических параметров, на рекорды композиты не сильно претендуют (с механическими и тепловыми параметрами ситуация будет совершенно иной). Но! Во-первых, результат может выскочить из-за угла и неожиданно, физик всегда должен быть к этому морально готов; во-вторых, от материалов всегда требуются какие-то

значения одних параметров при условии, что значения других параметров... понятно? Не просто максимальная проводимость или сопротивление, а при такой-то термостойкости или прочности или еще при чем-то.

Итак, проще всего дело обстоит с параметрами, которые аддитивно образуются из параметров компонентов. Например, если у компонента А некий параметр равен $P(A)$ и доля этого компонента в материале равна $D(A)$, а у компонента Б тот же параметр равен $P(B)$ и доля $D(B)$, то параметр смеси будет равен $P(A)D(A) + P(B)D(B)$. Простейший пример – плотность. В электрической и электромагнитной области примерно так ведут себя диэлектрическая и магнитная проницаемости и потери (тот самый $\text{tg } \delta$). К сожалению электриков, иначе ведет себя электропрочность – любые неоднородности в материале увеличивают локальную напряженность поля и провоцируют пробой.

Существенно более интересна ситуация с электропроводностью и в оптике. Начнем с оптики. Обычные краски работают так – это смесь отдельных частичек нескольких веществ, причем частички каждого вещества поглощают свою часть спектра. Например, если через желтое стекло смотреть на белый свет, мы увидим желтое, так как в слое стекла поглотилась синяя часть спектра, а прошедшие красная и зеленая выглядят как желтое. Если добавить еще пурпурное стекло, которое поглощает зеленое, мы увидим оранжево-красный цвет. Если добавить голубой фильтр, который поглощает красное, то мы ничего не увидим – будет черно, все поглотится. Так же действуют и краски, когда мы их смешиваем, называется это «субтрактивное сложение цветов», дословно – вычитательное сложение.

Цвета можно складывать иначе, это называется «аддитивное сложение», но для этого надо разными красками рисовать маленькие пятнышки и рассматривать с такого расстояния, чтобы пятнышки сливались. Тогда мы будем видеть один цвет, но образованный излучениями от нескольких красок. В истории живописи было такое направление – пуантилизм (спросите в интернете «пуантилизм» + картинки).

С электропроводностью дело обстоит так. Если мы в среду с низкой проводимостью введем хорошо проводящие частицы, то проводимость, конечно, возрастет, но как именно? Если частички не вытянутые, «примерно шарики», то проводимость по мере увеличения их концентрации сначала будет расти медленно, но только до момента, когда они начнут касаться друг друга, образовывать цепочки. Тут проводимость возрастет сразу и существенно, но она будет определяться площадью этих контак-

тов, т.е. станет сильно зависеть от технологии, температуры, времени работы при высокой температуре (частички спекаются, контакты растут). Такие материалы называют «керметы» (керамика + металл), их использовали в качестве нагревателей, но чувствительность к технологии и режиму эксплуатации не идет им на пользу.

А если частички не шарики, а совсем наоборот – нити? Причем расположенные упорядоченно, вытянутые, как северокорейские солдатики на параде? Тогда мы получим анизотропный материал, у которого проводимость вдоль нитей высокая, а поперек – низкая. А под углом – подумайте сами.

Но самое чудовищное вот: мы получили материал, в котором векторы поля и тока не обязательно коллинеарны. Ток течет не туда, куда ему предписывает электрическое поле, а вбок. Если вы когда-то умножали вектор на матрицу... Тут Шахерезада умолкает, потому что наступило утро, хватит читать, пора в школу.

Дисперсия

Коэффициент преломления (как и диэлектрическая проницаемость) зависит от частоты излучения. Для оптического диапазона можно сказать – от цвета этого света. Важность физики и техники этого явления определяется двумя факторами. Во-первых, хроматическими aberrациями – искажениями, которые из-за этой зависимости вносит оптический прибор в формируемое изображение. Во-вторых, спектральным анализом, для которого нужно как раз «разобрать» свет «на кусочки» с разной частотой. Соответственно, возникают две противоположные задачи, частью лежащие на конструкторов (например, компенсация искажений, вносимых одной линзой, действием другой линзы), а частью – на материаловедов. Кроме того, материалами с высокой дисперсией интересуются ювелиры – если при преломлении/отражении луч еще и расширяется в пространстве (угол зависит от частоты), то «игра» становится «цветной игрой»: вспышки, которые видит глаз, становятся цветными.

Дисперсию можно характеризовать разными способами, мы используем самый простой: разность показателей преломления Δn для «почти краев» диапазона – 656,3 нм (красная линия H_{α}) и 486,1 нм (сине-зеленая линия H_{β}). Среди твердых прозрачных веществ минимальная дисперсия у фторидов LiF, CaF, SrF, MgF₂ (0,005), а максимальная – у TlBr (0,24) и TiO₂ (0,28, одна из модификаций). Следующий – имитатор бриллианта, муассанит SiC (0,1). У рекорсмена преломления – Al₃C₂B₄₈ –

дисперсия изучена пока не во всей видимой области, похоже, что она 0,05 или немного больше, т.е. не рекордная.

Но не спешите создавать производство ювелирки из TlBr и TiO₂ – первый светочувствителен, разлагается при освещении, а второй существенно мягче алмаза и муассанита и, если он природный, сильно окрашен примесями. Синтетический прозрачен, но дешевле, а ювелирные украшения должны быть дорогими и/или выглядеть дорогими – их ведь носят-то для демонстрации наличия денег. Тут физика и инженерия переплетаются с психологией – вопрос становится еще сложнее и интереснее. А если еще, загадочно улыбаясь, спросить аудиторию, какая психология имелась в виду (индивидуальная или социальная), и высказать смелую гипотезу, что никакой психологии, кроме социальной, и не существует... То это перестанет быть лекцией по физике. Если же серьезно, то за этим «и/или» – сложная психология.

Среди жидкостей минимальная дисперсия, возможно, у метилового спирта CH₃OH (0,0055), но ядовит он не поэтому. Максимальная, возможно, у сероуглерода CS₂ (0,034) и бромнафталина C₁₀H₇Br (0,0325). Впрочем, не у всех известных жидкостей исследованы оптические свойства. А у некоторых они не исследованы, потому что сами жидкости еще неизвестны.

Коэффициент преломления газов, как указано выше, не сильно отличается от единицы. Но астрономам, а также геодезистам, которым нужно устанавливать точные расстояния между пунктами на земле, приходится учитывать и само это отличие, и его зависимость от частоты. Геодезистам – потому, что расстояния определяются по времени распространения сигнала, а скорость его зависит именно от коэффициента преломления. Не на Луне, чай, живем. Причем приходится учитывать изменение концентрации с высотой. У астрономов проблемы с рефракцией – она оказывается разной для звезд разного цвета. И на небе творились бы поближе к горизонту вообще чудеса, если бы коэффициент преломления не изменялся относительно слабо: величина $n-1$ от одного края оптического диапазона изменяется для He на 1%, для воздуха на 2%, для Xe на 5%.

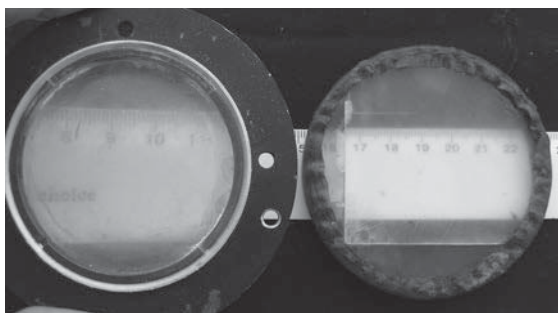
За границами видимого

В истории случались ситуации, когда изменялись внешние условия. Ледниковые периоды, глобальные потепления, ускорения и перестройки, откаты и распилы, вторжения войск соседних государств, появление в продаже новых гаджетов и так далее. В этих ситуациях успешнее выживали более

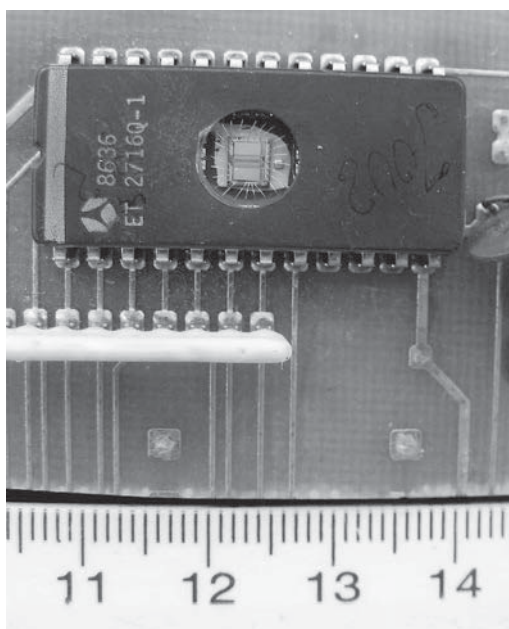
активные, склонные к исследованию окружающего мира. Так возникла и стала социальной потребностью наука. В частности, поэтому, освоив худо-бедно оптический диапазон, человек стал распространяться на соседние участки электромагнитного спектра. Для этого ему потребовались прежде всего оптические материалы – прозрачные (для всякого рода окошек), преломляющие (для линз и призм), диспергирующие (для спектрального анализа) и отражающие (для зеркал).

Для всего вышеперечисленного, кроме зеркал, нужен материал, «прозрачный» в соответствующей области спектра, т.е. не слишком сильно поглощающий излучение. Упрощая, можно сказать, что обычное стекло прозрачно в диапазоне 0,35–2 мкм, т.е. ультрафиолет (УФ) оно не пропускает, а инфракрасное излучение (ИК) – частично. Конечно, эти значения, обычно приводящиеся в справочниках, условны – достаточно тонкая пленка любого материала пропустит любое излучение. Но обычно оптики работают с миллиметрами и требуют пропускания большей части излучения. Естественное решение – кварц. И вот диапазон расширяется в сторону УФ до 0,2 мкм. Есть особые сорта стекол с немного большим доступом в ИК. На этом возможности стекол исчерпаны. В сторону УФ чуть дальше кварца забираются CaF_2 и MgF_2 (примерно до 0,12 мкм) и дальше всех – LiF (до 0,11 мкм). Со стороны ИК дела обстоят лучше: материалов много, а рекордсменами будут CsBr , прозрачный до 50 мкм, и CsI (60 мкм). Оригинальна ситуация с Si – он прозрачен до 10 мкм, потом непрозрачен, а потом опять прозрачен, начиная с 30 мкм (конкретные цифры зависят не только от критерия прозрачности, но еще и от примесей в материале). Практически непрерывно прозрачен алмаз. Вообще же оптические материалы при увеличении длины волны прозрачны в основном начиная с 200–300 мкм, SiO_2 – с 100 мкм, ZnS – с 50 мкм. Иными словами, сложная область – десятки микрометров.

Что касается коэффициента преломления, то для материалов ультрафиолетового диапазона он составляет около 1,4, для инфракрасных – группируется вокруг 1,7. Исключения – Si ($n = 3,4$), Ge ($n = 4,1$) и, конечно, алмаз. Дисперсия различается у разных материалов незначительно, поэтому применение в основном определяется прозрачностью в нужном диапазоне длин волн и неоптическими свойствами (например, устойчивостью к влаге). Впрочем, как это и должно быть по теории, дисперсия возрастает на границах полосы пропускания, но радости с этого мало.

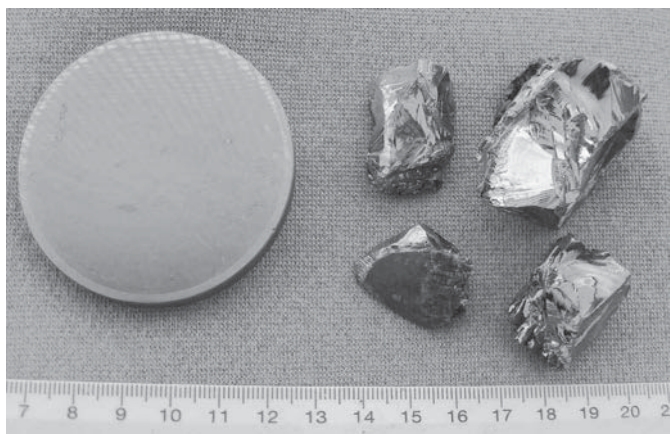


Оптические детали из бромида калия, пропускающие инфракрасное излучение, справа – плоскопараллельное окно кюветы, слева – линза



Полупроводниковая схема памяти с окошком из кварца, пропускающая УФ-излучение – для стирания информации

Если все-таки говорить о пластинках толщиной в миллиметры, то для волн короче $0,1$ мкм с прозрачными материалами дела обстоят плохо, т.е. почти никак. Поэтому приходится довольствоваться отражательной оптикой. Но и тут все не здорово – металлы в диапазоне УФ отражают плохо. Например, Ag при



Слева – кремниевое окно для пропускания ИК-излучения, справа – куски кремния



ИК-фотография автора, шкала температур справа, холоднее всего – фотоаппарат, который автор держит в руках

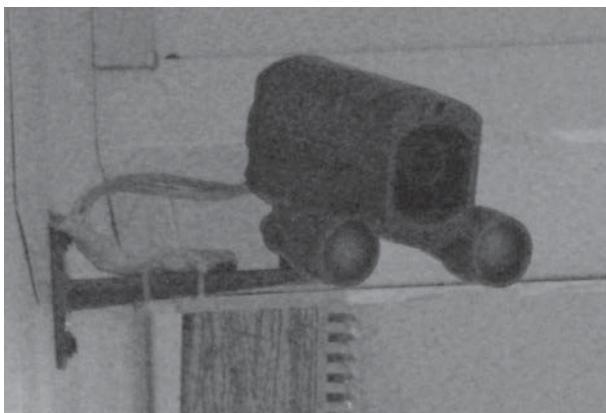
длине волны более 0,4 мкм отражает, как и положено уважающему себя металлу, 95% и более, но при 0,25 мкм отражает только 30%. С остальными металлами дело обстоит еще хуже, разве что Al, причем именно при 0,25–0,4 мкм, ведет себя лучше (отражает 90%). Вот они вдвоем и изображают из себя рекордсменов. Поднять отражение, и существенно, удастся «просветлением» – нанесением на металл интерференционных покрытий. Так удастся получить отражение 50% на волне 0,01 мкм – а ведь это уже рентген, правда совсем мягкий.

Теперь два слова о жидкостях и газах. В качестве «оптических материалов» жидкости используются весьма редко. Кроме указанных выше случаев известно использование в астрономии некоторых жидкостей для заполнения полостей в объективах. Особый вид дисперсии позволяет уменьшить хроматические aberrации объектива – но это в видимой части спектра. Оптические свойства жидкостей в инфракрасной области используются очень широко – но не оптиками, а химиками (для анализа жидкостей). Соответственно, и оптические свойства газов используются для исследования смесей газов, важны эти свойства и для расчета тепловых процессов в атмосфере.

Есть, правда, один случай, когда смесь газов (а именно – атмосфера) используется как оптическая среда – при лазерной



Черные пластины на банкоматах – ИК-фильтры, за ними – лампы, поэтому камера банкомата видит, кто перед ним стоит, и в темноте, причем человек не видит, что его освещают



Под камерой – ИК-прожектор, его излучение частично видит фотоаппарат



Под камерой – ИК-прожектор

связи. Но тут нет выбора и нет рекордов, просто при выборе частот и волн для связи нужно учитывать, какие части диапазона поглощаются. Чтобы думать не о плохом, а о хорошем, связисты говорят об «окнах прозрачности». Для обычной атмосферы это окошки 0,3–1,3 мкм, 1,5–1,8 мкм, 2,0–2,6 мкм, 3,5–4,0 мкм,



Под камерой – ИК-прожектор; светодиоды, окружающие объектив, тоже излучают, и фотоаппарат частично видит это излучение

4,3–5,5 мкм, 7,0–15,0 мкм, 30–70 мкм, форточки в районе 1 мм и 3 мм и, наконец, начиная с 1 см и далее. А там, где нет окна прозрачности, там электромагнитная волна поглощается. И еще в одной ситуации важно добиться предельно малого поглощения (естественно – это тоже дальняя связь). Только не по воздуху, а по стеклу.

Оптоволокно, поглощение, рассеивание

Лет десять назад писали, что половина всей информации, которой обмениваются люди, побывала где-то по дороге в оптоволоконном кабеле. Сейчас, наверное, не половина, а почти вся. Физику работы оптоволоконна, световода, начиная со школьного учебника и до уравнений длиннее строки, можно расписывать долго. Детективная история его возникновения, включающая догадку, энтузиазм, авантюризм, неумение реализовать идею, коммерческую хватку и многое другое – как всегда! – потянет на книгу. А уж технология-то – о ней можно написать не книгу, а книжную полку. О преимуществах оптоволоконна перед другими способами передачи сигнала тоже можно было бы поведать, но с точки зрения материаловедения важно, из чего их делают, какие параметры этого «чего» важны и какие на сегодня в этой области есть достижения.

Оптоволокно для передачи сигнала на большое расстояние делается из SiO_2 , т.е. из кварца. Главный параметр оптоволоконна – способность передавать сигнал с малыми искажениями на большое расстояние. Искажения и потери зависят от мате-

риала, конструкции и эксплуатации. Конкретно – от материала нужны малые потери (поглощение и рассеивание) и дисперсия. Чтобы уменьшить потери, нужно использовать диапазон 1,2–1,7 мкм и уменьшать примеси Fe, Cr, Cu, Co, V, Mo, OH-групп. Именно выяснение причин потерь и получение кварца с низким содержанием этих примесей дало в свое время возможность начать активно применять световоды. С тех пор потери уменьшены примерно раз в сто, сегодня рекорд – 0,15 дБ/км, причем это почти теоретический предел (предел – «релеевское рассеивание», то самое, из-за которого небо голубое, оно дает 0,13 дБ/км). Заметим, что для реализации механизма работы световода нужен способ управления коэффициентом преломления, и тут нам повезло – есть примеси, которые влияют на n , но не вызывают больших потерь (а именно, F и B, фтор и бор, понижают n , а Al, Ge, P увеличивают). Тут если и идет речь о рекордах, то скорее о рекордах и достижениях технологии, обеспечивающей низкую концентрацию вредных примесей и оптимальную – полезных, причем еще и переменную по сечению волокна.

Попутно. В технике не так уж много областей, для которых нужны сверхчистые вещества. Общеизвестный пример – полупроводниковая техника: многие примеси катастрофически влияют на свойства. Другой пример – атомная техника: например, в реакторных материалах должна быть мала примесь веществ, поглощающих нейтроны, В, Li и Cd (бор, литий, гадолиний). Оптиковолокно с концентрацией примесей порядка 10^{-8} % по массе – третий пример.

Вне диапазона 1,2–1,7 мкм потери в SiO_2 увеличиваются, а использовать видимое и более далекое ИК-излучение тоже хочется. Поэтому для видимого диапазона существует оптиковолокно из «обычных» стекол: натрий–кальций–кремний ($\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$) или натрий–бор–кремний ($\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$). В ИК-диапазоне применяют фторидные (например, на $\text{ZrF}_4-\text{BaF}_2$) и халькогенидные (As_2S_3 , As_2Se_3) стекла, а также кристаллические материалы на основе TlCl , AgCl . Разнообразие материалов этих групп довольно велико, и выделить лучшие трудно – пока что потери в них всех довольно велики и используют их для передачи на короткие расстояния.

Но теоретически в оптиковолокне из этих материалов возможно достижение лучших параметров, нежели в SiO_2 , поэтому нас (и вас) еще ждут приключения. О которых кто-то когда-то, может быть, напишет: «Детективная история их возникновения, включающая догадку, энтузиазм, авантюризм, неумение реализовать

идею, коммерческую хватку и много другое – как всегда! – потянет на книгу».

Отражение, поглощение, излучение

Если нагреть, оно излучает – посмотрите вверх. Лучше днем – Солнце ближе и его излучение убедительнее. Ночью все сложнее – Луна, как иногда говорят, не излучает, а отражает, а звездочки далеко. Но это неправильно, Луна тоже излучает. Вообще-то ваш сосед по парте (и не по парте) тоже излучает. И излучаете – не надо бежать к врачам – и вы. Вообще-то излучает все. Излучает, отражает, поглощает, а прозрачные среды – еще и рассеивают. Так что небо в натуре голубое, спасибо лорду Рэлею, хотя до сих пор во многих книгах пишут, что голубой цвет неба – от пыли; но это не так, он от флуктуаций плотности воздуха, и сделать с этим ничего нельзя. Раз отражается, поглощается и излучается электромагнитное излучение, то характеристикой будет спектр – зависимость долей отражаемого и поглощаемого излучения от длины волны. Например, синяя краска отражает синюю часть спектра, желтая – желтую. Обычно говорят, что белая «отражает все», но и это ошибка. Белая, как и любая другая, отражает такое излучение, которое мы называем белым, но спектральный состав его глазом установить нельзя. На самом деле как «белый» мы воспримем, при определенном соотношении мощностей, и смесь синего с желтым, и красного с синим и зеленым, и вообще бесконечное количество вариантов. Но это не мешает нам говорить о коэффициентах отражения и поглощения и их зависимостях от длины волны.

Лучшее зеркало, как уже говорилось, это Al и Ag, алюминий и магний. А самое черное, не отражающее покрытие? А это кто угодно, но сильно шероховатое или мелкодисперсное. Видели черно-белые фотографии? А ведь черное в них – очень мелкие частицы Ag (белый – где их нет). Если же не заниматься хитростями, а говорить о чистых гладких поверхностях, то всякий скажет, что чернее всего графит. Для видимой части спектра это действительно так, но для инфракрасной – нет. По мере увеличения длины волны коэффициент отражения графита понемногу растет (для 1 мкм это уже 10–20%, для 4–10 мкм это 25–50%). Цифры в разных источниках различаются весьма сильно – графит у каждого был свой; заметим, кстати, что оптические свойства монокристалла графита должны быть анизотропны. Но так или иначе, а в ИК-диапазоне графит не «черный», а «серый». А черная в ИК-диапазоне – вода! Она и

в видимом-то отражает проценты, вполне соревнуясь с графитом, но продолжает так делать и в ИК-диапазоне, по крайней мере до 10 мкм. Так же ведет себя и лед, а вот снег – сложнее. Когда он свежий, белый и пушистый, то он неплохо отражает, по крайней мере до 1 мкм (видимо, за счет рассеивания). Но стоит ему немного слежаться или увлажниться – он начинает приближаться по свойствам к воде и льду.

Ну, а теперь нагреем материал и посмотрим, как будет излучать. Понятно, что будет действовать согласно правилу Кирхгофа – коэффициент излучения равен коэффициенту поглощения, т.е. если материал все поглощает (черный), то, будучи нагрет, он и излучать будет хорошо. А если нет – то нет. Поэтому если мы хотим уменьшить теплообмен излучением, то нам надо сделать объект «белым». Но объект должен быть «белым» для падающего на него внешнего излучения (например, видимого, солнечного, света), если мы хотим пресечь нагрев. А если мы хотим пресечь охлаждение излучением, то нам нужно «белое» для того диапазона волн, в котором объект собирается излучать, для человека – в далеком ИК-диапазоне, около 10 мкм. А если мы хотим интенсифицировать теплообмен, то надо сделать покрытие «черным», но опять же – «черным» для приходящего излучения или «черным» для уходящего, при их длинах волн. Поэтому, скажем, белая ткань будет уменьшать нагрев от Солнца, но при этом она не станет мешать излучению самого человека, потому что в ИК-диапазоне, где вы излучаете, она уже вовсе не «белая», а скорее темно-серая. Обратную задачу – согреть вас на морозе – решит углерод: он радостно поглотит солнечное излучение, но в ИК-диапазоне не будет таким же черным – хотя и будет излучать, но слабее.

Задача управления излучением оказывается особенно сложной, когда речь заходит о высоких температурах. А заходит она о них постоянно – вся энергетика живет при высоких температурах (и вы знаете, почему – помните формулу для предельного КПД любой тепловой машины?). Именно поэтому высокотемпературное неизбежно. А это немедленно накладывает ограничения на материалы – они испаряются, плавятся, разрушаются термическими напряжениями и взаимодействуют со средами (проще сказать – горят). В этих условиях выбор материала обычно делается с учетом из его способности простоять мало-мальски приличное время, а не из соображений про теплообмен. Но на всякий случай имейте в виду, что в оптическом диапазоне керамики из Al_2O_3 и MgO такие бе-

ленькие и хорошенькие, а что касается излучения при высоких температурах, то все кошки серы. Другими словами, имеют коэффициент излучения от 0,2 до 0,6, хотя, конечно, у силицидов и некоторых оксидов в этом диапазоне этот коэффициент поменьше, а у карбидов, боридов и других оксидов побольше, но разброс данных велик, объекты у всех авторов различались.

Вообще же в этой области больше неизученного, чем изученного. Так что можете спокойно доучиваться в школе и стараться получить хорошее математическое и физическое образование там, где его еще можно получить. Вам будет, что изучать потом.

Поккельс, Керр...

Если в ходе дискуссии, личной или публичной, вы захотите заткнуть оппонента (при том, что сами ничего не понимаете), надуйте щеки и изреките: «Это много от чего зависит». Ага, «все зависит от всего» – если считать, что чувствительность прибора, измеряющего влияние, безгранична, мир непрерывен, а время наблюдения бесконечно. Все это не так, но какая разница – оппонент покинул форум, последнее слово осталось за вами.

В реальной жизни предполагаемые теоретиками зависимости начинают искать, а найденные зависимости начинают тщательно изучать в двух случаях. Если светит продвижение теории, улучшение понимания того, как устроен мир, и если наклеивается интересное практическое применение. В первом случае часто, а во втором всегда важна сила влияния, величина эффекта, т.е. рекордные значения.

Электрическое поле может влиять на коэффициент преломления посредством разных механизмов. Один из них может реализоваться только в кристаллах, причем далеко не во всех. Этот эффект называется эффектом Поккельса, и он линеен, т.е. изменение коэффициента преломления пропорционально напряженности поля. Влияние зависит от направления распространения света и от положения плоскости поляризации относительно кристаллографических осей кристалла. Оно максимально для кристалла $\text{Sr}_{0,75}\text{Ba}_{0,25}\text{Nb}_2\text{O}_6$. Но при практическом использовании этого эффекта применяются другие соединения – потому что практическое применение зависит от многих параметров, например от сложности технологии получения и от стоимости.

При другом механизме, который реализуется не только в кристаллах, но и в жидкостях, и в газах, изменение коэффици-

ента преломления пропорционально квадрату напряженности поля. Это эффект Керра. Он наиболее силен в нитробензоле $C_6H_5NO_2$, которому повезло. В том смысле, что его и используют, когда этот эффект применяют на практике.

А ведь коэффициент преломления – это не единственный оптический параметр... А ведь электрическое поле – не единственное поле... И вообще не единственный способ на что-то влиять – есть еще и нагрев, и деформации... Тут автору впору сделать умное лицо и сказать: «Нельзя объять необъятное». Но мы поступим иначе, и в конце книги занудно объясним, что думает автор об объятном и необъятном.

ТЕПЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Начнем с самого начала

Если в каком-то объекте, приборе, изделии выделяется тепло – в результате то ли протекания тока, то ли химических реакций, а может быть, попадает и извне, то начинает расти температура. Дальше могут происходить самые разные процессы – плавление, кипение, сублимация, иные фазовые переходы, химические реакции, тепло- и массоперенос, изменение электрических и магнитных свойств и прочее. Но прежде всего – начинает расти температура. Увеличения теплоемкости и температуры связываются теплоемкостью, если речь идет об объекте, и удельной теплоемкостью – если о материале. Материал с большой теплоемкостью нужен, если мы хотим, чтобы он нагревался поменьше, а с малой – если мы как раз хотим его нагреть, расходуя меньше энергии. В технике встречается и та, и другая задача. Например, если мы хотим аккумулировать тепло, то нам удобнее использовать материал с высокой теплоемкостью. Скажем, положить в теплице черные пластиковые трубы с водой, чтобы они днем поглощали излучение и запасали тепло, а ночью – отдавали. А если мы хотим



На полу лежат черные пластиковые цилиндрические емкости с водой, днем они поглощают солнечное излучение и нагреваются, а что они делают ночью, решите сами

сделать датчик тепла, преобразующий энергию в температуру, которую мы и измерим, то нам удобнее использовать материал с низкой теплоемкостью – чтобы изменения температуры были побольше.

Удельные теплоемкости веществ можно представлять в разных единицах: физику привычнее Дж/(моль · К), инженеру – Дж/(кг · К) или Дж/(м³ · К). Вторая проблема: при каких температурах рассматривать теплоемкости – они же зависят от температуры, и не как-нибудь, а стремясь к нулю при стремлении температуры к нулю. Третья проблема, которую мы знаем по газам, – есть две теплоемкости, «при постоянном объеме» и «при постоянном давлении». Поскольку все рассмотреть невозможно, ограничимся теплоемкостями при 20 °С. Что касается двух теплоемкостей, то их в этом смысле две у любого вещества и они равны, лишь если термическое расширение отсутствует. Но коэффициент термического расширения (о нем мы еще поговорим) таков, что для всех веществ, кроме газов, эти значения различаются пренебрежимо мало.

Теплоемкость газов по сравнению с жидкостями и твердыми телами мала просто потому, что при нормальных условиях в газах мало вещества. Для большинства газов теплоемкость при постоянном давлении составляет 1,3–1,6 кДж/(м³ · К) или 0,8–1,9 кДж/(кг · К), при постоянном объеме – в 1,5–2 раза меньше (связь этих величин указана в школьном учебнике). Исключения, как и следовало ожидать, составляют He и H₂ – из-за малой молярной массы в их «кг» помещается много молей. В итоге их теплоемкость оказывается равной 5 кДж/(кг · К) и 14 кДж/(кг · К) соответственно.

Среди конденсированных сред, т.е. жидкостей и твердых веществ, наименьшей удельной теплоемкостью, выраженной в Дж/(кг · К), обладают тяжелые металлы, например, для свинца Pb или золота Au удельная теплоемкость равна 0,13 кДж/(кг · К), а в качестве вещества с максимальной теплоемкостью часто называют воду H₂O – 4,2 кДж/(кг · К). Но литий Li имеет теплоемкость 4,4 кДж/(кг · К), а нашатырный спирт, т.е. 10-процентный раствор NH₃ · OH в воде H₂O, имеет теплоемкость еще несколько большую – 4,7 кДж/(кг · К). Если же характеризовать теплоемкость «физически», т.е. в Дж/(моль · К), то наименьшей она окажется у алмаза C: 6,1 Дж/(моль · К), а наибольшей – у Se(SO₄)₃: 276 Дж/(моль · К).

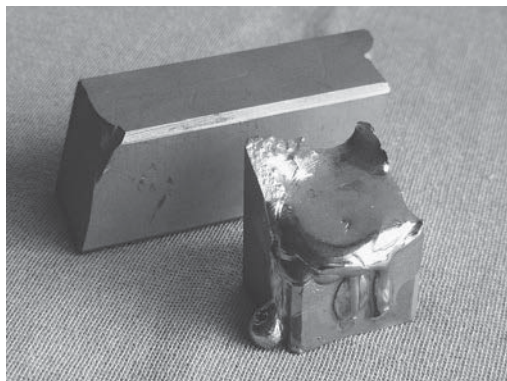
Пример теплоаккумулятора – знаменитая железная колонна в Дели (Индия), которая не ржавеет, хотя находится на открытом воздухе. В литературе есть несколько версий, почему она не ржавеет, часть версий тривиально ошибочны, часть – фантастические. Две из версий, которые могут претендовать на достоверность, – накопленное за день тепло не дает выпасть росе и быстро высушивает колонну после дождей (подземная часть колонны корродирует) и наличие защитной пленки из $\text{FePO}_4 \cdot \text{H}_3\text{PO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, FeOON и $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}$.

В технике может, однако, встретиться ситуация, когда надо получить жидкую или твердую среду с минимальной теплоемкостью. Но в этом случае, опять же, первым будет вопрос о рабочей температуре и о прочих условиях эксплуатации. В частности, для твердой среды важным будет вопрос о ее механических свойствах, например – о прочности. Ибо делая ажурную конструкцию, в основном «состоящую» из воздуха, можно уменьшить теплоемкость до теплоемкости воздуха – если собственно «вещества» будет достаточно мало. Именно по этому пути идут конструкторы высокотемпературной теплоизоляции. Там цель – уменьшение не теплоемкости, а теплопроводности, но эти два параметра тесно связаны. Немного позже мы обсудим эту ситуацию.

Плавление и температура

Вот уж, казалось бы, что может быть проще: расплавилось или нет. Ан нет, нас и здесь ждут приключения. Но начнем с самого простого – с элементов. Самый тугоплавкий – кто ж этого не знает – вольфрам. Но если по нему врезать мощным электронным пучком в вакууме – то и его вполне можно расплавить. Подумайте и поймите – почему именно в вакууме? Внимание: всякий раз, когда в тексте вам встретится слово «подумайте» – это будет вопрос, на который в конце книги есть... нет, не ответ, а указание на начало пути, ведущего к нему.

Его температура плавления... лезем в интернет и книги, и приключения начинаются – чаще всего пишут либо 3380°C , либо 3422°C . Понятно, копируют, не применяя голову – как и весь интернет. Заметим, что еще полвека назад в серьезном справочнике (Кэй и Лэби, «Справочник физика-экспериментатора») уже писали 3387°C , что наводит на размышления. Ответ прост – чем металл чище, тем выше температура плавления. Так что меньшие значения соответствуют большему количеству примесей. Другое дело, что среди металлов вольфрам все равно рекордсмен, следующим идет тантал – 3014°C (хотя по тем же



Бруски вольфрама. На том, который плавился и тек, был сфокусирован в вакууме мощный электронный пучок. Попробуйте оценить его параметры (сторона бруска – 3 см)

причинам и пишут часто про $2997\text{ }^{\circ}\text{C}$). Из неметаллов рекордсмен – бор, $2076\text{ }^{\circ}\text{C}$. Отдельный разговор будет про углерод, а пока что вывод, важный для практики: температуры плавления могут сильно зависеть от примесей, с другой стороны – измерение температуры плавления может использоваться для контроля чистоты материала, и химики иногда так и делают. Тут полезно остановиться и подумать – в каких случаях этот метод будет эффективен?

Это область высоких температур, а в окрестности нуля происходит вот что. Из «нормальных» веществ самая низкая температура плавления у водорода, это $14,01\text{ K}$, т.е. $-259,14\text{ }^{\circ}\text{C}$, у его изотопов (D_2 , T_2) и молекул с ними (HD) – выше. Совершенно особые свойства имеет гелий, он не затвердевает вообще, как его ни морозь, – если не сжать. А именно, чтобы получить твердый гелий, конкретно гелий-4, ^4He , его надо охладить до $0,95\text{ K}$ и сжать давлением 25 атм ($2,5\text{ МПа}$). Еще немного ближе к абсолютному (и как всякий абсолют – недостижимому) нулю – ^3He , гелий-3, его надо охладить до $0,3\text{ K}$ и сжать давлением 29 атм ($2,9\text{ МПа}$).

А если бы мы жили при бóльших давлениях и меньших температурах, мы бы сказали – надо нагреть аж до $0,95\text{ K}$ и непонятно как снизить давление до 25 земных атмосфер. Кстати – подумайте, как нам снизить давление, если мы живем в глубинах Юпитера, где давление больше?

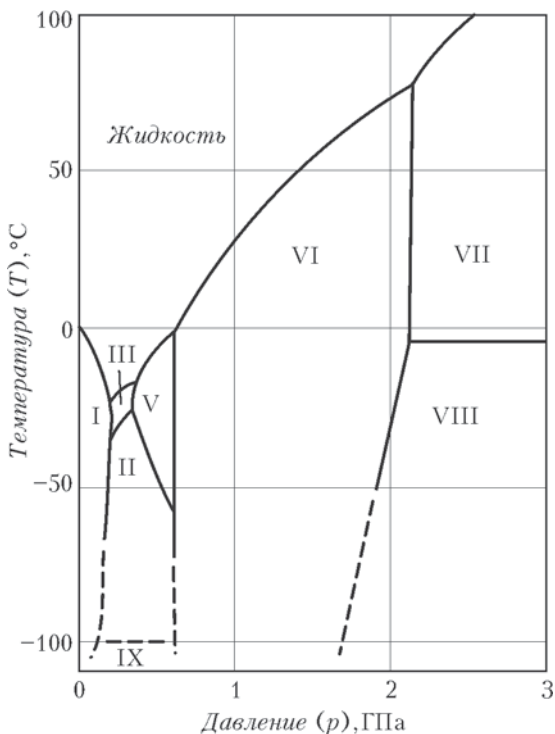
Температура плавления вообще зависит от давления, причем почти для всех веществ с ростом давления она увеличивается.

Самый известный случай иного поведения – вода H_2O . Иногда говорят, что вода уникальна, но так же ведут себя тяжелая вода – оксид дейтерия D_2O и, вроде бы, оксид бора B_2O_3 . Наверняка, так ведут себя и остальные «воды» с заменой водорода H на дейтерий D и/или тритий T. Из элементов обладают этим свойством германий Ge, галлий Ga, аргон Ar, кремний Si, плутоний Pu, сурьма Sb, висмут Bi. Причем в согласии с принципом Ле Шателье у них, как и у воды, объем увеличивается при замерзании – их «лед» плавает в их «воде». Заметим, что в некоторых случаях объем увеличивается при замерзании сплавов названных выше металлов, а также чугуна, однако с температурой плавления это может и не быть связано. Тут полезно остановиться и подумать – а с чем?

Зависимость температуры плавления от давления, в общем, настолько слаба, что в обычной инженерной практике ее не учитывают. Например, для того чтобы уменьшить температуру плавления льда на $1^\circ C$, нужно создать давление около 100 атм. Даже использующие температуры плавления некоторых металлов как реперные точки шкалы температур метрологи – вот уж кто привык учитывать все на свете – не оговаривают, при каком атмосферном давлении вести измерения. Но в экспериментальной физике, где имеют дело с весьма большими давлениями, ситуация совершенно иная, и там учет зависимости температуры плавления от давления необходим. А еще он необходим при построении моделей поведения веществ в глубинах Земли и иных небесных тел. Например, у того же льда температура плавления уменьшается при увеличении давления до 2000 атм (200 МПа) и достигает хорошего минуса, а именно $-20^\circ C$. Но при дальнейшем увеличении давления кристаллическая решетка льда перестраивается, и температура плавления начинает увеличиваться, достигая при давлении 25000 атм (2,5 ГПа) $100^\circ C$. Иными словами, такой лед можно было бы подружить с кипящей водой, если бы он не превращался в обычный при уменьшении давления. На диаграмме состояния H_2O разные «льды» обозначены их номерами.

А что могло бы произойти, если бы такой лед оказался стабилен при уменьшении давления, рассказано в великой книге Курта Воннегута «Колыбель для кошки». Возможно, имеет смысл иногда читать что-то, кроме физики...

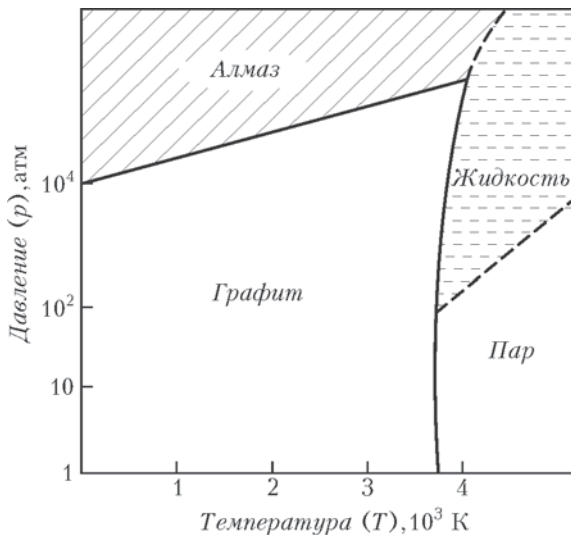
Обещанный выше разговор про углерод состоит в том, что он плавится при весьма высокой температуре, но только при высоком давлении. Это так называемая тройная точка – т.е. такое сочетание температуры и давления, при котором могут сосуще-



Фазовая диаграмма воды, разные «льды» имеют разные кристаллические решетки и свойства. Например, у льда VI плотность $1,3 \text{ г/см}^3$, а диэлектрическая проницаемость 193. Льда IV на диаграмме нет, потому что его вроде бы открыли, потом вроде бы закрыли. Разных «льдов» известно больше, чем показано на этом рисунке, а вообще-то их, наверное, еще больше. Может, и вам что-то достанется открыть или закрыть

становать твердое, жидкое и газообразное состояния (для воды H_2O это $+0,01^\circ\text{C}$ и $0,006 \text{ атм}$). При меньших давлениях углерод не плавится, а при нагреве просто и непринужденно возгоняется – минуя жидкую фазу, превращается в пар. Сами параметры тройной точки углерода до сих пор известны не вполне четко. Обычно утверждается, что температура ее лежит в диапазоне от 4000 до 4600°C , а давление – около 110 атм .

Однако, есть надежные, относительно недавно полученные данные, согласно коим температура лежит на нижнем краю указанного диапазона, а давление если и больше атмосферного,



Фазовая диаграмма простого углерода. Куда уж проще? Только вот известна она не очень...

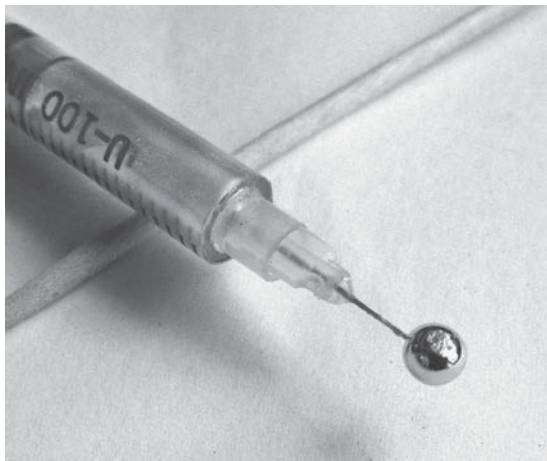
то не намного. Поэтому вольфрам должен испытывать определенное беспокойство – вдруг ему придется уступить первое место.

Это что касается тугоплавких элементов, но и тугоплавкие соединения не сильно их превзошли: рекордсмены – карбиды тантала и гафния, TaC и HfC, с температурами плавления где-то между 3880 и 3900 °C. Возможно, что их превосходит соединение Ta₄HfC₅ с температурой плавления еще на 200 °C выше, но сложность получения результатов в этой области столь велика, что – если уж мы ставим целью сравнить данные для нескольких материалов – исследовать их надо в одинаковых условиях, в одной установке и на современном оборудовании. Так что вам и кельвины в руки.

Техника интересуется тугоплавкими материалами неспроста – чем выше температура нагревателя, тем выше предельный КПД тепловой машины. Но температура плавления важна не сама по себе, а в совокупности с другими параметрами, например с прочностью, или с электроизоляционными свойствами, или со стойкостью к той среде, в которой предстоит работать материалу. Так, тугоплавкие металлы и углерод быстро окисляются на воздухе при относительно невысоких температурах в сотни градусов. Тем не менее, иметь представление о температурах

плавления надо – что если именно вам предстоит разрабатывать лампочки для освещения Луны?

А бывают ситуации, когда нужно нечто легкоплавкое, но с металлической проводимостью. Самый легкоплавкий металл известен всем – это ртуть Hg, $-39\text{ }^{\circ}\text{C}$. Но рекорд (на сегодня) – это амальгама ртути–галлий Hg 91,4 % – Tl 8,6 %, которая плавится при $-59\text{ }^{\circ}\text{C}$, а если вы не опасаетесь окисления – то первое место достанется сплаву натрия–калия–цезия Na 12 % – K 47 % – Cs 12 %, который плавится при $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$. А вот металл галлий Ga плавится в очень жаркую погоду. А еще его можно



В жаркий день галлий плавится просто так, без дополнительных усилий (фото М.Корнилова)

расплавить, просто положив на ладонь и сжав кулак (если у вас в груди бьется горячее сердце, любящее физику).

Возможно, что еще немного продвинуться в область низких температур можно, имея дело с малыми частицами. Исследуется этот эффект давно, но имеющиеся для разных металлов данные получены в разных условиях, и их трудно сопоставлять. Тем более что для малых частиц не вполне понятно, что такое «температура плавления» – в некотором диапазоне температур может быть устойчиво промежуточное состояние, когда ядро частицы твердое, а оболочка – жидкая. В общем можно считать, что уменьшение температуры плавления «начинается» при диаметре частиц порядка 40 нм. При таких размерах уменьшение температуры плавления составляет, например, 2 %, а при диаметре 20 нм – 10 %.

Плавление и теплота фазового перехода

И тут немедленно возникает вопрос – как ее характеризовать. Определение вы, конечно, знаете, но если посмотреть в книжки, то оную теплоту, при всем к ней уважении, приводят то в кДж/кг, то в кДж/моль. Можно возразить – а какая разница, если они однозначно связаны, вон температуру тоже можно и в °С, и в К, а если хочется поиздеваться над европейским и азиатским читателем – то и в °F. Разница, однако, есть – теплота в кДж/моль говорит об энергии, которая нужна, чтобы что-то сделать с молекулой (или атомом). Иными словами, если у вас в голове сравнение молекул, атомов, связей между атомами в молекуле, если вас интересует в данный момент физическая сторона этого мира – то это ваши единицы. А если вы что-то создаете, конструируете, если вы на инженерной стороне, то вам нужны данные в кДж/кг и представление о мире в пересчете на «кг». Но не всегда. Если оно – то, что вы создаете, – должно летать или лежать в кармане, т.е. важен вес, то именно в кДж/кг. Но если оно стоит на земле, то вес менее важен, но может быть более важен объем, и нужны данные в кДж/м³. Вообще, эти два подхода, физический и инженерный, тесно связаны, но традиции несколько различаются. Например, когда речь идет об электрических свойствах, физики чаще говорят об удельной проводимости, а инженеры – об удельном сопротивлении. Поэтому формулу $R = \rho l/S$ физик скорее напишет $R = l/(\sigma S)$, где σ – удельная проводимость; хотя во многих учебниках физики традиционно пишут как электрики, а иногда приводят две формулы рядом.

Для физика вещества с крайними значениями удельной теплоты плавления – это, скорее всего, гелий He и водород H (0,12 кДж/моль) и вольфрам W (35 кДж/моль). А для инженера – ртуть Hg (12 кДж/кг) и алюминий Al (390 кДж/кг). В качестве примера вещества с большой удельной теплотой плавления часто называют воду H₂O и аммиак NH₃, но у них чуть меньше – 330 кДж/кг. Теплота фазового перехода важна для инженера почти всегда, когда в устройстве происходит сам этот процесс, т.е. когда что-то плавится или замерзает (или кипит и конденсируется, но об этом – ниже).

Например, предлагалась защита приборов (транзисторов) от перегрева размещением в изолированном объеме плавящегося при перегреве вещества. Понятно, что такая защита работает только при относительно редком и не слишком сильном перегреве – в промежутках между «перегревами» вещество должно

успеть отдать тепло в окружающую среду и кристаллизироваться. Другая ситуация, когда теплота плавления весьма важна, – работа плавких предохранителей. И еще она важна для природных процессов и, соответственно, для всех, кто занимается моделированием климатических процессов, таянием льдов, замерзанием водоемов и так далее.

Но есть ситуация, когда вокруг этой цифры просто вертится все, – это теплоаккумуляция.

Аккумуляция вообще и теплоаккумуляция в частности

В технике есть такая задача – аккумуляция энергии. Надо ли объяснять это вам, окруженным аккумуляторами и батарейками? И не вздумайте мне их перепутать. Будет минус балл на экзамене, и не ЕГЭбалл, и не ВШЭрейтинг, посчитанный до энного знака офисным планктоном, а старый добрый БАЛЛ – который с «5» опускает на «4», с «4» сбрасывает до «3», а далее – выносит за дверь и на пересдачу. Кстати, тут можно задуматься – а в чем разница между аккумуляторами и гальваническими элементами, которые в просторечии называют батарейками? Что будет, если попробовать заряжать батарейку? В зависимости от разных параметров зарядного устройства? Подсказка – если вздумаете делать эту глупость, обязательно наденьте очки и проверьте, течет ли из крана вода.

В технике есть более чем серьезная задача – аккумуляция энергии, и речь идет не об игрушке в кармане, а о суточном потреблении большого города и более того. Причина постановки задачи проста – графики выработки энергии и ее потребления не совпадают. Устройствам, сжигающим ископаемое топливо, и атомным реакторам лучше работать в каком-то одном режиме, без колебаний мощности. У солнечных батарей свой график – днем одно, ночью другое, осадки тоже влияют. Работа гидростанций сезонна, ветростанций и приливных станций – зависит от погоды. А потребляет человек или непрерывно (многие производства), или с суточными и недельными колебаниями (в быту), или – довольно редко – импульсно. Кстати – лучше не говорите «выработка энергии» и «потребление энергии». Энергия вечна, ее нельзя вы... это самое и потре..., можно лишь преобразовывать! Если уж приспичило, то говорите «выработка тепловой энергии», «потребление электроэнергии», «преобразование энергии». И все поймут, что учебники физики – ваше любимое чтение. Конечно, после Стругацких, Лема, Борхеса, Ремарка и далее по списку. Например, вот по этому <http://>

lit.lib.ru/a/ashkinazi_1_a/text_0140.shtml или по другим спискам, указанным там.

Способов аккумулировать энергию много, например водохранилища – это именно энергоаккумулятор. Сплошной *mg*h, и рыбки плавают. Так вот, один из видов аккумулятора энергии – это теплоаккумулятор. Идея аккумулировать энергию в виде тепла особенно соблазнительна, если первичный источник вырабатывает тепло или мы хотим потреблять тепло, а уж если и то и то – мы вообще избавляемся от преобразований с их сложностями и потерями. Например, если мы хотим стабилизировать температуру в доме или в теплице, сгладить колебания между жарким днем и холодной ночью или между жарким летом и холодной зимой. Естественное решение – либо просто взять вещество с большой теплоемкостью (об этом позже), либо воспользоваться фазовым переходом плавлением–замерзанием или кипением–конденсацией (об этом переходе тоже позже). Но возникает серьезное ограничение – другой параметр, а именно температура того перехода. Понятно, что ртуть и алюминий – экзотические решения; если речь идет о быте, то надо использовать вещества, у которых фазовый переход происходит не намного выше 20 °С. Это, например, различные парафины с температурами перехода 30–65 °С и теплотой фазового перехода 150–200 кДж/кг. Не рекорд, но тоже совсем неплохо.

Кипение и температура

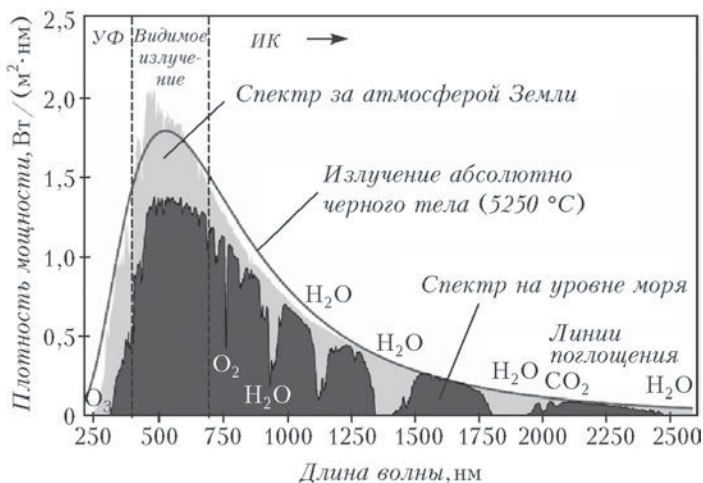
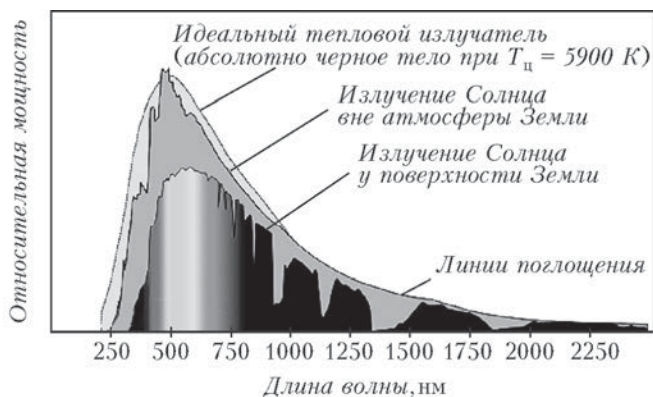
С температурой кипения ситуация существенно сложнее, чем с плавлением, – она сильно зависит от давления. При обучении чему-то под названием «физика» спрашивают, «можно ли сварить кашу в горах». Правильно ответить может и маргашка, а вот понять и объяснить хотя бы на два шага в глубину – это сложнее. Если предельно кратко, то кипение – это увеличение скорости потери массы нагреваемым веществом в результате всплытия пузырьков, наполненных паром, и выброса этого пара вовне. Смущенно опустив глаза и обойдя весьма сложный вопрос о возникновении пузырьков, с которых начинается кипение, делаем вывод – для всплытия с ростом и с приемом в себя все большего количества пара нужно достижение температуры, при которой давление насыщенного пара жидкости (мы считаем, что оно успевает установиться и что в пузырьки не попадает растворенный в жидкости газ) будет больше внешнего плюс давление столба жидкости. Отсюда немедленно вывод – в вакууме вода закипит при любой температуре, даже ниже 0 °С, т.е. переохлажденная! Поэтому будем говорить о кипении при

давлении в одну атмосферу. Тогда на одном краю шкалы все просто – гелий ${}^3\text{He}$ кипит при 3,2 К, ${}^4\text{He}$ – при 4,2 К. На другом, в области высоких температур, краю – тантал Ta 5460 °С, вольфрам W 5560 °С и рений Re 5600 °С, т.е. все три температуры – хочется сказать, «как на Солнце». Но надо еще разобраться, что такое «температура на Солнце». Примечание: данные в разных источниках заметно различаются, эти – с сайта <http://www.periodictable.com/>

Физические данные могут быть получены, в принципе, четырьмя способами – прямым измерением, косвенным измерением, расчетом и экстраполяцией. На самом деле почти всегда, изучая конкретную ситуацию, можно увидеть переплетение и взаимодействие всех четырех способов. В конце концов, точнее – в начале начал, любой прибор опирается на эталоны и прямые измерения, но сам по себе является методом косвенного измерения. Не сидит же внутри амперметра человек, который делит уголком заряд на время, не носит он на вольтметр заряд и не измеряет работу по переносу... Давление при этих температурах измерить прямо, в соответствии с определением, нельзя. Но можно поискать какой-то физический эффект, про который надежно известна его зависимость от давления, и измерить его. Такой способ непременно включает расчет, а если мы выходим за границы освоенного диапазона – то и экстраполяцию. Но вот что присутствует во всех четырех способах – это понимание того, «как устроен мир». Поэтому никогда не задавайте дурацкий вопрос – «что важнее, теория или практика». А того, кто задаст его вам, посылайте туда, где умеют отделять одно от другого. Вы еще долго его не увидите...

Что же до температуры Солнца, то – пока мы еще туда не добрались – определяют ее косвенно, по излучению. Так что правильнее говорить «температура фотосферы Солнца» или, на худой конец, «видимая температура Солнца». Имеется в виду температура так называемого «черного тела» (или «серого тела», излучающего не селективно), которое имеет спектр излучения, наиболее близкий к спектру излучения Солнца. Но если кто-то повторит то, что говорит по этому поводу большой, но тупой Google («5778 К») – то за непонимание физики сразу минус балл и еще минус балл за попытку замены мозгов вай-фаем. Спектр излучения Солнца формируется не слишком глубокими его слоями – от глубоких не долетают кванты, они успевают поглотиться внутри. И не слишком внешними слоями – их плотность мала, и излучения от них мало. Те слои, которые в основном формируют излучение, достигающее Земли, и назы-

ваются фотосферой, и ее температура, определенная по спектру излучения, составляет около 5500–6000 К. Называние более «точного» значения свидетельствует о непонимании физики. Во-первых, температура в разных точках разная. Во-вторых, разная в разные моменты. В-третьих, спектр не является «чернотельным», и приближать его к таковому можно разными способами. Поэтому в разных публикациях его и указывают по-



Спектры излучения Солнца по разным источникам. Обратите внимание – разные авторы аппроксимируют спектр по-разному и указывают разные температуры. Показаны полосы поглощения компонентами атмосферы

разному. Что вы скажете, если я назову свой рост с точностью до десятых долей миллиметра или вес с точностью до 10 граммов? Далее, не надо путать спектр излучения, достигающий поверхности Земли, спектр в космосе и спектр излучения самой фотосферы (кое-что поглощается самим Солнцем, но в более высоких слоях). В общем, надо знать и понимать физику – хоть чуть-чуть. И тогда не будет так страшно.

Вернемся, однако, в криогенную область. Если посмотреть физические журналы, то видно, что большинство исследований в области низких температур (особенно старых работ) было выполнено при вполне определенных температурах, в частности – при 77,8 К и 4,2 К. Это температуры кипения жидкого азота N_2 и гелия He при атмосферном давлении, и, стало быть, «самостабилизирующиеся» температуры. Иными словами, если я хочу исследовать что-то при низких температурах, то проще всего заказать сжиженный N_2 или He, получить его, охладить им свой объект и работать, пока хладагент не выкипит. Существенно сложнее получить промежуточные температуры. Один из способов – откачка воздуха и паров хладагента из пространства над ним, при этом температура кипения уменьшается.

В технике зависимость температуры кипения от давления важна всегда, когда кипение происходит в замкнутом объеме. В быту это так называемые «скороварки», в технике – все системы с кипением жидкого теплоносителя в замкнутом объеме, в частности – «тепловые трубы», о которых мы еще поговорим. В скороварке используется увеличение температуры кипения при увеличении давления. А в системах с жидким теплоносителем может использоваться как уменьшение, так и увеличение температуры кипения. Например, если надо охладить сверхпроводящий кабель до температуры ниже температуры кипения жидкого азота, то применяют откачку его паров и воздуха. А если мы хотим охладить что-то водой при температуре выше 100 °С, не допустив кипения, то нужно изолировать объем от атмосферы (как в скороварке). А не допустить кипения жидкого теплоносителя может быть важно потому, что при приближении к точке кипения охлаждаемая поверхность покрывается пузырьками, которые ухудшают теплообмен. Впрочем, для охлаждения можно использовать именно кипение с его большой теплотой фазового перехода, но тогда устройство должно рассчитываться и конструироваться совершенно по-другому.

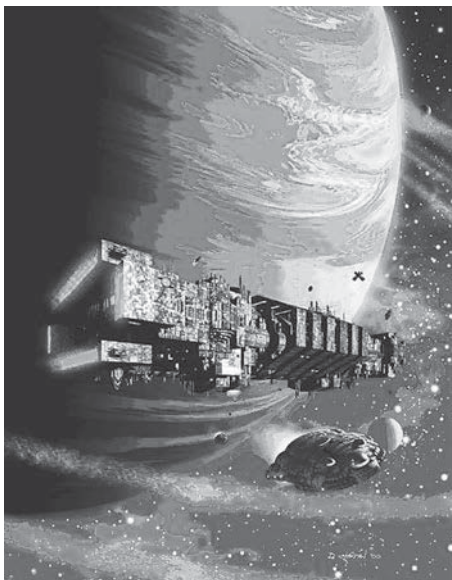
Кипение и теплота фазового перехода

Минимальная теплота испарения у гелиев – ${}^4\text{He}$ (0,084 кДж/моль) и ${}^3\text{He}$ (0,047 кДж/моль), или, соответственно, 20,6 и 15,6 кДж/кг. Максимальная теплота испарения с точки зрения физика – у вольфрама W (800 кДж/моль) и тантала Ta (750 кДж/моль), а с точки зрения инженера – у лития Li (20500 кДж/кг) и алюминия Al (10900 кДж/кг). Физик бы мог указать инженеру на углерод C и его 50000 кДж/кг, но к идее использовать углерод в качестве хладагента при 4000 °С инженер отнесется с некоторой настороженностью (Al и Li с давлениями пара 1 атм при 2300 °С и 1300 °С тоже выглядят странно, но все же как-то привычнее). В технике используются, в частности для теплоизоляции космических аппаратов и ракет, входящих в атмосферу, так называемые «абляционные покрытия» (их еще называют «жертвенные покрытия»), которые защищают лишь на короткое время, испаряясь или разрушаясь. Они работают при весьма высоких температурах и, что более важно, в условиях, когда нельзя просто сказать «при такой-то температуре». Потому что сама их температура зависит от их параметров – если материал имеет высокую теплопроводность (при этом он хуже защищает аппарат), то сам греется меньше, а если низкую теплопроводность – то сильнее. А как зависит нагрев от теплоты фазового перехода – подумайте сами.

Реально выбор теплоносителя для испарительного охлаждения определяется, прежде всего, рабочей температурой, а она – температурой, при которой надо отводить тепло от охлаждаемого объекта. Например, если речь идет о температуре около 100 °С, то у воды H_2O с ее 2250 кДж/кг нет конкурентов. Если мыслить в кДж/моль, то рядом с водой (40,5 кДж/моль и 100 °С) мы обнаружим D_2O (41,7 кДж/моль и 101,4 °С), NbF_5 (36 кДж/моль и 79 °С), N_2O_4 (38,1 кДж/моль и 21 °С) и VF_5 (44,5 кДж/моль и 48 °С), но при пересчете в кДж/кг они все проиграют воде. Температура порядка 100 °С и несколько ниже представляет интерес потому, что это область температур, из которой предпочитают не выбираться вверх многие полупроводниковые приборы. Существуют и более высокотемпературные, и в целом полупроводниковая техника понемногу осваивает более высокотемпературные материалы, но системы охлаждения всегда будут важны по очень простой причине – с увеличением температуры уменьшаются надежность и срок службы. А так хочется, чтобы они были побольше...

Обратная задача энергетики

Некий физик работал на космической станции около некой планеты, похожей на Юпитер Солнечной системы, только еще больше, еще загадочнее. Рассказывая о ней в письме другу с Земли, он написал: «На южном – так уж мы называем



Космическая станция около некой планеты, похожей на Юпитер Солнечной системы...

– полюсе у нас радиаторы, четыре сияющих цилиндра – сброс избытка энергии из энергоблоков – сложно регулировать мощность энергоблоков, проще перераспределять». Вообще-то, автор картины, изображенной на фотографии, – Dominic E. Harman. Поищите в интернете его картинки; нельзя же заниматься круглые сутки физикой, надо и на картинки смотреть!

Обычные для энергетики задачи – обеспечить энергию, необходимую для перемещения чего-либо (транспорт), нагрева чего-либо или осуществления фазовых переходов (отопление, плавление, испарение) и проведения химических процессов. Устройство, которое поставляет нам энергию, принято называть источником энергии, хотя с точки зрения физики оно является преобразователем. Для разработки этих «источников энергии» нужно их испытывать. При этом выдаваемую энергию кто-то

должен потреблять, имитируя эксплуатацию в тех или иных условиях.

Если «источник энергии» – устройство, которое способно что-то нагревать, плавить и испарять, то проблема решается просто: нагретое можно выкинуть вон, хотя разумнее, если это возможно, использовать его для отопления или для чего-то подобного. Правда, при «выкидывании» тепловой энергии возникает так называемое тепловое загрязнение среды, но оно возникнет в любом случае. А что делать, если мы имеем дело с источником электрической энергии? Хорошо бы, конечно, воткнуть провода в землю и начать просто греть ее протекающим током. Разумеется, жалко червей и корни растений, но основная проблема в том, что сопротивление земли изменяется на несколько порядков в зависимости от типа почвы и ее влажности. Можно попробовать энергию излучать – в атмосферу или в космос.

Максимальный КПД лазеров и светодиодов – около 50 %, значит, «высветить в никуда» удастся лишь около половины, и наша нагрузка все равно должна уметь рассеивать большую мощность в виде тепла. Тепловой поток тем больше, чем выше температура нагревателя, следовательно, если мы не хотим строить целое здание, чтобы рассеять мегаватт, надо идти по пути увеличения температуры. Большинство проводников при высоких температурах окисляются. Отсюда первое решение – лампы накаливания, скорее всего – галогеновые (у них меньше габариты) или газоразрядные лампы. Галогеновые лампы бывают мощностью до 2 кВт, газоразрядные лампы – до 100 кВт, но их эксплуатация требует сложной схемы (обеспечение зажигания разряда) и им противопоказан режим изменяющейся мощности. Галогенки в этом смысле неприхотливы, они не нуждаются в специальных схемах: есть напряжение – рассеивают мощность, нет – терпеливо ждут.

Теплоотвод в общем случае тем эффективнее, чем горячее охлаждаемое тело. Тут есть сложность: если увеличивать количество теплоты, подводимое к охлаждаемой поверхности, то при некоторой температуре на поверхности образуется паровая пленка, которая радикально уменьшает теплоотвод (так называемый кризис кипения). Бороться с этим явлением можно двумя способами: увеличивая скорость движения жидкости и переходя к охлаждению «водяным туманом» – потоком воздуха, несущим капли жидкости, вскипающие при попадании на охлаждаемую плоскость. Но если пока пренебречь этими сложностями и хитростями, то остается вопрос – куда в итоге

девать отводимую мощность. Можно обдувать лампы потоком воздуха, можно греть лампами воду, можно, наконец, ее испарять.

Заметим, что воздух в основном прозрачен для излучения галогеновых ламп с длинами волн 1–2 мкм, поэтому при охлаждении воздухом около трети излучения поглотится в атмосфере, остальное уйдет к далеким звездам. С водой ситуация иная: в слое в несколько сантиметров излучение поглощается заметно, а в слое в 0,5 метра – почти полностью. Поэтому облегчается решение проблемы с кризисом кипения – тепло будет поглощаться не на поверхности, а всем объемом теплоносителя. Итак, представьте себе: бурлящий котел с водой, столб пара, причем этот столб сияет, ибо сквозь него уходит к далеким звездам свечение ламп. Осталась мелочь – экспериментально проверить, долго ли проживет галогенка в кипятке. Если вздумаете... только под наблюдением взрослого, знающего, какое напряжение в розетке (кстати, какое?), проверив работу предохранителей и надев очки. Обязательно: пальцев хоть десять, а глазиков-то в пять раз меньше.

Но есть радикально иной способ – химический: проведение сильно эндотермических реакций. Очень энергоемкий процесс – разрыв химических связей. Сравним его со стандартным способом теплоотвода с помощью воды. Один литр воды, нагреваясь на один градус, забирает 4,2 кДж. Если нагреть эту воду от 20 °С до кипения, можно отнять уже 336 кДж. А если всю эту воду испарить, а пар выбросить, то к этим 336 кДж добавится 2256 кДж. Всего получится около 2600 кДж. Теперь возьмем литр условного вещества с небольшой энергией диссоциации 100 кДж/моль (для сравнения: энергия диссоциации связи Н–ОН 494 кДж/моль). Пусть плотность этого вещества равна 1 кг/дм³, а молярная масса – 100 г/моль. Тогда для диссоциации всех связей в 1 л (1 кг, 10 моль) вещества понадобится 1000 кДж тепловой энергии. Величина сравнима с получаемой при использовании в качестве теплоотвода воды. Однако здесь есть принципиальное отличие: данное вещество, поглощая тепловую энергию, может нагреваться незначительно.

Какое же конкретное вещество можно использовать для отъема теплоты – тут начинаются сложности, которыми, очевидно, и объясняется исключительно малая распространенность такого способа. Помимо того что вещество желательно использовать нетоксичное и некорродирующее, возникает проблема с продуктами диссоциации. Их придется выбрасывать в атмосферу, и здесь трудно предложить что-либо, кроме все той же воды.

Однако для диссоциации воды всего на 5 % требуется нагреть ее до 2400 °С – так что термическую диссоциацию использовать не удастся.

Попробуем использовать разрыв химических связей. Как мы помним, 1 л воды, нагретый от 20 °С и полностью испаренный при температуре кипения, «уносит» 2600 кДж. Воду можно разложить электролизом на водород и кислород, но для повышения электропроводности в воду придется добавить электролит, например щелочь или нейтральную соль – сульфат натрия и т.п. И вот на катоде идет реакция $2\text{H}_2\text{O} + 2e^- = \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$, а на аноде – реакция $2\text{H}_2\text{O} - 4e^- = \text{O}_2 + 4\text{H}^+$, суммарная реакция разложения воды: $2\text{H}_2\text{O} = 2\text{H}_2 + \text{O}_2$. Из электродных реакций следует, что для разложения шести молей (108 г) воды требуется $4F$ электронов, где F – постоянная Фарадея, равная примерно 96500 Кл/моль. Итак, для разложения 1 литра воды потребуется заряд $3,57 \cdot 10^6$ Кл. Энерготраты зависят от напряжения на электродах: энергия $E = UIt = UQ$ (U – напряжение, I – ток, t – время, Q – заряд). Пусть $U = 10$ В, тогда на электролиз 1 л воды потребуется $3,57 \cdot 10^7$ Дж = 35700 кДж – почти в 15 раз больше, чем на нагрев и испарение воды, и в 100 раз больше, чем на ее нагрев до кипения. Нужно только позаботиться, чтобы в ходе электролиза раствор сильно не нагревался. Для этого нужно по возможности снизить плотность тока, т.е. взять электроды большой площади, а расстояние между ними уменьшить, чтобы снизить сопротивление раствора и тепловыделение в нем. Таким образом, разложение воды электролизом – процесс, в смысле поглощения энергии, намного более эффективный, нежели ее испарение. А водород и кислород мы отправим в атмосферу – водород сам проследует наверх, а добавки кислорода мы и не заметим.

Примечание. Этот раздел – сокращенный текст нашей давней статьи с химиком Ильей Леенсоном. Если кто колеблется между физикой и химией и хочет Физике изменить, причем с Химией, – рекомендую поискать его книжки в интернете.

Теплопроводность и тепловые трубы

Сначала дадим ей определение – потому что не во всех учебниках оно есть (и это странно – с теплопроводностью и теплоизоляцией человек сталкивается чаще, чем с электропроводностью и электроизоляцией). Пусть у нас есть плоский слой вещества толщиной d и площадью S , и на его сторонах поддерживаются температуры T_1 и T_2 . Тогда поток тепла через участок этого слоя площадью S будет $N = (T_1 - T_2)S\lambda/d$, где λ – как раз

теплопроводность. Выражаясь проще, у меди Cu теплопроводность $380 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, у алюминия Al – немножко меньше, а вот у пенопласта (и похожих на него материалов) – $0,03\text{--}0,04 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Поэтому радиаторы делают из меди или алюминия, а теплоизоляцию – из пенопласта.

Теплопроводность зависит прежде всего от температуры, но если сравнивать материалы при температурах порядка комнатной, то максимальной она будет из металлов именно у меди, а из диэлектриков – у алмаза C $1000\text{--}2500 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. В полупроводниковой технике часто требуется изолятор с большой теплопроводностью, поэтому алмазные подложки для микросхем и алмазные выводы энергии для мощных электронных приборов начинают использовать, но уж очень они дороги и сложны технологически. Пока что в качестве изоляторов с большой теплопроводностью используют оксид бериллия BeO и нитрид алюминия AlN – оба имеют теплопроводность около $200 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, карбид кремния SiC $350\text{--}450 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Для получения максимальных значений теплопроводности надо использовать монокристаллы, причем не какой попало ориентации, а правильной, но это сложная и не всегда разрешимая проблема. Чаще техника использует керамики – прессованные и спеченные порошки или же напыленные пленки. Тогда все зависит от используемой технологии, а конкретно – от пористости (чем она меньше, тем теплопроводность выше) и главное – от площади контактов между спеченными частичками. Потому что именно маленькие контактные площадки создают основное сопротивление потоку тепла (так же, как и электрическому току). А площадь контактов сильно зависит от температуры и времени спекания и от содержания примесей. Поэтому различие в несколько раз, встречающееся среди данных разных работ, не удивительно.

Если мы отправимся в область высоких температур, то, как и в случае с электропроводностью, все будет определяться остальными параметрами материала, прежде всего – термостойкостью, т.е. температурой плавления или разложения, а также потерей прочности при нагреве.

В сторону низких температур теплопроводность сначала растет, потом падает. В максимуме значения у некоторых веществ достигают $2 \cdot 10^4 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. При этом диэлектрические кристаллы могут иметь теплопроводность такую же, как и металлы. Сапфир Al_2O_3 имеет $2 \cdot 10^4 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ при 30 К , а медь в максимуме – $10^4 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Почему важна и зачем нужна высокая теплопроводность? Ответ «чтобы проводить тепло» – не вполне правильный. Тепло,

выделяющееся в каком-либо приборе, в устройстве, в каком-либо объеме, всегда в итоге из него выйдет. Вопрос в том, до какой температуры при этом нагреется источник. Чем лучше теплоотвод, тем при меньшем перегреве тепло будет отведено. А с уменьшением перегрева возрастает срок службы и улучшаются многие параметры. Поэтому задача любого теплоотвода, любой системы охлаждения – вывести тепло при возможно меньшем перепаде температур между прибором и окружающей средой. Вот зачем нужны материалы с высокой теплопроводностью.

С минимальной теплопроводностью ситуация сложнее. Традиционно используемое в качестве теплоизоляции (мех, пух, пенопласт, асбест, шерсть) – это композиты, где большую часть объема занимает воздух, а остальное – тонкие нити или лепестки. У воздуха низкая теплопроводность потому, что там мало молекул, переносящих энергию, а у нитей или лепестков – потому, что они тонкие и их суммарное сечение мало. Причем сам воздух должен быть разделен этими нитями/лепестками на маленькие ячейки, иначе начнется конвекция. Немедленно возникает несколько вопросов – какой газ брать, какие и сколько нитей, а еще мы забыли про перенос энергии излучением. Газ, конечно, лучше с тяжелыми молекулами, но выигрыш невелик, а удорожание заметно. Кроме того, если этот газ – не воздух, то систему надо герметизировать, а это не всегда возможно: стеклопакет герметизировать можно, но трудно представить герметизированный пуховик. Конечно, сделать это можно, но в отсутствие вентиляции получится «спортсмен в собственном соку». С вытекающими из него последствиями.

Насчет нитей и лепестков главное, чтобы ячейки были маленькими, иначе опять же возникает конвекция. Сами они должны быть достаточно прочными, чтобы материал не разрушался при эксплуатации, и тут все зависит именно от условий. Теплозащита из кварцевого волокна на «Шаттле» – это одно, углеродное волокно на обтекателях ракет – немного другое, хоть и похожее, пух в пуховике – третье, пенопласт в пенопластовом коврике – четвертое и так далее до бесконечности.

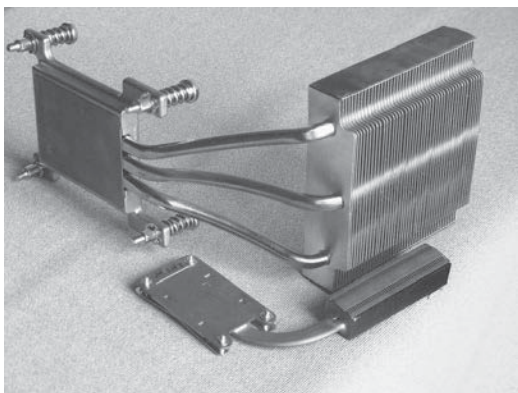
Вот почему физики, материаловеды и инженеры никогда не останутся без работы до тех пор, пока человеку и человечеству будет что-то интересно. Пока люди будут летать, подниматься, спускаться, стремиться, интересоваться...

Если же говорить о компактных веществах, однородных, без «пор» и прочих глупостей, то среди металлов наименьшая теплопроводность у висмута Bi $7 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ – хотя какой это металл, его даже относят к «полуметаллам». А из диэлектриков

– возможно, это воск с $0,09 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ или парафин ($0,25 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$). Из газов при нормальных условиях максимальная теплопроводность, естественно, у водорода H_2 ($0,19 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$), минимальная у CCl_4 , CCl_2F_2 и SF_6 – около $7 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Из жидкостей при нормальных условиях (и, опять же, при отсутствии конвекции) максимальная теплопроводность у воды H_2O ($0,6 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$), минимальная – у $\text{C}_2\text{Br}_2\text{F}_4$ ($0,06 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$). Но мы забыли про жидкие – при нормальных условиях – металлы: у ртути Hg теплопроводность $8 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, а у сплава $\text{Na } 25\% - \text{K } 75\%$ это $22 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

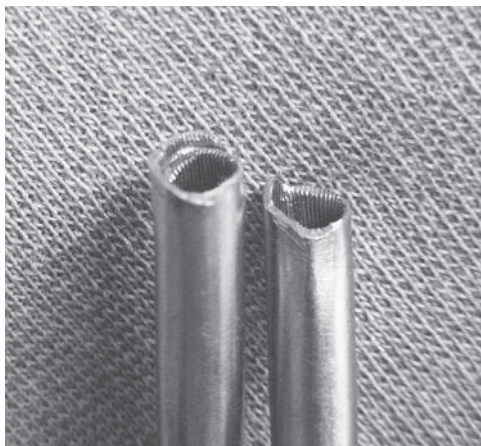
Если же конвекцию не исключать, то максимальная теплопроводность будет у сверхтекучего гелия – она зависит от температуры и при $0,7 \text{ К}$ достигает $5000 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ – на порядок больше, чем у меди при комнатной температуре. Впрочем, характеризовать способность передавать тепло такого вещества коэффициентом теплопроводности не вполне корректно, поскольку передача происходит одинаково на разные расстояния (приведенные данные – для 8 мм)! И такая ситуация в теплофизике не уникальна – она, может быть, имеется у вас в компьютере, хотя сверхтекучего гелия там, скорее всего, нет. Сейчас мы с ней познакомимся поближе. Нет, отвертка не потребуется.

Вот еще об одной ситуации, когда теплопроводность больше, чем у меди, и о том, теплопроводность ли это. Рассмотрим тепловую трубу. Слева направо тепло распространяется по



Внутри трубы – теплоноситель. Один из концов трубы (на фото – левый) контактирует с объектом, от которого надо отводить тепло (в данном случае – от процессора или иной микросхемы). На правом конце – радиатор, тепло с которого снимается потоком воздуха

трубе, и пусть вас не удивляет, что она тонкая. На левом конце испаряется теплоноситель, на правом он конденсируется и возвращается капиллярными силами налево по рифленой внутренней поверхности. При этом поток тепла оказывается существенно больше, чем если бы на месте трубочек оказалась массивная



На внутренней поверхности трубы – рифление

медная штанга. Формально, применяя приведенную выше формулу для потока тепла, можно вычислить теплопроводность; ее правильнее называть «эквивалентной». Однако эта формула неприменима для расчета любых тепловых труб, даже на одном и том же теплоносителе – поток тепла не всегда окажется



Столовая моей alma mater, МИЭМа; когда-то здесь кормили вкусно и недорого

пропорционален площади сечения и обратно пропорционален длине. Кстати, подумайте – почему?

Аналогичный механизм теплопередачи (одновременно со стабилизацией температуры) применяется в столовых – на плиту ставится кастрюля с водой, а сверху – противень с едой. А вот почему – подумайте – при этом стабилизируется температура?

Коротко про три «тепло»

В школьном курсе упоминается теплоемкость и дается некая формула, упоминается теплопроводность, но без формулы, чтобы детки не перетрудились, и совсем не упоминается некая «температуропроводность». Определения теплоемкости и теплопроводности даны выше. Раз это свойства одного объекта, одного материала, то они обязательно связаны, но связь эта может быть весьма сложной. Причем неправильно искать, кто из них чье следствие, чаще они оба – следствия каких-то более глубоких, более фундаментальных параметров (в физике их иногда называют «первые принципы»). Но в одном случае все относительно просто – если говорить о композиционных материалах, т.е. теплоизоляторах с воздухом внутри, то у материалов с малой теплопроводностью мала и теплоемкость, потому что в них мало «материала», а в основном в них воздух. У однородных материалов жесткой связи нет, материал с рекордным значением одного параметра не обязан иметь рекордное значение второго.

Теплоемкость – это именно поглощение и запасание тепла, а теплопроводность – это его проведение. Что касается используемого в литературе параметра «температуропроводность», то это как раз комбинированный параметр, он равен отношению теплопроводности к произведению плотности на теплоемкость. Подумайте минуту – и поймете, что значения этого параметра говорят как раз о том, быстро ли выравнивается температура в куске неоднородно нагретого материала или быстро ли приобретает кусок материала температуру окружающей среды. Значения этого параметра для многих материалов лежат в пределах от $7 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ (поливинилхлорид, нейлон, дерево) до $1,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ (серебро Ag) и $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ (гелий He и водород H₂). А всех их превзошел монокристалл углерода C, причем именно вдоль плоскостей – $10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$. Подумайте – почему?

ВРОДЕ БЫ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

О познаваемости

Есть три подхода к познаваемости мира вообще.

Первый – тихо и безнадежно согласиться, что мир велик (или мал), просторен (или тесен), прекрасен (или ужасен), но, главное, непознаваем. Психологически это для некоторых комфортно – раз непознаваем, то можно расслабиться, лечь под банановое дерево (хотя оно, конечно, трава) и ждать, пока банан сам плавно залетит в рот, ошкурившись на лету.

Второй вариант: мир познаваем, но уже познан – тут импозантный дядя с хорошо наетым животом, тренированным бархатным голосом и часиками, на которые вам за год не заработать, говорит, что знает вообще все, и ничего, кроме этого, вам знать не надо, и думать не надо, а лучше всего просто его слушать, верить и пополнять его карманы. И вообще, физика, биология и геология – обман, потому что все было не так, а гораздо проще и быстрее. Результат, как ни странно, тот же: можно расслабиться – делать ничего не надо. Разница в том, что проповедники «уже познанны» выглядят лучше проповедников непознаваемости, значит, лучше ведут свой немаленький бизнес.

Третий подход плох тем, что надо что-то делать. Мир познаваем, частично познан, наши действия могут привести к большей познанны, процесс познания приятен сам по себе плюс позволяет посредством инженерии, базирующейся на физике, сделать жизнь людей лучше. Хотя бывают и ошибки (в науке), и уродства (в сфере разработок), и опасности (чего мы только в детстве не вытворяли и каких глупостей во всех странах и мерзостей в некоторых не вытворяют политики), но как себя вести – это уж от нас самих зависит.

Остановись, отложи книгу или останови скроллинг и подумай – какой из трех путей твой?

Если первый или второй, то время на чтение ты потратил зря – но это не имеет значения: лежать под бананом можно не торопясь. А если третий – представь себе, что приезжает в Москву с островов Тихого океана тамошний житель и произносит, что хочет, просто всей душой, даже мечтает изучать физику в Физтехе или МГУ. Удивительно и похвально, но что-то

вызывает у вас сомнение. И спрашиваете вы его, знает ли он русский язык? И выясняется, что знает эту единственную фразу. Или вот пример, более реальный. Эмигрирует семья из России в Америку, и ребенок, который учился здесь в хорошей математической школе, но английский знает на уровне «ит из э кэт», приходит там в школу. И выясняется, что изучать математику на хорошем уровне он не может, потому что математика там преподается на английском языке, а с ним у ребеночка горячая собака. Ну, а потом его обиженные родители пишут статьи, что в Америке не преподают математику, и эти статьи здесь, в России, печатают не только желтые газеты, но и вроде бы приличные журналы.

Так вот, физика разговаривает на языке математики, а физики, кроме своего родного языка (японского, русского, китайского и так далее) – еще и на английском, и чем дальше, тем больше. Поэтому, если вы хотите серьезно изучать физику и делать ее, вам потребуются математика и английский, причем математики потребуется много. Вам уже понятно, что надо делать? Да, конечно.

А на прощание – немного про загадочное и красивое.

Про загадочное и красивое

Задачи, как физические, так и инженерные, бывают разные. Параметров у задач много – например, трудоемкость решения, вероятность решения, важность для науки, важность для практики, моральность участия в решении, этичность предъявления решения людям и другие. И хотя у физика и метролога нет готового способа все это измерить, но какое-то интуитивное представление есть, и на основе этой интуиции, на самом деле обобщая опыт, можно в некоторых случаях выработать согласованный метод оценки. Но не во всех – например, моральность участия в разработке бактериологического оружия, наверное, будет оцениваться разными людьми по-разному.

Однако есть вещи, которые не касаются морали и этики, но согласованно оценить их трудно. Например, красоту. Лично для меня в понятие «красота задачи» входит возможность хотя бы частично рассказать об этой задаче школьникам. Не заменяя физику мутным набором словес, а ясно отделяя известное от неизвестного. По этому параметру не набирают очков изумительно красивые задачи космологии и элементарных частиц – да, они красивы и великолепны, но по-другому. Попытки журналистов рассказывать о них популярненько вызывают у

физика соболезнующую и смущенную улыбку... Другое дело, что лично мне делается легче жить, зная, что человек пытается решать – и решает! – некоторые из них. Не лично Джон и Иван, Абрам и Акико, а человек как институция. Как явление природы. Как «Великий All».

Реальные научные и инженерные задачи, которые можно, не обманывая школьников, им частично объяснить, есть. И было бы здорово написать об этом книгу... Но сейчас напишу всего лишь об одной из задач, имеющей прямое отношение к предыдущему материалу.

Для освещения нужно преобразовать электроэнергию или энергию, запасенную в топливе (газе, нефти, дереве), в электромагнитное излучение. Причем нужно, чтобы излучение происходило в видимой части спектра. Школьный учебник произносит «закон Вина» и показывает пальцем на Солнце. Все правильно, но при 6000 К все превращается в газ (учтите этот факт, когда соберетесь лететь на Солнце). Газы излучают намного слабее твердых тел – для того чтобы пламя могло давать свет, необходимо, чтобы в какой-то его части были частички несгоревшего углерода. Но это ограничивает температуру, значит, большая часть энергии будет излучаться в ИК-диапазоне. Греть помещение мы будем хорошо, но освещать – плохо. Как быть?

Когда-то для этой задачи было предложено такое решение – оптимизировать горелку так, чтобы добиться максимально возможной температуры пламени, но греть этим горячим и почти бесцветным (частички углерода сгорели!) пламенем нечто такое, что в этом пламени гореть не будет. Естественное решение – оксиды металлов, правда, некоторые из них белые, а значит, они плохо поглощают и, стало быть (Кирхгоф!), будут плохо излучать. Однако физико-химико-технологов древности эти глупости не напрягали, они брали окислы, совали их в пламя и смотрели, как они светятся. Берцелиус в 1825 году обнаружил, что хорошо светится ZrO_2 , Друммонд в 1827 году – что отлично светится CaO , Кламон применил в 1881 году MgO , Котинский в 1881 году попробовал SrO , Al_2O_3 и другие, Ауэр фон Вельсбах в 1885 году проверил и убедился, что лучше всего светятся оксиды редкоземельных металлов. И вот оно, открытие – он обнаружил, что ярче всего сияют смеси, причем достаточно добавить к ThO_2 1% CeO_2 , чтобы яркость свечения возросла в несколько раз.

Внимание, вопрос. Точнее – вопросы...

• Почему такое может происходить: из-за 1% – в несколько раз?!

• Если коэффициент излучения не зависит от длины волны («серое тело»), будет ли зависеть от этого коэффициента излучаемая во всем диапазоне частот мощность?

• Как должен зависеть от длины волны коэффициент излучения, чтобы лампа светила ярче?

• Если уж такое замечательное покрытие найдено, почему бы им не покрывать вольфрамовые нити ламп?

• И почему бы не попробовать использовать сами эти окислы как тело накаливания – при этих температурах они не изоляторы, а полупроводники?

• А это вопрос, который у вас возник вроде бы сам. Физика – это еще и придумывать вопросы?

Леонид Александрович Ашкинази

**РЕКОРДЫ И ПРЕДЕЛЫ,
или ВВЕДЕНИЕ В ЭКСТРЕМАЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

Библиотечка «Квант». Выпуск 136
Приложение к журналу «Квант» №1/2016

Редактор *В.А.Тихомирова*

Обложка *А.Е.Пацхверия*

Макет и компьютерная верстка *Е.В.Морозова*

Компьютерная группа *М.Н.Грицук, Е.А.Митченко*

Формат 84×108 1/32. Бум. офсетная. Гарнитура кудряшевская

Печать офсетная. Объем 4,5 печ.л. Тираж: 1-й завод 900 экз.

Заказ №

119296 Москва, Ленинский пр., 64-А, «Квант»

Тел.: (495)930-56-48, e-mail: math@kvant.ras.ru, phys@kvant.ras.ru

Отпечатано «ТДДС-СТОЛИЦА-8»

Тел.: 8(495)363-48-86, <http://capitalpress.ru>

ВЫШЛИ ИЗ ПЕЧАТИ КНИГИ СЕРИИ «БИБЛИОТЕЧКА «КВАНТ»

1. *М.П.Бронштейн*. Атомы и электроны
2. *М.Фарадей*. История свечи
3. *О.Оре*. Приглашение в теорию чисел
4. Опыты в домашней лаборатории
5. *И.Ш.Слободецкий, Л.Г.Асламазов*. Задачи по физике
6. *Л.П.Мочалов*. Головоломки
7. *П.С.Александров*. Введение в теорию групп
8. *В.Г.Штейнгауз*. Математический калейдоскоп
9. Замечательные ученые
10. *В.М.Глушков, В.Я.Валах*. Что такое ОГАС?
11. *Г.И.Копылов*. Всего лишь кинематика
12. *Я.А.Сморodinский*. Температура
13. *А.Е.Карпов, Е.Я.Гик*. Шахматный калейдоскоп
14. *С.Г.Гиндикин*. Рассказы о физиках и математиках
15. *А.А.Боровой*. Как регистрируют частицы
16. *М.И.Каганов, В.М.Цукерник*. Природа магнетизма
17. *И.Ф.Шарыгин*. Задачи по геометрии: планиметрия
18. *Л.В.Тарасов, А.Н.Тарасова*. Беседы о преломлении света
19. *А.Л.Эфрос*. Физика и геометрия беспорядка
20. *С.А.Пикин, Л.М.Блинов*. Жидкие кристаллы
21. *В.Г.Болтянский, В.А.Ефремович*. Наглядная топология
22. *М.И.Башмаков, Б.М.Беккер, В.М.Гольховой*. Задачи по математике: алгебра и анализ
23. *А.Н.Колмогоров, И.Г.Журбенко, А.В.Прохоров*. Введение в теорию вероятностей
24. *Е.Я.Гик*. Шахматы и математика
25. *М.Д.Франк-Каменецкий*. Самая главная молекула
26. *В.С.Эдельман*. Вблизи абсолютного нуля
27. *С.Р.Филонович*. Самая большая скорость
28. *Б.С.Бокштейн*. Атомы блуждают по кристаллу
29. *А.В.Бялко*. Наша планета – Земля
30. *М.Н.Аршинов, Л.Е.Садовский*. Коды и математика
31. *И.Ф.Шарыгин*. Задачи по геометрии: стереометрия
32. *В.А.Займовский, Т.Л.Колупаева*. Необычные свойства обычных металлов
33. *М.Е.Левинштейн, Г.С.Симин*. Знакомство с полупроводниками
34. *В.Н.Дубровский, Я.А.Сморodinский, Е.Л.Сурков*. Релятивистский мир
35. *А.А.Михайлов*. Земля и ее вращение

36. *А.П.Пурмаль, Е.М.Слободецкая, С.О.Травин.* Как превращаются вещества
37. *Г.С.Воронов.* Штурм термоядерной крепости
38. *А.Д.Чернин.* Звезды и физика
39. *В.Б.Брагинский, А.Г.Полнарев.* Удивительная гравитация
40. *С.С.Хилькевич.* Физика вокруг нас
41. *Г.А.Звенигородский.* Первые уроки программирования
42. *Л.В.Тарасов.* Лазеры: действительность и надежды
43. *О.Ф.Кабардин, В.А.Орлов.* Международные физические олимпиады школьников
44. *Л.Е.Садовский, А.Л.Садовский.* Математика и спорт
45. *Л.Б.Окунь.* α , β , γ ... Z: элементарное введение в физику элементарных частиц
46. *Я.Е.Гегузин.* Пузыри
47. *Л.С.Марочник.* Свидание с кометой
48. *А.Т.Филиптов.* Многоликий солитон
49. *К.Ю.Богданов.* Физик в гостях у биолога
50. Занимательно о физике и математике
51. *Х.Рачлис.* Физика в ванне
52. *В.М.Липунов.* В мире двойных звезд
53. *И.К.Кикоин.* Рассказы о физике и физиках
54. *Л.С.Понтрягин.* Обобщения чисел
55. *И.Д.Данилов.* Секреты программируемого микрокалькулятора
56. *В.М.Тихомиров.* Рассказы о максимумах и минимумах
57. *А.А.Силин.* Трение и мы
58. *Л.А.Ашкинази.* Вакуум для науки и техники
59. *А.Д.Чернин.* Физика времени
60. Задачи московских физических олимпиад
61. *М.Б.Балк, В.Г.Болтянский.* Геометрия масс
62. *Р.Фейнман.* Характер физических законов
63. *Л.Г.Асламазов, А.А.Варламов.* Удивительная физика
64. *А.Н.Колмогоров.* Математика – наука и профессия
65. *М.Е.Левинштейн, Г.С.Симин.* Барьеры: от кристалла до интегральной схемы
66. *Р.Фейнман.* КЭД – странная теория света и вещества
67. *Я.Б.Зельдович, М.Ю.Хлопов.* Драма идей в познании природы
68. *И.Д.Новиков.* Как взорвалась Вселенная
69. *М.Б.Беркинблит, Е.Г.Глаголева.* Электричество в живых организмах
70. *А.Л.Стасенко.* Физика полета
71. *А.С.Штейнберг.* Репортаж из мира сплавов
72. *В.Р.Полищук.* Как исследуют вещества
73. *Л.Кэрролл.* Логическая игра
74. *А.Ю.Гроссберг, А.Р.Хохлов.* Физика в мире полимеров
75. *А.Б.Мигдал.* Квантовая физика для больших и маленьких

76. *В.С.Гетман*. Внуки Солнца
77. *Г.А.Гальперин, А.Н.Земляков*. Математические бильярды
78. *В.Е.Белонучкин*. Кеплер, Ньютон и все-все-все...
79. *С.Р.Филонович*. Судьба классического закона
80. *М.П.Бронштейн*. Солнечное вещество
81. *А.И.Буздин, А.Р.Зильберман, С.С.Кротов*. Раз задача, два задача...
82. *Я.И.Перельман*. Знаете ли вы физику?
83. *Р.Хонсбергер*. Математические изюминки
84. *Ю.Р.Носов*. Дебют оптоэлектроники
85. *Г.Гамов*. Приключения мистера Томпкинса
86. *И.Ш.Слободецкий, Л.Г.Асламазов*. Задачи по физике (2-е изд.)
87. Физика и...
88. *А.В.Спивак*. Математический праздник
89. *Л.Г.Асламазов, И.Ш.Слободецкий*. Задачи и не только по физике
90. *П.Гнэдиг, Д.Хоньек, К.Райли*. Двести интригующих физических задач
91. *А.Л.Стасенко*. Физические основы полета
92. Задачник «Кванта». Математика. Часть 1
93. Математические турниры имени А.П.Савина
94. *В.И.Белотелов, А.К.Звездин*. Фотонные кристаллы и другие метаматериалы
95. Задачник «Кванта». Математика. Часть 2
96. Олимпиады «Интеллектуальный марафон». Физика
97. *А.А.Егоров, Ж.М.Раббот*. Олимпиады «Интеллектуальный марафон». Математика
98. *К.Ю.Богданов*. Прогулки с физикой
99. *П.В.Блиох*. Радиоволны на земле и в космосе
100. *Н.Б.Васильев, А.П.Савин, А.А.Егоров*. Избранные олимпиадные задачи. Математика
101. У истоков моей судьбы...
102. *А.В.Спивак*. Арифметика
103. *Я.А.Сморodinский*. Температура (3-е изд.)
104. *А.Н.Васильев*. История науки в коллекции монет
105. *И.Ф.Акулич*. Королевские прогулки
106. Исаак Константинович Кикоин в жизни и в «Кванте»
107. *Г.С.Голицын*. Макро- и микромиры и гармония
108. *П.С.Александров*. Введение в теорию групп (2-е изд.)
109. *А.В.Спивак*. Арифметика-2
110. *П.Г.Крюков*. Лазер – новый источник света
111. *А.Б.Сосинский*. Узлы. Хронология одной математической теории
112. *А.П.Пятаков, П.П.Григал*. Лаборатория на коленке
113. *А.А.Заславский*. Олимпиады имени И.Ф.Шарыгина

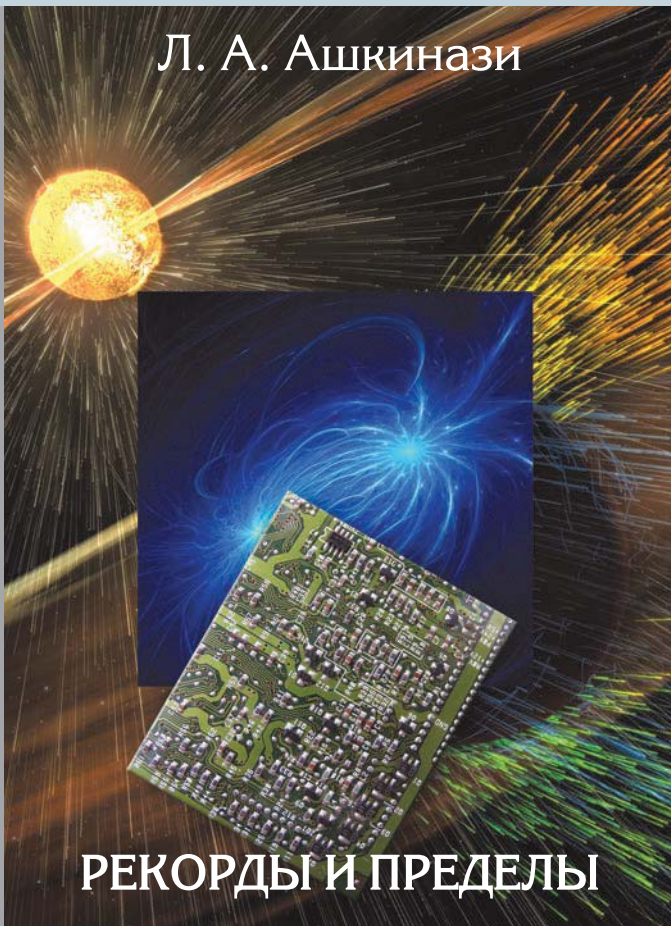
114. *С.В.Коновалихин*. Сборник качественных задач по физике
115. *Е.Я.Гик*. Математика и шахматы
116. *Л.К.Белопухов*. Физика внезапного
117. *Н.Б.Васильев, А.А.Егоров*. Задачи всесоюзных математических олимпиад. Часть 1
118. Задачник «Кванта». Физика. Часть 1
119. *Н.Б.Васильев, А.А.Егоров*. Задачи всесоюзных математических олимпиад. Часть 2
120. Задачник «Кванта». Физика. Часть 2
121. *Н.Б.Васильев, В.Л.Гутенмахер, Ж.М.Раббот, А.Л.Тоом*. Заочные математические олимпиады
122. *А.З.Долгинов*. Строение материи: от атомов до Вселенной
123. Задачник «Кванта». Физика. Часть 3
124. *А.Толтыго*. 130 нестандартных задач
125. *Н.Б.Васильев*. Статьи из журнала «Квант». Часть 1
126. *Н.Б.Васильев*. Статьи из журнала «Квант». Часть 2
127. *Г.Е.Горелик*. Новые слова науки – от маятника Галилея до квантовой гравитации
128. *Е.Я.Гик*. Компьютерные шахматы
129. *М.И.Каганов*. Физика глазами физика. Часть 1
130. *М.И.Каганов*. Физика глазами физика. Часть 2
131. Колмогоровской школе – пятьдесят. Сборник статей. Часть 1
132. Колмогоровской школе – пятьдесят. Сборник статей. Часть 2
133. *К.Ю.Богданов*. Физик в гостях у биолога
134. *А.А.Заславский*. Олимпиады имени И.Ф.Шарыгина (2010–2014)
135. *А.Н.Колмогоров, И.Г.Журбенко, А.В.Прохоров*. Введение в теорию вероятностей (3-е изд.)

Индекс 90964



Библиотечка КВАНТ

Л. А. Ашкинази



ВЫПУСК

136