

110

Библиотечка КВАНТ

ВЫПУСК

Библиотечка КВАНТ



П.Г. Крюков

Лазер-

НОВЫЙ
ИСТОЧНИК

света



Б Ю Р О



КВАНТУМ



БИБЛИОТЕЧКА

КВАНТ

ВЫПУСК

110

Приложение к журналу
«Квант» № 2/2009

П.Г. Крюков

**ЛАЗЕР –
НОВЫЙ ИСТОЧНИК
*света***



Москва
2009

УДК 621.373.85
ББК 85.84
К85

Серия
«Библиотечка «Квант»
основана в 1980 г.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Б.М.Болотовский, А.А.Варламов, В.Л.Гинзбург,
Г.С.Голицын, Ю.В.Гуляев, М.И.Каганов, С.С.Кротов,
С.П.Новиков, Ю.А.Осипьян (председатель),
В.В.Произволов, Н.Х.Розов, А.Л.Стасенко, В.Г.Сурдин,
В.М.Тихомиров, А.Р.Хохлов,
А.И.Черноуцан (ученый секретарь)

К85 Крюков П.Г.

Лазер – новый источник света. – М.: Бюро Квантум, 2009.
– 176 с. (Библиотечка «Квант». Вып. 110. Приложение к
журналу «Квант» №2/2009.)

ISBN 978-5-85843-088-9

В книге рассказывается о принципиально новом источнике света – лазере, появление которого привело к подлинной революции в физике. Излагается история создания этого замечательного устройства, обсуждаются принципы работы различных лазеров, описываются основные типы современных лазеров, приводятся примеры их применений в науке и технике. В частности, рассказывается о том, как с помощью лазера можно изучать самые быстрые явления природы, получать состояния вещества, близкие к имеющимся в астрофизических объектах, а также создавать и исследовать миниатюрные объекты нанотехнологии.

Для школьников, студентов, преподавателей, а также для всех интересующихся современной наукой и техникой

ББК 85.84

ISBN 978-5-85843-088-9

© Бюро Квантум, 2009

ПРЕДИСЛОВИЕ

Прогресс цивилизации Человечества связан с овладением сил Природы. Одним из важнейших природных явлений является свет. Благодаря способности воспринимать свет, мы познаем окружающий нас мир. Овладение огнем — источником тепла и света — величайшее достижение человечества. Наука о свете — оптика — одна из важнейших отраслей физики. Естественным источником света является Солнце. Потребовались огромные усилия и длительное время для создания источников света, способных заменить солнечный свет. Так, с развитием науки об электричестве на смену тепловых источников света, таких как свеча и масляная или керосиновая лампа, появились электрическая дуга, лампы накаливания, газоразрядные трубки и люминесцентные лампы. Нет необходимости много говорить о значении источников света. Их главная роль — в увеличении времени полезной деятельности, а это имеет огромное значение. До сравнительно недавнего времени источники света по существу лишь совершенствовались. В их основе лежали процессы испускания света нагретыми телами, возбужденными электрическим действием атомами и молекулами и явлением люминесценции. Так продолжалось до 1960 года, когда появился принципиально новый источник света — лазер, обладающий совершенно необычными свойствами по сравнению со всеми существующими до него источниками света. Создание лазера привело к подлинной революции в оптике и вообще в физике, а также в области многочисленных исключительно важных применений.

Лазер появился в результате замечательного слияния двух достижений науки и техники. С одной стороны, это квантовая физика, обобщившая результаты оптики и спектроскопии. С другой стороны, это успехи радиотехники, продвигающие методы генерации радиоволн в сторону все более коротких волн. За прошедшие 50 лет достигнут огромный прогресс в развитии этого принципиально нового источника света. В настоящее время имеются как миниатюрные лазеры, применяемые в компьютерах, проигрывателях компакт-дисков и в системах волоконно-

оптической связи, так и гигантские установки размером с футбольное поле, предназначенные для решения проблемы управляемого термоядерного синтеза. Стали реальностью военные разработки лазерного оружия, воплощающие идеи романов Герберта Уэллса и Алексея Толстого. Лазеры с успехом применяются в различных областях техники и в медицине. Особое значение имеет область научных применений. Благодаря лазерам возникли новые научные направления – нелинейная оптика и волоконная оптика. Лазеры дали в руки ученых могучий инструмент исследования самых быстрых явлений в природе. Стало возможным в лабораторных условиях создавать сверхсильные электромагнитные поля и получать состояния вещества, близкие к тем, что имеют место в астрофизических объектах. Разработаны методики изготовления миниатюрных объектов нанотехнологии.

Развитие лазерной науки интенсивно продолжается. Успешно осваиваются новые диапазоны длин волн. Современные лазеры это не только источники света. Их спектральный диапазон простирается от миллиметровых волн до мягкого рентгена. Пиковые мощности достигают петаватта ($1 \text{ ПВт} = 10^{15} \text{ Вт}$). В импульсном режиме получают длительности порядка фемтосекунды ($1 \text{ фс} = 10^{-15} \text{ с}$). С помощью лазеров решается проблема создания сверхточных часов (с точностью на уровне 10^{-15}).

Показателем успехов в науке является получение Нобелевских премий. В 1964 году американский ученый Чарлз Таунс и два наших выдающихся соотечественника Николай Геннадиевич Басов и Александр Михайлович Прохоров получили Нобелевскую премию по физике за работы, приведшие к созданию лазера.

В настоящей книжке изложена история создания этого замечательного устройства, обсуждается принцип действия, описываются основные типы современных лазеров и некоторые важные и интересные применения.

Вопрос о природе света занимал умы выдающихся мыслителей уже в глубокой древности. Пифагор (6 в. до н.э.) считал, что зрительные ощущения возникают в результате «горячих испарений», исходящих из глаз. Евклид (3 в. до н.э.) также полагал, что из глаза истекают «зрительные лучи». По его представлениям, они являются как бы «осязательными нитями», которые протягиваются к телам внешнего мира, ощупывают их своими концами и вызывают зрительные ощущения. Последователем этой теории был Птолемей (ок. 90 – ок. 160). Противоположных взглядов придерживался Демокрит (460–370 до н.э.), который считал, что зрение обусловлено попаданием в глаз атомов, исходящих от светящегося предмета. Демокрит по праву считается родоначальником атомистических представлений о веществе, но его также можно рассматривать как предвосхитителя идеи квантов света. Против теории зрительных лучей выступал и Аристотель (384–322 до н.э.). Он утверждал, что если «в прозрачном», т.е. находящимся между предметом и глазом, находится нечто огненное, то получается свет, в противном случае получается тьма. «Прозрачному», или, говоря современным языком, среде между глазом и предметом, Аристотель придавал большое значение, считая его посредником в передаче движения, вызывающего зрительное ощущение. Эти соображения можно считать предвосхищением учения о светоносном эфире – среде, в которой распространяется свет.

Евклид впервые применил к изучению света математику (геометрию), принимая во внимание прямолинейное распространение света и равенство углов падения на плоскую отражающую поверхность и отражения от нее. Птолемей уделил большое внимание изучению закономерностей преломления света в прозрачных веществах, так как он заметил, что положение светил на небе (углы наблюдения) изменяется за счет преломления света в воздухе. Однако ему не удалось установить количественного соотношения между углами падения и преломления, хотя он и произвел достаточно точные измерения. Древним уже были известны действия вогнутых зеркал. Легенда даже приписывает Архимеду (287–212 до н.э.) сожжение неприятельского флота с помощью системы таких зеркал.

Из исследований, проводимых в эпоху Средневековья, следует назвать труды Роджера Бэкона (1214–1294). Он исследовал отражения в вогнутых параболических зеркалах и рекомендовал людям со слабым зрением пользоваться «собирающими чечевицами» (на латинском языке – линзами), т.е. очками. В XVI веке в Голландии были изобретены зрительная труба и микроскоп, благодаря которым Галилей (1564–1642) сделал свои знаменитые открытия во Вселенной, а Левенгук (1632–1723) – в микромире. Снеллиус (1580–1626) установил закон преломления, но не опубликовал свои результаты. В современном виде это было сделано знаменитым математиком и философом Декартом (1596–1650). Гримальди (1618–1663) сделал замечательное открытие дифракции света, т.е. проникновения света за границу геометрической тени. Это открытие заставило его предположить, что свет представляет собой волнообразное движение.

Следующий период в развитии учения о свете связан с именами двух гениальных ученых – Ньютона (1642–1727) и Гюйгенса (1629–95). Ньютон начал свои исследования в области оптики открытием дисперсии света. Это явление заключается в том, что световые лучи различного цвета преломляются стеклянной призмой под разными углами. На основании своих опытов Ньютон пришел к выводу, что белый свет состоит из смеси простых цветных лучей. Из других работ Ньютона в оптике следует назвать исследования цветов тонких пластинок и пленок. Он же наблюдал кольца, названные впоследствии его именем, которые возникают при освещении линзы, прижатой к плоской стеклянной поверхности. Они возникают благодаря интерференции света.

Ньютон является творцом корпускулярной гипотезы света. К ней его привели прямолинейное распространение света и отражение света, подобное отскоку шара от плоской поверхности. Было логичным предположить, что свет представляет собой необычайно мелкие частицы (корпускулы) некоторого вещества, которые испускаются светящимися телами (гипотеза истечения – другое название корпускулярной гипотезы). К тому времени наука о движении тел – механика – достигла значительных успехов, и корпускулярная гипотеза удовлетворительно объясняла прямолинейность распространения света и закон отражения, а различие цветов связывала с различными размерами световых частиц, присутствующих этим цветам.

Но при истолковании других явлений эта гипотеза потребовала дополнительных предположений. Преломление света, со-

гласно Ньютону, происходит потому, что при падении света на более плотную среду частицы испытывают притяжение (для Ньютона, открывшего закон всемирного тяготения, было логичным объяснять явления, опираясь на этот закон) и, значит, приобретают ускорение, направленное по перпендикуляру к границе раздела. Из этого следовало, что скорость света в более плотной среде должна быть больше, чем в менее плотной. Для объяснения дифракции и цветов тонких пластинок приходилось вводить новые, далеко не очевидные предположения.

В противоположность корпускулярной гипотезе, волновая гипотеза Гюйгенса давала объяснение указанным фактам без особых натяжек. Гюйгенс считал, что свет представляет собой продольные волны (подобные звуковым), распространяющиеся в тончайшей материи – эфире. Этот эфир заполняет все пространство, а также промежутки между частицами материальных тел. Для объяснения прямолинейности распространения света Гюйгенс сформулировал свой знаменитый принцип для волнового движения: каждая точка волны является источником вторичных волн, которые складываются и дают в результате распространяющуюся волну. На основе этого принципа он объяснил законы отражения и преломления света. Волновая гипотеза довольно логично объясняла и явления интерференции и дифракции. Действительно, результат сложения двух периодических колебаний зависит от соотношения их фаз, и при определенной разности фаз возможно гашение колебаний. Это объясняло интерференцию. Так же просто была объяснена дифракция света – наблюдение волн на поверхности воды показывало, что волны способны огибать препятствие. По Гюйгенсу, скорость света в более преломляющей среде должна быть меньше, нежели в менее преломляющей. Это – прямо противоположный вывод по сравнению с корпускулярной гипотезой Ньютона.

В борьбе между двумя гипотезами о природе света значительную роль сыграло явление поляризации света, которое заключается в том, что поведение света при взаимодействии с некоторыми веществами зависит от направления, под которым свет падает на вещество. Бартолин (1625–1698) обнаружил в кристаллах исландского шпата явление двойного лучепреломления – луч света, проходящий через кристалл, раздваивается, причем поведение одного луча соответствует закону преломления (обыкновенный луч), а другой испытывает преломление при нормальном падении на поверхность кристалла (необыкновенный луч). Гюйгенс пытался объяснить это явление, предполагая, что волны лучей, получающихся после раздвоения, имеют в кристалле

различные формы. Обыкновенному лучу соответствует световая волна, имеющая форму сферы, а необыкновенному – форму эллипса. Исследуя прохождение раздвоенного луча через второй кристалл, Гюйгенс обнаружил новое явление, а именно – при определенной ориентации второго кристалла по отношению к первому происходит гашение луча. Гюйгенс не смог объяснить это явление. Он не дал также объяснения цветов и прямолинейности распространения света. По этим причинам, а также благодаря высокому авторитету Ньютона гипотеза Гюйгенса не получила признания, и в течение всего XVIII и начала XIX века в оптике господствовала корпускулярная гипотеза истечения.

Первая половина XIX века явилась новым периодом в развитии оптики. Начинается решительная борьба с корпускулярной гипотезой. Эта борьба в первую очередь связана с именем Юнга (1773–1829). Результатом его исследований стала теория интерференции световых волн (термин, введенный самим Юнгом), основанная на волновых представлениях. В своем знаменитом опыте, схема которого приведена на рисунке 1, он продемонстрировал и изучил это явление. Теория интерференции позволила

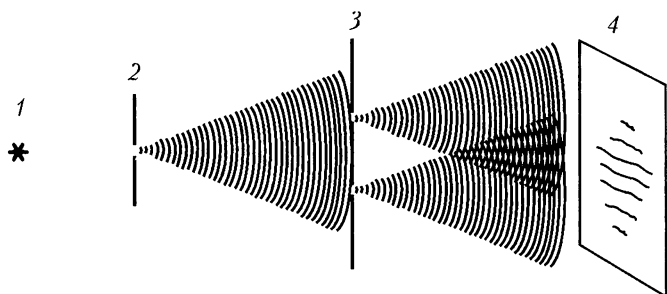


Рис. 1. Схема опыта Юнга, демонстрирующего интерференцию света: 1 – источник света, 2 – щель, 3 – две щели, 4 – экран

довольно просто объяснить природу колец Ньютона и цвета тонких пленок. Однако недостатком первоначального варианта теории Юнга было то, что она сохраняла представления Гюйгенса о световых волнах как о продольных волнах сжатия и разрежения в эфире и поэтому натолкнулась на непреодолимые трудности при объяснении явлений поляризации. Исследования этих явлений в то время уже значительно продвинулись вперед, в частности, Малюс (1775–1812) открыл изменения степени поляризации при отражении света от поверхности стекла. Теория Юнга была не в состоянии объяснить это явление, и Малюс

считал свое открытие неопровержимым доказательством справедливости корпускулярной гипотезы. Надо сказать, что на стороне этой гипотезы тогда были такие выдающиеся ученые, как Лаплас, Пуассон, Био и другие.

Тем более велика заслуга Френеля (1788–1827), блестящие исследования которого принесли окончательную победу волновой теории света. Он возродил принцип Гюйгенса и соединил его с принципом интерференции. Так же, как и Гюйгенс, он рассматривал каждую точку волны (точнее, малый участок) как элементарный источник вторичных волн. Но их сложение происходит с учетом интерференции, которая определяется разницей длин пути от точек волны до точки наблюдения, т.е. относительными фазами складывающихся волн. Вычисления на основе этого принципа полностью объяснили все наблюдавшиеся явления дифракции, а также прямолинейность распространения света. В этой связи уместно привести замечательный исторический факт. При рассмотрении работы Френеля в Парижской Академии наук в 1818 году Пуассон – противник волновой теории и блестящий математик – указал, что из вычислений на основе теории Френеля следует нелепый факт, а именно – в центре геометрической тени от круглого непрозрачного экрана должна быть светлая точка. Но Араго (1786–1853) – горячий сторонник Френеля – поставил соответствующий опыт и показал, что так оно и есть.

Итак, в области явлений интерференции и дифракции волновая теория Френеля доказала свое превосходство над корпускулярными представлениями Ньютона. Однако оставались необъяснимыми явления поляризации. Френель и Араго провели целый ряд исследований по интерференции поляризованных лучей, из которых следовало, что световые волны являются поперечными, а не продольными. Несмотря на блестящие результаты теории Френеля, большинство физиков его времени считало представление о световых колебаниях, как поперечных, невероятным. В самом деле, поперечные волны в сплошной среде возможны только в твердом теле. Поэтому эфиру в теории Френеля приходилось приписывать свойства твердого тела. Естественно, такое предположение казалось невероятным: ибо как могут двигаться сквозь твердый эфир небесные тела? Это обстоятельство смущало таких выдающихся ученых, как Лаплас и Пуассон. Тем не менее, Френелю на основе предположения об упругих свойствах эфира удалось получить знаменитые формулы (носящие его имя), описывающие зависимости интенсивностей отраженных и преломленных лучей на границе двух сред с различ-

ными показателями преломления от угла падения лучей и от вида поляризации.

Вопрос о том, какая из двух гипотез верна, оставался открытым. Необходим был эксперимент, позволяющий выбрать правильную. Последовательное развитие обеих гипотез приводило к различию скоростей света в воздухе и в плотной прозрачной среде с показателем преломления n . Из корпускулярной гипотезы следовало, что скорость света в такой среде в n раз превышает скорость света в воздухе (где $n = 1$). Следствием волновой гипотезы было прямо противоположное утверждение. Возникла острая необходимость измерить скорость света в средах с разными показателями преломления в земных условиях.

Уже было известно из астрономических исследований, что скорость света чрезвычайно велика – около 300 тысяч километров в секунду. Поэтому для измерения скорости света в земных, лабораторных, условиях (сравнительно короткая база расстояний) принципиальной была возможность получать достаточно короткие вспышки (импульсы) света и измерять короткие интервалы времени.

К этому моменту были определенные успехи в исследовании быстрых явлений. Надо сказать, что первые измерения основывались на физиологических ощущениях исследователя, т.е. ухо и глаз были основными инструментами. Так, было установлено, что глаз сохраняет изображение в течение примерно 0,1 секунды. Это явилось результатом наблюдения, что горящий уголек на конце быстро перемещающегося прутика, воспринимается в виде светящейся полосы. Заметим, что инерционность глаза используется в кино и телевидении. Если поместить светящийся уголек на край вращающегося диска, то при наблюдении через щель изображение напоминает изогнутую комету. Причем протяженность «хвоста» зависит от скорости вращения. Это явилось первым осуществлением принципа развертки, т.е. преобразования изменений во времени в изменения в пространстве. На этом принципе основана работа современных электронных осциллографов.

Для определения частоты периодических явлений с периодом меньше 0,1 с использовалась способность человека различать звуки разного тона, т.е. с разной частотой звуковых колебаний. Диапазон чувствительности человеческого уха обычно простирается от 20 до 25000 Гц. Это, в принципе, позволяет регистрировать периодические явления с периодом от 10^{-2} до 10^{-4} с, если эти явления преобразуются в звук или сопровождаются звуком. Исследуемый звук можно сравнить с источником звука с извест-

тной частотой – эталоном. Ими могут быть, например, камертоны и струны определенной длины. Таким образом, по тону звука (т.е. акустически) можно было определять число оборотов в секунду. Это было необходимо для использования метода развертки. Зная скорость вращения зеркала, можно определить скорость перемещения отраженного луча света.

В то же время интенсивно изучались электрические явления. В частности, исследовался разряд лейденской банки (конденсатора, заряженного до высокого напряжения). Получающаяся искра (миниатюрная молния) являлась ярким источником света в виде короткого импульса. Для определения времени свечения искры Уитстон (1802–1875) (тот самый, именем которого названа схема мостика для определения сопротивлений) в 1834 году поставил эксперимент с использованием метода развертки изображения с помощью вращающегося зеркала (рис.2). Механическое устройство с шестеренками, подобное тому, что используется в часах, позволяло получать вращение зеркала с угловой скоростью 800 оборотов в секунду. Величина скорости вращения определялась акустическим способом, т.е. по тону звука. С помощью контактов, закрепленных на оси вращения, искра возникала в определенный момент поворота зеркала. Тем самым осуществлялась синхронизация развертки с исследуемым быстрым процессом. Наблюдая изображение искры, развернутое в пространстве, можно было из линейных размеров определить продолжительность ее свечения. Оказалось, что оно может составлять миллионные доли секунды. Тем самым, было показано, что электрическая искра может быть источником интенсивных и коротких импульсов света.

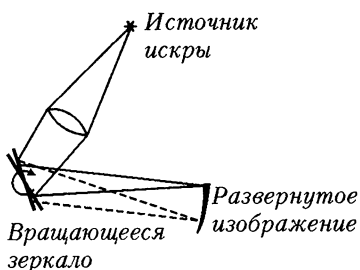


Рис.2. Схема эксперимента Уитстона: механическая развертка свечения искры

Эти достижения подготовили почву для постановки экспериментов по измерению скорости света в лабораторных условиях. Схему соответствующих опытов предложил Араго. В них по существу пришлось иметь дело с короткими вспышками света и методом развертки. За постановку этих экспериментов взялись два выдающихся исследователя – Физо (1819–1896) и Фуко (1819–1868), обессмертивших свои имена в истории науки (эффект Доплера–Физо, маятник и токи Фуко). В решении

стоявшей перед ними проблемы они пошли разными путями. Физо хотел сначала измерить скорость света в воздухе, а затем поставить эксперимент по сравнению скоростей в воздухе и воде. Фуко сразу же приступил к решающему эксперименту.

В своих экспериментах по измерению скорости света Физо использовал быстро вращающееся зубчатое колесо, периодически прерывающее пучок света (рис.3). Тем самым, получалась

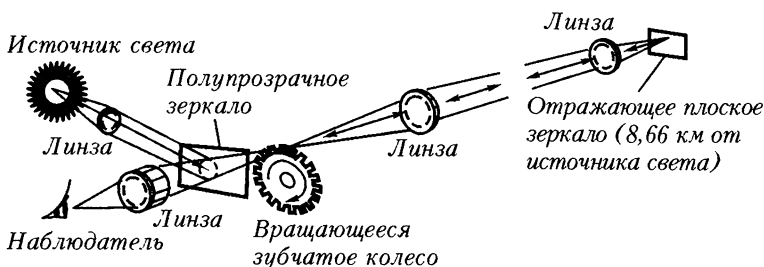


Рис.3. Схема эксперимента Физо по измерению скорости света

периодическая последовательность импульсов света. Свет, прошедший между зубцами, направлялся в виде параллельного пучка на зеркало, расположенное на определенном расстоянии от колеса. На обратном пути свет снова попадает на край колеса. При остановленном колесе или при сравнительно малой скорости вращения наблюдатель видит яркую точку источника света. При увеличении скорости вращения наступает момент, когда при возвращении импульса света он попадает на зуб колеса. Естественно, при этом источник становится невидимым. Изображение появляется вновь и становится самым ярким, когда колесо успевает повернуться на следующий промежуток. Поскольку исследование проводилось путем наблюдения глазом, Физо применил остроумный прием измерений. Приходящий от зеркала пучок прерывался с помощью того же самого вращающегося колеса. Таким образом осуществлялось временное стробирование, и измерения с временным разрешением производилось при непрерывном наблюдении. Зная скорость вращения колеса, определенную акустически, число зубцов и расстояние до зеркала, Физо в 1849 году смог определить скорость света в воздухе. Ее значение оказалось равным 315000 км/с .

Фуко в своем эксперименте использовал метод развертки изображения с помощью быстро вращающегося зеркала, как и в опытах Уитстона. С помощью оригинальной оптической схемы с вогнутыми зеркалами он получал неподвижное изображение источника (точнее, изображение тонкой нити) при быстром

вращении зеркала. Это получалось при определенном значении интервала времени, затрачиваемого светом на прохождение оптического пути. Но при изменении скорости света, проходящего между зеркалами, изображение нити смещалось. Это смещение можно было достаточно точно измерить с помощью окуляра с микрометрическим винтом. Если часть пути проходила через слой воды (труба определенной длины, которую можно было заполнять водой), то изображение смещалось по сравнению с распространением в воздухе. Таким образом, по величине этого смещения можно было определить, насколько различаются скорости света в воздухе ($n = 1$) и в воде ($n = 1,33$). В 1850 году Фуко убедительно показал, что скорость света в воде меньше в n раз.

Результаты Фуко решительно подтвердили волновую теорию и опровергли взгляды Ньютона. общепризнанной стала волновая теория света, которая справедливо называется оптикой Юнга–Френеля. В согласии с ней, свет представляет собой поперечные волны, причем цвет лучей определяется длиной волны. Интерференционные измерения показали, что для видимого света длина волны изменяется от 0,4 мкм (фиолетовый свет) до 0,7 мкм (красный свет).

Дальнейший прогресс в разработке источников света и в сокращении длительности световых импульсов был связан с изучением электричества и магнетизма. Прежде всего отметим, что исследования электричества дали в руки оптиков два замечательных источника света высокой яркости – искра (импульсный источник) и электрическая дуга (постоянный источник). До этого исследователям оптических явлений приходилось использовать либо солнце, либо лампы с масляным фитилем. Солнечный источник для продолжительного использования необходимо было снабжать гелиостатом – системой зеркал, которые поворачивались с помощью часового механизма. Этим достигалось постоянное направление солнечных лучей. Лампы с масляным фитилем были недостаточно яркими. Требовались исключительная наблюдательность и аккуратность экспериментатора, чтобы уловить исследуемые эффекты и явления. Также важную роль в оптике сыграло появление фотографии, давшей возможность объективной регистрации света.

Исследования электрических, магнитных и оптических явлений, первоначально рассматриваемых как независимые, привели к установлению фундаментальных связей между ними. При исследованиях в области электричества и магнетизма было установлено, что электрический ток порождает магнитные силы,

а движущийся магнит – электрические. Фарадей (1791–1867) ввел совершенно новые представления об электричестве и магнетизме. По Фарадею, сущность электричества заключается не только в зарядах и токах, но и в силовых линиях поля, которые пронизывают все пространство, заряды же представляют собой только окончания этих линий. Эта концепция с необходимостью требовала наличия особой среды – эфира, – напряженное состояние которой и связывалось с величиной напряженности поля. До этого считали, что электрические и магнитные действия на расстоянии осуществляются в абсолютно пустом пространстве мгновенно – теория дальнего действия. Согласно этой теории, источниками взаимодействия являются заряды и получающиеся при их движении токи, причем это взаимодействие происходит мгновенно. Фарадей же развивал теорию ближнего действия, согласно которой действие осуществляется через среду, в которой имеется поле, где и проявляются электрические и магнитные силы. К этому в значительной мере привели его выдающиеся исследования диэлектриков (термин, введенный Фарадеем для обозначения изоляторов) и электролиза (химические изменения в проводящих растворах под действием электрического тока).

Фарадей большое внимание уделял изучению сред и их влиянию на действие электрических сил. Он показал, что у целого ряда прозрачных веществ диэлектрическая постоянная (электрическая характеристика вещества) связана простым соотношением с показателем преломления света (оптическая характеристика вещества). Кроме того, он показал, что магнитное поле способно влиять на поляризацию света (эффект Фарадея – вращение плоскости поляризации света в веществе под действием магнитного поля). Благодаря своей гениальной интуиции, Фарадей предположил, что свет должен быть явлением электромагнетизма.

Поскольку электричество и магнетизм связываются через движения (электрический ток и порождаемое им магнитное поле), естественно, что связь между ними должна определяться некоей скоростью. Для измерения зарядов вводились разные системы единиц измерения, основанные либо на законе Кулона (сила между зарядами), либо на законе Ампера (сила между электрическими токами). Оказалось, что соотношение между ними имеет размерность скорости. Величина ее была определена Вебером (1804–1891) и Кольраушем (1840–1910) из чисто электрических опытов, т.е. без какого бы то ни было привлечения оптики. Они исследовали распространение электрических

сигналов в электрических цепях, используя провода телеграфной линии. Оказалось, что значение этой величины с удивительной точностью совпадает с экспериментально определенной скоростью света!

Новую эпоху в учении о свете открыла электромагнитная теория, разработанная Максвеллом (1831–1879), в которой развивались идеи Фарадея о силовых линиях поля. В этой теории электрические и магнитные явления описываются системой уравнений, носящих теперь имя Максвелла. Они устанавливают количественную связь между электрическими и магнитными полями. К этой теории Максвелла привели следующие факты:

- 1) открытое Фарадеем явление вращения плоскости поляризации света в магнитном поле;
- 2) равенство скоростей распространения электромагнитных возмущений и света, установленное Кольраушем и Вебером;
- 3) приблизительное равенство квадрата показателя преломления и диэлектрической постоянной среды в целом ряде веществ.

Из теории Максвелла следовало существование электромагнитных волн, т.е. периодических изменений электрических и магнитных полей, распространяющихся в пространстве со скоростью, которая была определена Вебером и Кольраушем и оказалась равной скорости света. Важно подчеркнуть, что электромагнитные волны являются примером существования электрических и магнитных полей при полном отсутствии зарядов и токов. Для существования волн, по Максвеллу, требовалось наличие эфира – среды, необходимой для их распространения, что наполняло понятие эфира определенным физическим смыслом. Все это дало Максвеллу основание провозгласить его знаменитый тезис: «Свет есть не что иное как электромагнитные колебания». Причем соответствующие волны обладают очень короткой длиной.

Однако возможность существования электромагнитных волн была доказана Максвеллом лишь теоретически. Несмотря на убедительные объяснения явлений электромагнетизма, признание этой теории пришло далеко не сразу. Возникло стремление экспериментально получить электромагнитные волны и изучить их свойства. Успеха на этом пути достиг Герц (1857–1894), которому в 1887 году и в последующие годы удалось доказать существование электромагнитных волн и изучить их свойства. Интересно отметить, что свои опыты Герц первоначально ставил с целью опровержения теории Максвелла. Однако его классичес-

кие опыты по получению электромагнитных волн и изучению их свойств полностью подтвердили предсказания Максвелла.

Схема эксперимента Герца показана на рисунке 4. Для генерации электромагнитных волн он использовал устройство, получившее название вибратора Герца, представляющий собой

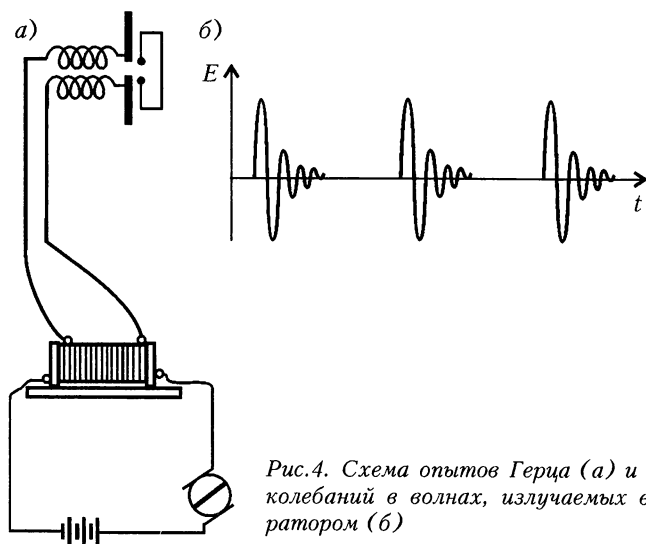


Рис.4. Схема опытов Герца (а) и вид колебаний в волнах, излучаемых вибратором (б)

два длинных тонких металлических стержня, разделенных промежутком. Каждый из них заряжался до высокого напряжения противоположного знака. Таким образом, получался электрический диполь. При достижении напряжения пробоя происходил разряд, который носил характер быстро затухающих колебаний, причем их частота определялась длиной стержней и в опытах Герца составляла около одного миллиарда периодов в секунду. Эти электрические колебания сопровождалось испусканием в пространство электромагнитных волн. Из-за быстрого разряда получались только затухающие колебания. Таким образом, наблюдались «вспышки» — импульсы электромагнитных волн при каждом разряде в вибраторе. Заметим, что длительность этих импульсов составляла несколько наносекунд. Для обнаружения волн использовалось явление резонанса в колебательном контуре (замкнутая цепь емкости и индуктивности). Он представлял собой проволочную рамку определенного размера с миниатюрным разрядным промежутком, величину которого можно было регулировать. Размеры рамки определяют собственную

частоту образуемого рамкой контура. Эти размеры можно было сделать такими, чтобы собственная частота совпадала с частотой колебаний вибратора. При наведении в этой рамке высокочастотного тока от вибратора в разряднике возникала искорка. Ее появление доказывало передачу на расстояние действия электричества, т.е. наличие электромагнитных волн. Наблюдая появление искорки в промежутке резонаторной рамки, помещаемой на разных расстояниях от вибратора и с разной ориентацией по отношению к нему, Герц смог экспериментально изучить координатную зависимость величины поля волн в пространстве. Используя плоские и вогнутые металлические поверхности, он показал, что они действуют как зеркала по отношению к получаемым электромагнитным волнам, которые способны к прямолинейному распространению. Удалось получить стоячие волны и измерить их длину. Она оказалась связанной с размерами диполя-вибратора и обычно составляла в его опытах около 30 сантиметров. Были продемонстрированы явления поляризации и преломления волн.

Таким образом, опыты Герца убедительно показали, что электромагнитные волны, получаемые с помощью электрических колебаний, обладают всеми свойствами светового излучения и отличаются лишь большей длиной волны. В дальнейшем, используя все более короткие вибраторы, удалось сомкнуть область искусственно генерируемых электромагнитных волн и далекого инфракрасного излучения тепловых источников света. Но еще более острой стала проблема эфира – среды, необходимой для распространения электромагнитных волн.

Надо сказать, что наряду с изучением электромагнитных волн в физике в начале XX века происходили революционные изменения, заставившие, в конце концов, по-новому взглянуть на природу света. После замечательных опытов Герца казалось, что не осталось никаких сомнений в волновой природе света. Однако существовал ряд фактов, неподдающихся объяснению на основе этих представлений. Так, несмотря на высокий уровень развития термодинамики и оптики, не удавалось объяснить экспериментально изученные закономерности излучения абсолютно черного тела, а именно распределение энергии излучения по длинам волн и зависимость от температуры. Кроме того, исследования спектров излучения Солнца и пламени горелки, в которое вводились различные вещества, показали, что в спектрах наблюдаются узкие линии поглощения и испускания. Исследования таких линий проводятся с помощью спектрометров – приборов, основанных на явлении дисперсии в призмах и в

дифракционных решетках. Эти исследования привели к развитию новой области науки – спектроскопии. Между линейчатыми спектрами и химической индивидуальностью веществ, помещаемых в пламя горелки, была установлена однозначная связь. Это позволило обосновать возможность исключительно эффективно-го спектрального анализа. С его помощью были открыты новые химические элементы. Подлинным триумфом стало обнаружение на Солнце спектральных линий неизвестного элемента, который затем был обнаружен на Земле и получил название гелия. Но испускание дискретных линий и значения их длин волн не получили объяснений.

Поскольку электромагнитная теория Максвелла включала концепцию гипотетического эфира, делались попытки обнаружения предсказываемого теорией влияния этого эфира на распространение световых волн. Опыты Майкельсона (1852–1931), поставленные с этой целью, дали определенный отрицательный результат.

Будучи гениальным экспериментатором (исследователем, который не упускает, казалось бы, несущественные детали), Герц, исследуя электромагнитные волны, сделал важнейшее побочное открытие – явление фотоэффекта. Он заметил, что искорка в резонаторной рамке зависит от оптического излучения искры в вибраторе, т.е. если искровой промежуток резонатора освещался искрой вибратора, то пробой промежутка резонатора мог происходить при большей его длине. Таким образом, освещение искрового промежутка облегчает пробой. Оказалось, что при помещении между искрой вибратора и рамкой резонатора стеклянной пластинки этот эффект пропадал. Но он снова возникал при замене стеклянной пластинки кварцевой. Поскольку спектры пропускания стекла и кварца сильно различаются в ультрафиолетовой области спектра, Герц связал действие света на искровой промежуток с ультрафиолетовым излучением.

Исследования фотоэффекта – испускание электронов с поверхности металла под действием света – также привели к установлению фактов, не объяснимых с точки зрения волновой природы света. А именно, особенность фотоэффекта заключается в том, что для конкретного металла существует вполне определенная максимальная длина волны света, способного вырывать электроны из металла. Иными словами, существует красная граница фотоэффекта – освещение светом с большей длиной волны не дает эффекта даже при повышении интенсивности.

Объяснение этих и ряда других экспериментальных фактов потребовало коренного пересмотра основных представлений классической физики. В 1900 году Планк (1858–1947) показал, что спектральную зависимость испускания света абсолютно черного тела можно объяснить лишь при предположении, что энергия излучения испускается в виде отдельных порций энергии – квантов, причем величина этой порции E связана с частотой света ν соотношением $E = h\nu$, где h – постоянная, носящая теперь его имя. До этого всегда предполагалось, что энергия является величиной, которая изменяется непрерывно. Таким образом, 1900 год можно считать годом рождения квантовой физики.

Эйнштейн (1879–1955) пошел еще дальше. Он предположил, что свет не только испускается в виде порций энергии, но и в дальнейшем распространяется в пространстве и вступает во взаимодействие с веществом также в виде такой порции – кванта, перемещающегося со скоростью света. Это предположение позволило в 1905 году создать теорию, которая объяснила фотоэффект, а также ряд фактов в фотохимии (химических реакций, происходящих под действием света) и в люминесценции. Для квантов света в дальнейшем было принято название фотонов. Концепция фотонов в определенной степени возрождала корпускулярные представления о природе света.

Использование фотоэффекта позволило создать замечательные приборы для регистрации света: фотоэлементы, фотоумножители, электронно-оптические преобразователи. Эти приборы обладают очень высокой чувствительностью. В настоящее время, как известно, фото- и кинокамеры с использованием фотопленок вытеснены электронными приборами, основанными на фотоэффекте. В сочетании с методом электронной развертки, которая используется в электронных осциллографах, эти приборы позволили существенно улучшить и временное разрешение методов регистрации коротких импульсов света. Удалось уверенно определять форму светового импульса с точностью до наносекунды и даже до ее сотых долей.

Исследуя явление радиоактивности, Резерфорд (1871–1937) пришел в 1911 году к планетарной модели атома, по которой атом состоит из положительно заряженного ядра, вокруг которого вращаются электроны. Эта модель очень хорошо объясняла наблюдавшиеся Резерфордом особенности рассеяния атомами α -частиц, но находилась в явном противоречии с классической электродинамикой, согласно которой вращающийся электрон должен излучать энергию в виде электромагнитных волн. В

результате уменьшения энергии орбита электрона должна была бы уменьшаться, и он в конце концов должен был бы упасть на ядро. Этому противоречил факт стабильности атомов.

Опираясь на идеи о квантах, Бор (1885–1962) в 1913 году обосновал модель Резерфорда с помощью гипотетических постулатов, которые противоречили классической физике. Однако его теория не только обосновывала планетарное строение атома, но и объясняла появление спектральных линий. Значения длин волн этих линий, получаемых из его теории, прекрасно совпадали с экспериментальными спектроскопическими данными. Согласно представлениям Бора, электрон может вращаться вокруг ядра лишь по определенным орбитам, которым соответствуют определенные энергии – энергетические состояния. Испускание и поглощение света атомами происходит скачками (переходами) из одного энергетического состояния в другое. Разность этих энергий равна энергии фотона и определяет его частоту (длину волны света).

Что касается концепции эфира, то здесь также имели место революционные перемены. В своей работе о теории относительности (1905) Эйнштейн ввел новые представления о пространстве и времени, которые позволили отказаться от концепции эфира.

Итак, в начале XX века появилась теория света, основанная на квантовых представлениях. Согласно этой теории, имеет место корпускулярно-волновой дуализм – свет обладает как волновыми свойствами, проявляющимися при его распространении в среде в явлениях дифракции и интерференции, так и корпускулярными свойствами, проявляющихся во взаимодействии света с веществом в таких явлениях, как дисперсия, фотоэффект, спектральные особенности. Иначе говоря, свет проявляет себя как волна или как частица в зависимости от условий наблюдений. В настоящее время физика, в которой не используются квантовые представления, именуется классической и по отношению к квантовой физике является некоторой предельной областью.

Глубокое понимание физических основ явлений способствует разработке и созданию новых технических устройств. Рождение новых источников света, область светотехники, и появление радио, область радиотехники, – примеры этого. Работа в этих совершенно разных областях привела к замечательному результату – созданию абсолютно нового типа источника света, а именно лазера.

ИСТОЧНИКИ СВЕТА

Искусственные источники света издавна были связаны с источниками тепла. Костер древнего человека помимо тепла давал и свет. В дальнейшем появились горящий факел, свеча и лампы с горящим фитилем. Было очевидным, что яркость светового источника зависит от температуры. Нагрев железа приводил к свечению от красного до белого каления. Успехи в области электричества позволили существенно увеличить степень нагрева за счет действия электрического тока. Появились два новых источника света: электрическая искра (искусственная молния) и электрическая дуга. Яркость этих источников могла превосходить яркость Солнца. Электрический способ нагрева лег в основу создания ламп накаливания. Поскольку яркость таких ламп определяется температурой, важно было использовать достаточно тугоплавкие материалы, например вольфрам. Все тепловые источники характеризуются спектральной зависимостью от температуры. Исследованием этой зависимости занималась специальная область физики – термодинамика. Объектом исследований было абсолютно черное тело – модель, достаточно хорошо соответствующая реальным тепловым источникам излучения. Было установлено, что спектр излучения – зависимость энергии от длины волны – является сплошным и имеет характерную форму, показанную на рисунке 5. Полная испускаемая энергия E сильно растет с ростом температуры T , а именно $E \sim T^4$. При этом максимум спектральной зависимости с ростом температуры смещается в сторону коротких длин волн (закон Вина). Из этой зависимости следует принципиальная ограниченность эффективности тепловых источников света, т.е. их светоотдача – доля энергии, испускаемая в виде света по отношению ко всей излучаемой энергии. Как бы ни увеличивать температуру, значительная доля излучения будет сосредоточена в инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах.

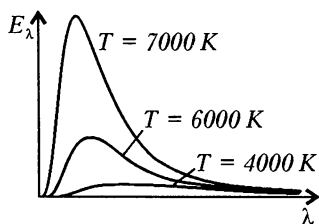


Рис.5. Спектр излучения абсолютно черного тела

Исследования электрических разрядов в газах при низких давлениях показали, что свет может возникать не только за счет нагрева, но и при возбуждении молекул и атомов в газовом разряде. Под действием электрического поля электроны способны приобретать достаточно высокую энергию, которая может передаваться атомам или молекулам, возбуждая их с последующим испусканием излучения. В этом случае спектры излучения уже не являются сплошными, а состоят из линий и полос. Так появились газоразрядные лампы, примером которых являются неоновые лампы и трубки световых реклам. Такой способ возбуждения оказался более эффективным по сравнению с тепловым. В частности, удалось создать источники ультрафиолетового излучения на основе ртутной лампы. Они с успехом заменяют солнечный свет для получения загара. Явление люминесценции, т.е. свечение некоторых веществ (люминофоров) под действием ультрафиолетового излучения, позволило создать эффективный световой источник – люминесцентную лампу. В ней под действием электрического разряда в парах ртути возникает ультрафиолетовое излучение, которое возбуждает свечение люминофора, покрывающего стенки разрядной трубки.

Надо сказать, что создание новых источников света диктовалось научными потребностями. Как уже говорилось, было обнаружено, что при внесении в пламя посторонних веществ в спектре появляются узкие линии, характерные для химического состава этих веществ. Эти линии могут вызывать окраску пламени, что используется в фейерверках. Возбуждение спектральных линий позволило осуществить исключительно точный химический анализ веществ. С его помощью были открыты новые химические элементы. Исследования спектров привели к новой отрасли науки – спектроскопии. Ее успехи вызвали рождение новой науки – квантовой физики. Было ясно, что спектроскопия позволяет исследовать микромир. Ведь атомы и молекулы, испуская излучение, посылают сигналы, дающие информацию об их строении. Поэтому важно было создавать источники, испускающие свет в виде спектральных линий. Возбуждение ускоренными электронами в наибольшей степени подходит для этого, и газоразрядные источники стали широко применяться в спектроскопии. Успехи спектроскопии способствовали развитию атомной физики. Удалось узнать строение атомов, получила физическое объяснение периодическая таблица элементов Менделеева, был открыт спин электрона.

Согласно квантовой теории, объекты микромира, такие как атомы и молекулы, являются своеобразными колебательными

системами, причем их собственные частоты определяются конкретным строением атомов и молекул. Этим частотам соответствуют определенные значения энергии (энергетические уровни). Примером может служить модель атома водорода, предложенная Бором. Основная идея квантовых представлений, как указывалось выше, состоит в том, что электромагнитное излучение, в частности свет, существует в виде квантов с определенной энергией – фотонов. Эти фотоны взаимодействуют с атомами и молекулами, которые можно представить как миниатюрные колебательные системы, имеющие определенные собственные частоты, соответствующие переходам между энергетическими уровнями. Такие квантовые представления о строении атома и фотонах позволили Эйнштейну создать в 1917 году теорию процессов испускания и поглощения света атомами. Эйнштейн рассмотрел взаимодействие фотонов с системой (атом или молекула), обладающей двумя энергетическими уровнями E_1 и E_2 , причем энергия фотона совпадает с разностью энергий этих уровней: $h\nu = E_2 - E_1$ (рис.6). Согласно Эйнштейну, переход

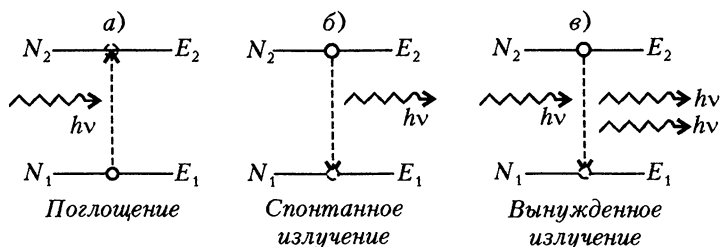


Рис.6. Двухуровневая квантовая система

системы из состояния с энергией E_1 в состояние с энергией E_2 происходит с поглощением фотона. Это объясняет резонансное поглощение света. А вот взаимодействие с системой, находящейся в возбужденном состоянии E_2 , оказывается более сложным. Переход из возбужденного состояния в нижнее, основное, может происходить самопроизвольно без какого либо внешнего воздействия с испусканием фотона. Этот процесс представляет собой спонтанное излучение. Им объясняется испускание света, причем интенсивность света зависит от вероятности такого спонтанного перехода, которая, в свою очередь, зависит от конкретного строения атома или молекулы. Но помимо этого процесса Эйнштейн предположил существование еще одного процесса, а именно – переход в нижнее состояние под действием фотонов спонтанного излучения. Этот процесс был назван им вынужден-

ным излучением. Вероятность этого процесса зависит не только от конкретных свойств системы, но и от плотности излучения, которое стимулирует этот процесс. Иными словами, от интенсивности света, состоящего из фотонов с энергией, соответствующей разности энергий уровней.

Свойства спонтанного и вынужденного излучений оказываются существенно разными. Статистический, случайный характер процесса спонтанного излучения приводит к тому, что фазы, направления распространения и состояния поляризации световых волн, испускаемых отдельными атомами, не согласованы друг с другом. Это означает, что излучение ансамбля атомов не когерентно. Строгое рассмотрение показывает, что случайное согласование может произойти лишь за время спонтанного высвечивания, т.е. времени жизни возбужденного состояния. Это – вероятностная величина. Мы не знаем точного момента испускания кванта света, но знаем, что за определенное время, а именно за время жизни, около половины возбужденных атомов совершат спонтанное испускание света. Обычно эти времена жизни составляют $\sim 10^{-8}$ с для так называемых разрешенных переходов и 10^{-3} с для так называемых метастабильных переходов. Тот факт, что спонтанное излучение происходит за конечный промежуток времени, означает, что спектр излучения имеет некоторую ширину. Подобно тому как спектр частот любой колебательной системы имеет ширину, зависящую от степени затухания колебаний, ширина спектра спонтанного излучения зависит от времени, в течение которого происходит излучение, т.е. от времени жизни. Соответствующая ширина спектра называется естественной шириной линии излучения.

Согласно квантовым представлениям, конечная ширина спектра излучения означает, что уровни энергии должны также иметь определенную ширину. Это следует из важнейшего закона квантовой физики – принципа неопределенности Гейзенберга. В соответствии с этим принципом, измерения физических величин можно осуществлять лишь в пределах некоторой точности. Причем эта точность измерений отнюдь не определяется качеством измерительных инструментов. Она является принципиальным свойством конкретного физического объекта. Так, при одновременном измерении координаты частицы x и ее скорости, которая определяется механическим импульсом p , получается принципиальная неточность (неопределенность) в измеренных величинах Δx и Δp , причем эти неточности связаны соотношением: $\Delta x \cdot \Delta p \approx h$, где h – постоянная Планка.

Это положение кардинально противоречит классической физике, согласно которой нет принципиальных пределов точности измерений физических величин. Аналогичным соотношением неопределенности связаны неточности определения энергии ΔE и времени Δt существования физического состояния с энергией E , т.е. $\Delta t \cdot \Delta E \approx h$. Поскольку время жизни τ и является вероятностным разбросом времени существования атома в возбужденном состоянии, ему соответствует разброс энергии этого состояния порядка $\Delta E \approx h/\tau$. Следовательно, энергетический уровень возбужденного состояния имеет некоторую ширину. В свою очередь, это означает, что при спонтанном излучении испускаются кванты с разбросом энергии и, соответственно, с разбросом частот излучения. Этим и объясняется тот факт, что спектральные линии спонтанного излучения имеют некоторую конечную ширину. Причем эта ширина зависит от времени жизни возбужденного состояния.

Помимо естественного уширения спектральной линии существуют уширения, обусловленные внешними воздействиями. В процессе испускания фотона атом может испытать столкновение с другим атомом. Это столкновение уменьшает время жизни возбужденного состояния, что, в свою очередь, вызывает уширение линии. Такое уширение называется столкновительным. Для уменьшения его влияния уменьшают концентрацию атомов, уменьшая давления газа в газоразрядном источнике. Другим фактором уширения линии является эффект Доплера, т.е. зависимость частоты света источника от скорости его движения. Смещение частоты спектральной линии в результате эффекта Доплера широко используется в астрономии для определения скорости движения космических объектов. В случае светового источника беспорядочные тепловые движения многих атомов приводят к соответствующим смещениям частот испускаемых ими линий, что проявляется в уширении линии. Это уширение называется доплеровским уширением. Для уменьшения его влияния уменьшают температуру излучающего газа и, соответственно, скорости беспорядочного движения излучателей. Поскольку испускается электромагнитное излучение, на процесс излучения оказывают влияние внешние электрические (эффект Штарка) и магнитные (эффект Зеемана) поля.

Ширине спектральной линии соответствует определенная величина времени – временная когерентность. Она не может быть больше, чем время жизни возбужденного состояния. Характер излучения всех обычных (не лазерных, тепловых) источников света как раз и определяется свойствами спонтанного

излучения. Из-за малой величины временной когерентности их обычно называют некогерентными.

При вынужденном излучении испускаемый фотон неотличим от того фотона, который вызывает его появление. Частота, фаза, направление распространения и поляризация волн, испущенных при вынужденных переходах, точно такие же, как и у излучения, вызвавшего переходы. Это означает, что вынужденное излучение когерентно, т.е. согласовано с тем излучением, которое его вызывает. Это является ключевым обстоятельством в работе лазера. Другое ключевое обстоятельство состоит в том, что за счет вынужденного излучения вместо одного фотона появляются два совершенно одинаковых. Это означает принципиальную возможность осуществить размножение одинаковых фотонов, а значит, и усиление электромагнитного излучения в виде фотонов.

Однако следует иметь в виду, что помимо индуцированных переходов с верхнего уровня на нижний уровень с испусканием нового фотона, происходит и поглощение фотона с переходом с нижнего уровня на верхний. Согласно теории Эйнштейна, вероятности этих переходов равны, значит, полное число испущенных и поглощенных фотонов зависит от того, какова населенность уровней, т.е. сколько атомов находится на верхнем уровне и сколько на нижнем.

При термодинамическом равновесии населенности N_1 нижнего уровня и N_2 верхнего уровня связаны соотношением Больцмана:

$$N_2 = N_1 \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{kT}\right),$$

где k – постоянная Больцмана, а T – абсолютная температура. Из этой формулы следует, что населенность верхнего уровня (2) меньше населенности нижнего (1), причем населенность верхнего уровня будет тем меньше, чем выше он расположен и чем ниже температура. Это означает, что число поглощенных фотонов больше фотонов вынужденного излучения, т.е. при взаимодействии излучения с веществом в условиях термодинамического равновесия наблюдается поглощение, которое превалирует над усилением, получающимся за счет вынужденного излучения.

В экспериментах, которые проводились при исследованиях оптических спектров, вынужденное излучение никак не проявлялось. Главная причина этого заключается в том, что вынужденное излучение, по определению, ничем не отличается от излучения, которое его вызывает. Само вынужденное излучение происходит под действием спонтанного излучения. Поэтому

вынужденное излучение не удастся отличить на фоне спонтанного излучения, исследуя спектры. По существу, вынужденное излучение представляет собой некоторую добавку к спонтанному излучению, и вынужденное излучение можно обнаружить лишь при явном выделении этой добавки.

В последующие десятки лет после работы Эйнштейна концепция индуцированного излучения заняла важное место в теоретических исследованиях, но не находила никакого практического применения. Были высказаны отдельные соображения об «отрицательном поглощении», которое могло возникнуть при нарушении равновесного теплового распределения по энергетическим состояниям атомов, в результате которого населенность верхнего уровня оказалась бы выше, чем на нижнем уровне. Но ни о каком практическом использовании такого эффекта речи не было. В частности, такую идею высказывал, но не опубликовал советский ученый В.А. Фабрикант. Причина малого интереса к таким идеям в то время представляется очевидной. Усиление, даже если бы оно возникло, было бы весьма малым и лишь на некоторой узкой спектральной линии. В то время уже существовали исключительно чувствительные приемники света – фотоумножители и электронно-оптические преобразователи. С их помощью удавалось регистрировать световые сигналы с усилением в миллионы раз и даже фиксировать отдельные фотоны. Поэтому идея использовать ничтожное усиление на некоторых линиях спектра в газоразрядной трубке для оптиков представлялась не актуальной.

Итак, обычные источники света представляют собой множество отдельных излучателей, которые испускают фотоны в соответствии с квантовыми представлениями об энергетических уровнях и о спонтанном и вынужденном излучении. Излучение из объема, содержащего возбужденные излучатели, испускается во все стороны. Направленность светового пучка можно получить, лишь используя подходящую оптическую систему, действующую на основе представлений геометрической оптики. Так, помещая достаточно малый, но яркий источник в фокус линзы или параболического зеркала (прожектор), можно получить направленный пучок света, телесный угол которого (расходимость светового пучка) определяется размерами источника, а также размерами и конструкцией оптической системы. Поскольку продолжительность испускания света отдельным излучателем конечна (время жизни возбужденного состояния), ширина спектральной линии излучения источника света не может быть уже, чем естественная ширина спонтанного излучения отдельного излучателя.

Если развитие оптики, атомной и ядерной физики было неразрывно связано с квантовой физикой, то исследования электромагнитных волн, последовавшие за опытами Герца и приведшие к появлению радиотехники и электроники, не требовали привлечения квантовой теории. Они опирались на классическую теорию Максвелла. Исследование Герцем электромагнитных волн привело к выдающемуся практическому результату – осуществлению связи на расстоянии без проводов. Появилось радио, и электромагнитные волны стали называться радиоволнами. На основе аппаратуры Герца Попов построил свой радиоприемник электромагнитных волн (грозоотметчик) и, усовершенствовав вибратор Герца, в 1896 году продемонстрировал радиотелеграфную связь из одного здания в другое. Эта связь осуществлялась посылкой коротких сигналов по азбуке Морзе. Замечательно, что первая радиограмма содержала два слова: «ГЕНРИХ ГЕРЦ». Вскоре дальность передачи была доведена до 50 километров. Маркони, значительно видоизменив аппаратуру, в частности снабдив передатчик и приемник антеннами, в 1901 году осуществил радиотелеграфную связь через Атлантический океан. Телеграфный способ радиосвязи был обусловлен тем, что вибратор Герца дает короткие «вспышки» быстро затухающих колебаний. Сравнивая радиоисточник со световым источником, можно указать, что в нем используется всего лишь один излучатель, а не великое множество. В этом их принципиальное различие. Следует отметить, что из-за быстрого затухания тока в вибраторе спектр излучения был широким и, по существу, в нем отсутствовала селективность по частоте, присущая современным системам радиосвязи.

Из теории Максвелла следовало, что для получения электромагнитных волн требуется быстрое изменение электрического тока. К тому

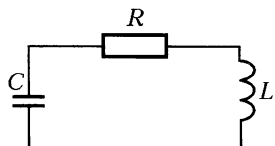


Рис. 7. Колебательный контур

времени был уже исследован колебательный контур (рис. 7), состоящий из емкости (C) и индуктивности (L), в котором при разряде конденсатора наблюдались колебания. Эти колебания затухают из-за сопротивления (R) в

цепи (провода, соединяющие конденсатор и катушку). Если бы удалось предотвратить это затухание, то получились бы незатухающие электрические колебания с периодом T , величина которого определяется формулой (выведенной Томсоном) $T = 2\pi\sqrt{LC}$. Кроме того, в электротехнике уже использовался переменный ток, представляющий собой, по существу, незатухающие электрические колебания, правда на низкой частоте (50 Гц), и существовали генераторы этого тока. Возникла идея использовать аналогичные генераторы для получения радиоволн, а приемник снабдить контуром с малым затуханием и с собственной частотой, настроенной на частоту радиоволны. В этом случае радиосвязь становилась селективной, и многие радиостанции могли работать, не мешая друг другу.

Механические генераторы электрических колебаний высокой частоты получили название альтернаторов. Высокая частота получалась за счет повышения скорости вращения ротора и увеличения числа полюсов. И то и другое ограничивалось прочностью материала ротора, испытывающего центробежные силы. Практически максимальная частота составляла примерно 100 кГц, которой соответствовали радиоволны с длиной в несколько километров. Преимуществом альтернаторов была их высокая мощность. Из-за большой длины волны радиостанции использовали антенны с высокими башнями (пример – Шуховская башня в Москве). Считалось, что большая длина волны способствует увеличению расстояния радиосвязи за счет дифракции радиоволны на поверхности земного шара. Надо сказать, что такая радиосвязь применялась вплоть до начала тридцатых годов прошлого века. До сих пор радиоприемники имеют диапазоны длинных (10–1 км), средних (1000–100 м) и коротких (100–10 м) волн.

Наряду с электротехникой развивалась электроника на основе устройств, в которых осуществлялось движение свободных электронов в высоком вакууме под действием электрических и магнитных полей. Исследование электрических ламп накаливания привело к открытию термоэлектронной эмиссии, а затем и к изобретению в 1907 году замечательного электровакуумного прибора – триода (трехэлектродной лампы), ставшего основой всей радиоэлектроники XX века. Схема триода изображена на рисунке 8. Поток электронов, испускаемых катодом (K) в результате термоэлектронной эмиссии, движется в высоком вакууме к аноду (A), создавая анодный ток. Вблизи катода располагается третий, управляющий электрод – сетка (C), через которую проходит поток электронов. При этом даже сравнитель-

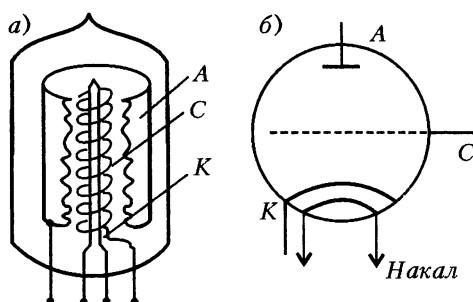


Рис.8. Трехэлектродная лампа (а) и ее принципиальная схема (б)

но слабые изменения потенциала сетки вызывают довольно сильные изменения силы анодного тока. Эта особенность позволяет осуществить обратную связь, т.е. изменять величины тех или иных параметров сравнительно малыми, но согласованными воздействиями.

С помощью положительной обратной связи можно осуществить генератор незатухающих колебаний. Простейший пример — маятник в часах, получающий толчки в такт со своим движением, причем сила этих толчков как раз компенсирует затухание колебаний. Для получения незатухающих колебаний в колебательном контуре нужно, чтобы потери в нем стали равными нулю. Но любая электрическая цепь обладает сопротивлением. Поэтому нужно компенсировать потери с помощью внешнего источника электрического тока. Колебательный контур следует дополнить устройством, которое, подчиняясь ритму колебаний тока в цепи контура, автоматически при каждом колебании сообщало бы порцию тока, компенсирующую потери. Это можно

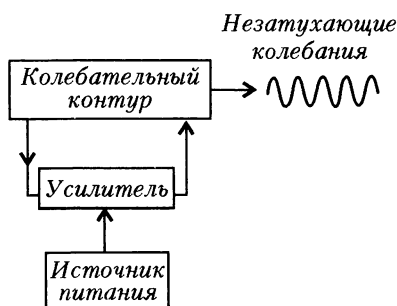


Рис.9. Блок-схема генератора незатухающих колебаний

осуществить в схеме, изображенной на рисунке 9. Здесь положительная обратная связь заключается в том, что некоторая малая часть электрической энергии выводится из контура, усиливается с помощью внешнего источника энергии до того значения, которое нужно для полной компенсации потерь, а затем снова возвращается в контур в нужной фазе. Тогда и по-

лучаются незатухающие колебания. Необходимость вполне определенной величины энергии для поддержания незатухающих колебаний означает, что имеется порог, т.е. определенная величина обратной связи, при которой затухание сменяется получением незатухающих колебаний. Если величина положительной обратной связи превысит пороговое значение, то вместо затухания начнется рост амплитуды колебаний. Поэтому требуется еще одно устройство, ограничивающее амплитуду колебаний (по существу, отрицательная обратная связь).

С помощью триода был создан ламповый генератор незатухающих электрических колебаний, схема которого показана на рисунке 10. Колебательный контур подключается через источник питания к аноду и катоду триода. Рядом с катушкой

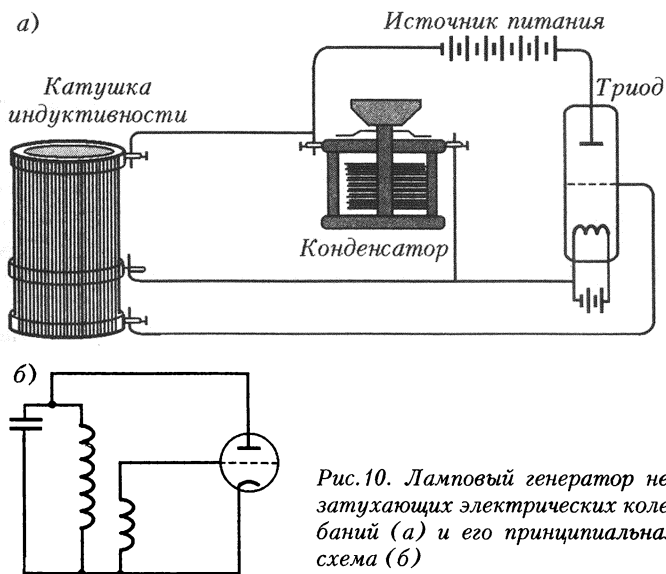


Рис.10. Ламповый генератор незатухающих электрических колебаний (а) и его принципиальная схема (б)

колебательного контура располагается вторая катушка, один конец которой присоединен к катоду, а другой – к сетке триода. При колебаниях тока в первой катушке контура за счет электромагнитной индукции наводится ток во второй катушке, который через сетку воздействует на анодный ток, т.е. на ток в цепи колебательного контура. Важно, что эти колебания токов связаны по фазе, т.е. происходят согласованно во времени. При соответствующих параметрах схемы осуществляется положительная обратная связь, превышающая порог. Это приводит к самовозбуждению генератора. Получение постоянной амплитуды

ды непрерывных колебаний достигается за счет эффекта насыщения. Величина анодного тока ограничена числом электронов, испускаемых за счет термоэлектронной эмиссии. Поэтому даже при чрезмерном росте положительного потенциала на сетке не получится чрезмерного роста анодного тока, т.е. наступает его насыщение.

Для получения электромагнитных волн (радиоволн) генератор присоединяется к передающей антенне. Изобретение электронных ламп и применение их для генерирования и усиления незатухающих колебаний сделало возможным развитие радиотелефонии, радиовещания и телевидения. В наше время большинство функций электровакуумных приборов (радиоламп) стали выполнять появившиеся в 50-е годы XX века полупроводниковые приборы – диоды, транзисторы, интегральные схемы. В них также производится изменение тока, протекающего через прибор, путем приложения сравнительно малого напряжения на управляющий электрод. Генераторы позволили получать радиоволны на вполне определенной частоте, причем эту частоту можно было регулировать, изменяя либо емкость, либо индуктивность контура. Кроме того, подачей сигналов на сетку триода можно изменять амплитуду радиоволны, т.е. осуществлять ее модуляцию. Это имело величайшее значение, так как вместо телеграфной передачи появилось радиовещание, а затем и телевидение.

С самого начала появления генераторов радиоволн было ясно, что они принципиально отличаются от источников света не только длиной волны. В отличие от источников света, испускаемого в результате независимых процессов (не согласованных во времени), происходящих в каждом атоме (молекуле) в отдельности, радиоволны радиостанций обусловлены единообразным, стройным движением электронов в виде тока. Иными словами, излучение, испускаемое с помощью генератора радиоволн, в отличие от обычных источников света является в высшей степени когерентным. Когерентность означает согласованность во времени и в пространстве амплитуды и фазы колебаний. Простейшим доказательством высокой когерентности радиоволн является тот факт, что музыка, передаваемая радиостанцией, может одинаково восприниматься в разных концах Земли. Высокая степень когерентности излучения является принципиальной особенностью источников в виде генераторов, и мы вернемся к этому при рассмотрении лазеров.

Развитие радиотехники началось с освоения диапазона достаточно длинных волн с использованием резонансных колебатель-

ных систем в виде контуров с катушками и конденсаторами. Дальнейший прогресс определялся потребностью продвижения в сторону повышения частот и, соответственно, сокращения длин волн. Такая тенденция определялась следующими причинами.

Во-первых, чем короче длина волны, тем меньше размеры аппаратуры. Радиолюбители продемонстрировали, что с помощью самодельной коротковолновой аппаратуры малых размеров и весьма умеренной мощности можно установить связь практически с любым пунктом земного шара. Этому способствует наличие ионосферы – слоев разреженных ионизированных газов на высоте десятков и сотен километров (слои Хэвисайда). Радиоволны с длинами 10–80 м способны отражаться от них, и это приводит к возможности распространения на тысячи километров за счет того, что волны огибают земную поверхность путем последовательных отражений от ионосферы и поверхности земли. Коротковолновая связь имела огромное значение и в военном деле.

Во-вторых, при радиосвязи осуществляется модуляция несущей частоты. При этом радиоволна уже не является строго синусоидальной с определенной частотой, а обладает некоторым спектром. Передаваемые сигналы занимают определенную ширину спектра – полосу модуляции. Обычно ширина этой полосы в сотни раз меньше несущей частоты. Чем выше несущая частота, тем шире может быть полоса модуляции, с помощью которой передаются сигналы. Передача сигналов требует определенной минимальной ширины полосы модуляции. Например, для передачи звуковых сигналов достаточна ширина полосы около 20 кГц, но для телевизионных сигналов требуется ширина полосы модуляции в несколько мегагерц. Вот почему для телевидения потребовались частоты больше 100 МГц, т.е. длины волн короче 1 м (ультракороткие волны).

В-третьих, важнейшим военным применением стала радиолокация. Для этого важно было получать направленные пучки радиоволн, поскольку от этого зависит точность определения угловых координат цели. Соответствующие антенны часто представляют собой параболические рефлекторы. Угол, в котором сосредоточен пучок, при этом определяется отношением длины волны к диаметру антенны. По этой причине в радиолокации стали применяться сантиметровые волны.

Естественным препятствием сокращения длины волны являются размеры приборов и, в частности, ограничение длины пробегов пучков электронов в электровакуумных приборах по сравнению с длиной волны. Увеличение частоты колебательного

контура требует уменьшения индуктивности и емкости, что достигается уменьшением размеров катушек и конденсаторов. Для генерирования сверхвысоких частот вместо схем, использующих электронные лампы типа триодов в сочетании с колебательными контурами, образованными конденсаторами и катушками индуктивности, стали применять клистроны и магнетроны. В этих приборах колебательные контуры заменяются объемными резонаторами. Они представляют собой замкнутые полости с высокой проводимостью стенок. Электромагнитное поле внутри полости создает токи в стенках, которые, в свою очередь, вызывают электромагнитное поле. На рисунке 11 схематически показано, как колебательный контур преобразуется в объемный резонатор. При определенных размерах полости получается

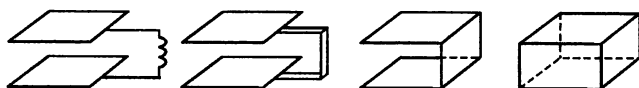


Рис. 11. Преобразование (условное) колебательного контура в объемный резонатор

резонанс для волн определенной длины. Эти резонансные волны называются модами (типами собственных колебаний) резонатора. Существует минимальная длина волны моды, соответствующая размеру резонатора. Практически невозможно сделать размеры объемного резонатора менее нескольких миллиметров. Соответственно, клистроны и магнетроны имеют пределы генерации волн – миллиметровые волны.

Помимо проблемы уменьшения размеров радиоустройств, возникла еще одна проблема. Как было указано, стремление уменьшать длину волны диктовалось развитием радиолокации. Важнейшей военной задачей является борьба с авиацией с помощью зенитной артиллерии. Требуется знание точных координат цели и расстояния до нее для наведения зенитного орудия и установления взрывателя на нужную дистанцию. В начале войны для этого использовались оптические дальномеры, прожекторы, освещающие самолет ночью, и звукоуловители, представляющие собой четыре рупора на автомобиле, с помощью которых определялось направление на самолет по звуку его мотора. Недостатки таких систем очевидны. Развитие радиолокации позволило к концу войны радикально решить эту военную задачу. Были созданы радиолокационные станции, которые с помощью направленного пучка радиоволн точно определяли направление и дистанцию до самолета. Американцы на-

звали эти устройства радарами, у нас они стали называться станциями орудийной наводки. Поскольку направленность пучка определяется отношением длины волны к диаметру антенны, в этих системах использовались длины волн сантиметрового диапазона.

Оказалось, что в случае использования столь коротких длин волн необходимо считаться с их поглощением в атмосфере. В настоящее время сантиметровые волны применяются в спутниковом телевидении, и пользователи «тарелок», вероятно, отмечали пропадание сигнала при сильном дожде. Молекулы, в отличие от атомов, имеют спектры, которые получаются не только в результате изменений энергии электронов, но и в результате колебаний частей молекул относительно друг друга, а также вращения молекулы как целого. Эти движения подчиняются законам квантовой физики, т.е. они квантованы и проявляются в спектрах в виде отдельных линий, причем эти линии могут попадать в ультракоротковолновый радиодиапазон. Возникла новая область исследований – радиоспектроскопия. Помимо научных задач она способствовала выбору нужных длин волн для практических целей.

Итак, практические и научные задачи требовали продвижение в сторону коротких радиоволн. Это, в свою очередь, требовало уменьшать размеры элементов радиоустройств. Практически миллиметровые волны стали пределом, который допускался развитием классических подходов. Возникла идея использовать в качестве колебательных систем атомы и молекулы. Эта идея привела к созданию совершенно нового генератора радиоволн – мазера.

МАЗЕР – ПРЕДШЕСТВЕННИК ЛАЗЕРА

Согласно воззрениям квантовой физики, объекты микромира, такие как атомы и молекулы, являются колебательными системами, причем их собственные частоты определяются конкретным строением атомов и молекул. Вращательные спектры молекул могут попадать в радиодиапазон, и их исследованием занимается радиоспектроскопия. Стандартная схема исследований оптических спектров поглощения заключается в том, что через твердотельный образец или кювету, содержащую исследуемое вещество в виде газа или жидкости, пропускается излучение с широким непрерывным спектром. Им, например, может быть излучение лампы накаливания, непрерывный спектр которого простирается от ближнего инфракрасного до ближнего ультрафиолетового диапазона. Затем с помощью спектрометра излучение, прошедшее исследуемое вещество, разворачивается в спектр и регистрируется подходящим приемником. В результате регистрируется зависимость коэффициента поглощения от длины волны в виде линий или полос поглощения. В радиоспектроскопии используется другая методика – источник непрерывного спектра заменяется генератором радиоволны, частоту которой можно непрерывно плавно перестраивать.

Как было уже сказано, процесс поглощения можно объяснить с помощью схемы взаимодействия излучения в виде фотонов с квантовой системой двух уровней (см. рис.6). Коэффициент поглощения зависит от отношения населенностей нижнего (основного) уровня N_1 и верхнего (возбужденного) уровня N_2 , которые в условиях термодинамического равновесия связаны формулой $N_2 = N_1 \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right)$. В этой формуле в скобках содержится отношение энергии фотона ($h\nu$) к тепловой энергии (kT). В случае видимого света и комнатной температуры (~ 300 К) это отношение таково, что населенность верхнего уровня ничтожна и не влияет на величину поглощения. Но при длинах волн радиодиапазона, когда энергия фотона мала, и при комнатной температуре населенность верхнего уровня лишь на малую величину меньше нижнего. Это означает, что коэффициент поглощения становится малым и, чтобы зарегистрировать иссле-

дуемые линии поглощения, нужно либо сильно увеличить длину кювету, либо увеличить концентрацию молекул, охлаждая газ. И то и другое имеет ограничения. Первое – разумными размерами лабораторной установки, второе – уходом исследуемого вещества из объема кюветы из-за конденсации газа.

Возникла идея обойти эту трудность путем искусственного изменения соотношения населенностей уровней. Предположим, что нам удалось разделить молекулы, находящиеся на верхнем уровне, и молекулы, находящиеся на нижнем. Тогда фракция, содержащая молекулы на нижнем уровне, будет проявлять поглощение, характерное для спектров видимого диапазона. А что будет с другой фракцией? В ней под действием излучения генератора радиоволн возникнет вынужденное излучение, которое будет добавляться к излучению генератора, т.е. будет наблюдаться не поглощение, а усиление!

Разумеется, возникает вопрос: а можно ли осуществить такое разделение молекул? Здесь следует еще раз напомнить о стремлении получать узкие спектральные линии, а они испытывают уширение, в частности из-за эффекта Доплера. За счет беспорядочного движения многих атомов (молекул) наблюдаемая спектральная линия представляет собой сумму линий с длинами волн, соответствующими составляющей скорости каждой молекулы в направлении наблюдения. Это приводит к уширению контура линии, причем его величина зависит от температуры. Радикальным способом устранения этого уширения является техника атомных и молекулярных пучков. В условиях высокого вакуума, исключающего столкновение исследуемых атомов или молекул с молекулами остаточного газа, создается пучок атомов или молекул, летящих в одном направлении, а испускаемое ими излучение или поглощение излучения наблюдается в направлении, перпендикулярном направлению полета частиц в пучке. При таком условии наблюдения практически устраняются столкновения (плотность частиц в пучке мала), а составляющая скорости в направлении наблюдения близка к нулю, что по существу устраняет влияние эффекта Доплера. Вот с помощью таких молекулярных пучков и удалось произвести разделение молекул, находящихся в разных энергетических состояниях.

Несмотря на то что атомы и молекулы не обладают электрическим зарядом, они включают заряды противоположных знаков (отрицательные электроны и положительные атомные ядра). Система противоположных зарядов образует диполь, который характеризуется дипольным моментом. Величина его определяется величиной зарядов и расстоянием между ними. Известно,

что излучение и поглощение энергии происходит с изменением дипольного момента. Это значит, что молекула в основном и в возбужденном состоянии имеет разную величину дипольного момента. Под действием внешнего электрического поля молекулы, имеющие дипольный момент, ориентируются (поворачиваются) по этому полю. Если поле является неоднородным, то наряду с ориентацией молекул происходит их дрейф в направлении градиента неоднородного поля, причем этот дрейф зависит от величины дипольного момента. Это дает принципиальную возможность разделить молекулы, обладающие разными дипольными моментами.

Конкретно использовались молекулы аммиака (NH_3), имеющие возбужденные уровни с энергией, соответствующей длине волны 1,26 см. Поскольку молекулы, находящиеся в разных энергетических состояниях, обладают разными дипольными моментами, то при их движении в пучке, подвергнутом действию поперечного неоднородного электрического поля, они получают разное движение (дрейф) поперек пучка. Следовательно, пропуская пучок молекул аммиака через устройство, в котором создается сильно неоднородное электрическое поле, можно разделить пучок на две части. В одной части будут преимущественно молекулы, находящиеся в нижнем энергетическом состоянии, а в другой — преимущественно молекулы, находящиеся в верхнем состоянии.

Надо сказать, что такому разделению способствует следующее обстоятельство. Согласно теории Эйнштейна, вероятность спонтанного перехода возбужденной молекулы в основное состояние с испусканием фотона пропорциональна ν^3 , где ν — частота излучения. Иными словами, чем больше длина волны спонтанного излучения, тем больше время жизни. Молекулы аммиака излучают на длине волны около 1,26 см, и в этом сравнительно длинноволновом спектральном диапазоне возбужденные молекулы «живут» достаточно долго, что позволяет им почти без потерь преодолевать расстояния около 1 м.

Таким образом, пропуская пучок молекул аммиака через неоднородное электрическое поле, можно получить среду с инверсной населенностью, т.е. среду, в которой населенность верхнего уровня больше, чем нижнего. Такая среда способна усиливать проходящее через нее излучение и потому называется активной средой. Ее можно использовать для генерации электромагнитных волн. Для этого требуется положительная обратная связь. С этой целью активная среда помещается в объемный резонатор, настроенный на частоту соответствующего перехода.

Обратная связь осуществляется за счет того, что кванты вынужденного излучения не покидают область, занятую активной средой, а продолжают взаимодействовать с ней, вызывая новое вынужденное излучение. Если усиление превосходит потери в резонаторе (порог), то возникает лавинообразный процесс нарастания интенсивности излучения, приводящий к самовозбуждению генератора.

Следует подчеркнуть, что резонатор отнюдь не просто техническая деталь. Он возвращает испущенное излучение к возбужденным молекулам, вызывая новые индуцированные излучения, тем самым излучение многих излучателей (молекул) превращается в согласованное излучение всего коллектива. Резонатор, таким образом, объединяет множество молекул в единую квантовую систему. Получается схема генератора электромагнитных волн, упрощенный вид которой показан на рисунке 12. Пучок

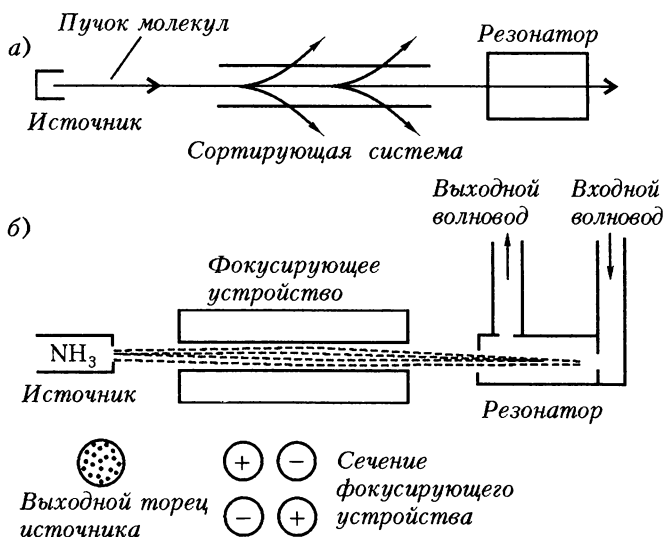


Рис. 12. Молекулярный генератор (мазер): а) принцип разделения молекул; б) блок-схема

молекул аммиака образуется при вытекании из большого числа тонких трубочек в вакуум. Этот пучок пересекает область, где с помощью системы электродов с противоположными знаками высокого напряжения (квадрупольный конденсатор) получается электрическое поле с очень большой поперечной неоднородностью. Оно является как бы собирающей и рассеивающей линзами

для молекул, находящихся в верхнем (возбужденном) и в нижнем (основном) энергетических состояниях. Далее сфокусированные молекулы, находящиеся в верхнем состоянии, попадают в отверстие объемного резонатора, и там под действием спонтанного излучения индуцируются переходы в нижнее состояние с испусканием соответствующих фотонов (частота равна 32870 МГц, длина волны около 1,26 см). Молекулы, находящиеся в нижнем состоянии, в отверстие резонатора не попадают. Источник молекул, квадрупольный конденсатор и резонатор помещаются в камеру с высоким вакуумом.

Удивительнейшим фактом является то, что осознание вышеизложенных идей и их экспериментальное осуществление произошло почти одновременно в 1954 году в СССР Н.Г.Басовым и А.М.Прохоровым и в США Ч.Таунсом с сотрудниками на противоположных частях земного шара, разделенных «железным занавесом». Это яркий пример логики развития науки. Работы ученых содержали описания этого генератора радиоволн совершенно нового типа. Американские исследователи назвали его мазером, аббревиатура Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation – усиление ультракоротких волн с помощью индуцированного излучения, подчеркивая особую, по существу впервые проявившуюся, роль индуцированного излучения. Советские ученые назвали свой прибор молекулярным генератором, подчеркивая, что в качестве колебательного контура генератора используются молекулы.

Надо сказать, что основной целью исследователей обоих коллективов было стремление провести радиоспектроскопические исследования с наиболее высоким спектральным разрешением, для чего требовалось получить как можно более узкую спектральную линию излучения. Действительно, главной и уникальной особенностью нового генератора радиоволн оказалась способность генерировать исключительно узкую и стабильную по частоте линию излучения. Стабильность обусловлена тем, что резонансной колебательной системой являются молекулы, строение которых определяется самой природой. Что касается ширины линии излучения, то на этом остановимся особо.

Ширина спектральной линии излучения определяется временем жизни излучающей частицы (атома, молекулы) в верхнем возбужденном состоянии, согласно квантовому принципу неопределенности Гейзенберга. Эта ширина линии, как было сказано выше, называется естественной шириной. Возник вопрос: а какова ширина линии излучения мазера и может ли она быть уже естественной ширины линии спонтанного излучения молекул? С

этим вопросом Н.Г. Басов обращался к весьма квалифицированным специалистам квантовой теории. Их ответ был безапелляционным. Соотношение неопределенностей – незыблемый принцип квантовой механики, поэтому он и определяет предельную ширину линии. Значит, и ширина линии излучения не должна быть меньше естественной ширины линии излучения молекул аммиака. Однако оказалось, что это не так! Ширина линии излучения мазера была намного меньше.

Никакого противоречия с квантовой теорией здесь нет. За счет вынужденного излучения все новые и новые молекулы продолжают излучать на той же частоте и с согласованными фазами. Если длина цуга волн и связанная с ней ширина линии в случае спонтанного излучения определяется временем жизни одиночной возбужденной молекулы (к ней-то и относится принцип неопределенности), то в случае вынужденного излучения цуг не обрывается, а как бы подхватывается следующей молекулой и так далее. Таким образом, продолжительность вынужденного излучения для ансамбля молекул, связанных обратной связью посредством резонатора, оказывается намного большей, чем для отдельной молекулы, и принцип неопределенности нужно применять по отношению к этому ансамблю, т.е. к квантовой системе многих излучателей, объединенных резонатором.

Мазер, благодаря использованию вынужденного излучения, явился источником с исключительно высокой временной когерентностью (монохроматичностью излучения). Частота излучения со стабильностью $\Delta\nu/\nu = 4 \cdot 10^{-12}$ поддерживалась в течение одной секунды, а в течение часа она держалась по крайней мере на уровне $2 \cdot 10^{-10}$. В дальнейшем был создан еще один тип мазера – водородный мазер. В нем используются атомы водорода, имеющие переход на длине волны 21 см, а для получения инверсной населенности применяется не электрическое, а магнитное неоднородное поле. Из-за своей высокой стабильности водородный мазер стал прецизионными часами, которые необходимы для хранения эталонов времени и длины. В частности, водородные мазеры применяются в системе точного определения координат ГЛОНАСС (ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система).

СОЗДАНИЕ ЛАЗЕРА

Сразу же после рождения мазера, квантового генератора радиоволн, возник вопрос, нельзя ли принцип, лежащий в его основе, распространить в область еще более коротких волн – в оптический диапазон. Поиски ответа на этот вопрос привели к созданию квантовых генераторов оптического диапазона – лазеров. Однако на этом пути были принципиальные трудности.

Первая трудность – приготовление активной среды. Метод разделения на фракции с возбужденными и невозбужденными состояниями с помощью пучков, проходящих через неоднородные поля, очень специфичен и практически годится лишь для радиодиапазона. Вторая трудность заключалась в том, что объемные резонаторы, с характерными размерами порядка длины волны, должны были бы иметь размеры около 1 мкм, что нереально. И тем не менее, усилия на пути решения этих проблем вскоре привели к успеху.

Первая трудность была решена благодаря тому, что конкретные атомы, ионы и молекулы имеют не два уровня, а сложную систему многих энергетических уровней. Еще до появления первых лазеров Н.Г.Басов и А.М.Прохоров в 1955 году предложили метод создания инверсной

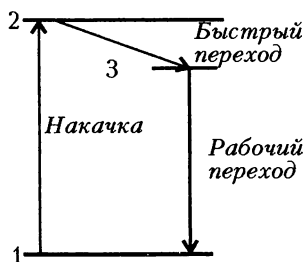


Рис.13. Трехуровневая система для получения инверсной населенности

населенности путем возбуждения энергетических уровней вещества с помощью источника вспомогательного излучения. На рисунке 13 представлена система 3-х уровней: основной уровень 1 и два возбужденных уровня 2 и 3. Если положение уровней 2 и 3 соответствует переходам в оптическом диапазоне, то они будут слабо заселены при комнатной температуре (~ 300 К). Если мощность накачки – вспомогательного излучения

с длиной волны, соответствующей переходу 1–2, достаточно велика, то можно перевести значительную часть частиц (атомов, молекул) с основного уровня 1 на возбужденный уровень 2. По мере заселения уровня 2 населенность уровня 1 станет умень-

шаться. Пусть теперь с уровня 2 частицы с большой вероятностью переходят на уровень 3. Если этот уровень метастабильный, т.е. со сравнительно большим временем жизни, то частицы станут скапливаться на нем. Уменьшение числа частиц на уровне 2 увеличит поглощение с основного уровня 1. В результате такого процесса населенность на уровне 3 может оказаться большей, чем на основном уровне, т.е. на переходе 3–1 получится инверсия населенности. Такая схема создания инверсии называется трехуровневой системой. Важно отметить, что для создания инверсной населенности на метастабильный уровень необходимо перевести, по крайней мере, половину всех атомов или молекул с основного уровня. Это требует значительной интенсивности источника возбуждения, который обычно называют источником накачки.

При использовании многих уровней можно также в принципе получить инверсную населенность по другой схеме, изображенной на рисунке 14. За счет мощного источника возбуждения (интенсивные импульсные лампы или электрический разряд) большое число частиц можно забросить на высоко лежащий уровень E_2 . Затем спонтанно происходит последовательный каскадный переход на нижележащий уровень E_3 (релаксация) либо с испусканием спонтанного излучения, либо без него (так называемый безызлучательный переход), и этот уровень начинает заселяться. С уровня E_4 частицы быстро переходят на основной уровень E_1 . Таким образом, между уровнями E_3 и E_4 может возникнуть инверсная населенность. Такая схема создания инверсии называется четырехуровневой системой. Ее важной особенностью является то, что не требуется существенно обеднять основной уровень, что снижает требования к источнику накачки.

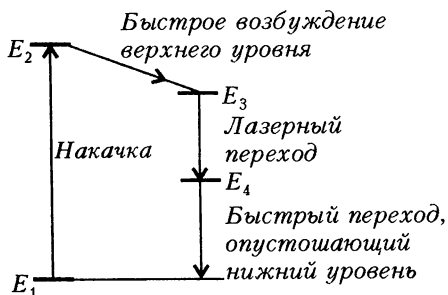


Рис.14. Схема четырех уровней для получения инверсной населенности

Характерные времена спонтанных переходов между конкретными уровнями могут различаться от наносекунд (разрешенные переходы) до миллисекунд (переходы из метастабильных состояний). Из-за сильного различия времен жизни для разных атомов и молекул можно ожидать, что в результате таких

каскадных переходов на какой-то паре уровней может возникнуть инверсная населенность. В исследованиях по спектроскопии как раз и определялись положения различных уровней и времена жизни возбужденных частиц на них. Были накоплены обширные данные в этой области. Нужно было изучить спектроскопические данные (частоты переходов и соответствующие времена жизни) и попытаться найти подходящие вещества и подходящие источники возбуждения, с помощью которых можно получить инверсную населенность.

Вторая трудность была решена за счет использования специального типа резонатора. Как отмечено выше, роль резонатора в генераторе, основанном на использовании индуцированного излучения, сводится к тому, чтобы излучение вновь возвращалось в активную среду в нужной фазе. В случае световых волн это можно сделать путем отражения от зеркала. Известно, что при нормальном падении светового пучка на зеркало падающая волна и отраженная волна интерферируют, образуя стоячую волну. Важно отметить, что при отражении происходит сдвиг фазы на полпериода для волн электрического поля (теряется половина длины волны), а для магнитного поля такого сдвига не происходит. Это приводит к радикальным изменениям. Если в бегущей волне колебания векторов электрического и магнитного поля происходят синфазно (максимум электрического поля совпадает с максимумом магнитного поля), то в стоячей волне ситуация иная – максимум электрического поля совпадает по времени с минимумом магнитного поля. Таким образом, в стоячей волне происходит периодическое перекачивание энергии электрического поля в энергию магнитного и наоборот. Отметим, что аналогичный процесс перекачки энергии электрического поля в энергию магнитного имеет место в колебательном контуре.

В объемном резонаторе при отражении от стенок как раз и возникают стоячие волны с длинами, близкими к размеру резонатора. Проблема создания резонатора в оптической области сводилась к созданию эквивалента объемного резонатора, размеры которого должны были быть значительно больше длины волны. К такому резонатору можно прийти, если увеличить один (продольный) размер объемного резонатора и убрать боковые стенки. Тогда резонировать будут стоячие волны между оставшимися стенками (зеркалами). По существу, в резонаторе удерживается излучение за счет образования стоячих волн, которые получаются с помощью зеркал. Расстояние между зеркалами может существенно превышать длину волны. В результате получается схема так называемого открытого резонатора.

В 1958 году опять практически одновременно и независимо друг от друга в СССР (А.М. Прохоров) и в США (А.Шавлов и Ч.Таунс) предложили такую схему. Открытый резонатор представляет собой два плоских зеркала, размещенных параллельно на некотором расстоянии друг от друга (рис.15). Причем одно из них имеет коэффициент отражения, близкий к 100%, а другое обладает некоторым малым пропусканием. При многократных отражениях от двух зеркал уже стоячие волны станут интерферировать, и получится многолучевая интерференция. При этом максимальное сложение амплитуд (резонанс) получается, когда между зеркалами укладывается целое число полуволн, т.е. выполняется соотношение $m(\lambda/2) = L$, где m – целое число, λ – длина волны, а L – расстояние между зеркалами. Волны, длины которых удовлетворяют этому соотношению, складываются так, что получается максимальная амплитуда. Этим волнам соответствуют частоты собственных, резонансных частот резонатора. Для других волн сложение с интерференцией будет сопровождаться взаимным гашением. Причем такое гашение будет тем большим, чем дальше отстоит длина волны от значения в вышеприведенном соотношении.

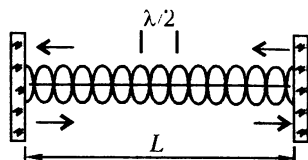


Рис.15. Открытый резонатор

Сложение многих волн приводит к обострению этого процесса. В результате получаются резонансные пики зависимости амплитуды от частоты. Чем больше число складываемых волн, тем больше будет отличие максимальной и минимальной амплитуд и тем острее будут резонансные пики. Сложение амплитуд для волн определенной длины означает концентрирование энергии колебаний, что и является функцией резонатора. В отличие от объемного резонатора радиодиапазона резонатор, состоящий из двух зеркал, может обладать очень большим числом собственных резонансных частот, поскольку L может быть значительно большей, чем λ . Эти собственные резонаторные частоты называют колебательными модами. Таким образом, проблема создания резонатора в оптическом диапазоне была решена не уменьшением его размеров, что, на первый взгляд, неизбежно, а совершенно новым подходом с увеличением размеров! Правда, такой резонатор в отличие от радиочастотного объемного резонатора обладает многими модами.

Сложение многих волн приводит к обострению этого процесса. В результате получаются резонансные пики зависимости амплитуды от частоты. Чем больше число складываемых волн, тем больше будет отличие максимальной и минимальной амплитуд и тем острее будут резонансные пики. Сложение амплитуд для волн определенной длины означает концентрирование энергии колебаний, что и является функцией резонатора. В отличие от объемного резонатора радиодиапазона резонатор, состоящий из двух зеркал, может обладать очень большим числом собственных резонансных частот, поскольку L может быть значительно большей, чем λ . Эти собственные резонаторные частоты называют колебательными модами. Таким образом, проблема создания резонатора в оптическом диапазоне была решена не уменьшением его размеров, что, на первый взгляд, неизбежно, а совершенно новым подходом с увеличением размеров! Правда, такой резонатор в отличие от радиочастотного объемного резонатора обладает многими модами.

В оптике система двух параллельно расположенных зеркал применяется для получения многолучевой интерференции. Это

хорошо известный интерферометр Фабри–Перо, с помощью которого получают узкие резонансные линии пропускания. Резкость таких линий (пиков) пропускания зависит от коэффициента отражения зеркал (им определяется число интерферирующих пучков). Интерферометр Фабри–Перо с успехом используется в качестве спектроскопического прибора, обладающего высоким спектральным разрешением. Из-за полной аналогии интерферометра Фабри–Перо и открытого резонатора сам открытый резонатор лазера часто называют резонатором Фабри–Перо.

В случае, когда $L \gg \lambda$, между зеркалами укладывается огромное число полуволн. Пусть $L = 1$ м, а $\lambda_0 = 0,5$ мкм (зеленый свет), тогда $m = 4 \cdot 10^6$, т.е. между зеркалами укладывается более миллиона волн. Для соседних волн ($m + 1$, $m - 1$), на которых получается резонанс, их длины будут отличаться от λ_0 на величину λ_0/m – в рассмотренном примере это около 10^{-4} нм, т.е. на очень малую величину.

При помещении в такой резонатор активной среды в нем возникает спонтанное и усиленное вынужденное излучение. Те волны, направление распространения которых совпадает с осью резонатора (перпендикулярно зеркалам) и для которых выполняется условие резонанса, усиливаются особенно эффективно, поскольку их амплитуды увеличиваются из-за интерференции. Эти волны проходят через активную среду большее число раз по сравнению с волнами, распространяющимися под некоторым углом. Это означает, что в резонаторе увеличивается длина пути через активную среду, а интерференция способствует усилению. Конкретно, волна с резонансной частотой, проходя активную среду, максимально усиливается. Дойдя до полупрозрачного зеркала, волна частично выходит наружу, а частично отражается назад. Отразившись от зеркала, она снова проходит активную среду и усиливается и т.д. Если усиление в активной среде компенсирует потери излучения за счет выхода наружу, а также другие потери (например, за счет рассеяния излучения в веществе), то возникает самовозбуждение и генерация на частоте колебательной моды резонатора. При этом происходит регенеративное сужение спектральной линии излучения (за счет большего усиления в центре линии).

Как уже отмечалось, уровни, в том числе те, на которых получается инверсная населенность, имеют определенную ширину. Это означает, что и полоса усиления также имеет определенную ширину. Как правило, эта ширина в оптическом диапазоне намного превосходит интервал между соседними колебательными

ми модами открытого резонатора (рис.16). В результате генерация может происходить на нескольких модах резонатора, частоты которых близки к максимуму полосы усиления и которые соответствуют направлению распространения, перпендикулярному плоскости зеркал (по оси распространения волны). Такие моды называются аксиальными. Очевидно, что если зеркало резонатора будет наклонено к оси, то при отражениях излучение в конце концов покинет резонатор. Потери в результате такого ухода излучения зависят от угла наклона и длины резонатора. Поэтому требуется тщательная настройка зеркал резонатора для получения минимальных потерь в резонаторе.

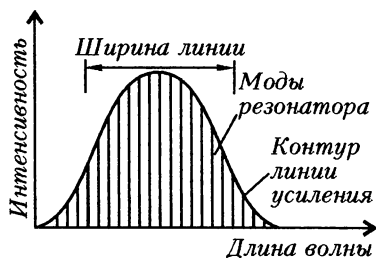


Рис.16. Контур линии усиления активной среды и моды резонатора, попадающие в него

Обычно потери в резонаторе характеризуют величиной добротности резонатора. Она определяется отношением энергии, заключенной в резонаторе, к энергии, которая его покидает. В случае открытого резонатора эта величина зависит от коэффициентов отражения зеркал и от угла наклона одного по отношению к другому. Правда, следует заметить, что при малом угле, таком что на длине между зеркалами укладывается на одну или несколько полуволн больше или меньше, разница в потерях будет невелика. Это означает, что генерация может получиться и на волнах, которые распространяются под некоторыми малыми углами. Этим волнам соответствуют так называемые неаксиальные моды. Хотя открытый резонатор обладает очень многими модами, важно, что они соответствуют плоским волнам, распространяющимся в одном направлении. Тогда генератор с таким резонатором будет испускать остронаправленный пучок излучения.

Изложенные соображения относительно получения инверсии и конструкции резонатора были в 1960 году реализованы Т.Мэйманом (США) в созданном им генераторе волн оптического диапазона. Он и получил название лазер (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). В качестве активной среды использовался кристалл рубина, а в качестве источника накачки — интенсивное излучение импульсной лампы-вспышки. Естественно, что такой лазер работал в импульсном режиме. Менее чем через год А.Джаван, В.Беннет, Д.Эрриот (США) запустили

лазер на смеси газов гелия и неона, возбуждаемой непрерывным электрическим разрядом. Этот лазер работал в непрерывном режиме.

Оба лазера сразу же продемонстрировали весьма необычные свойства по сравнению со всеми известными до того источниками света. Прежде всего оказалось, что степень когерентности излучения исключительно высока. По этой причине лазер часто называют оптическим источником когерентного излучения. Высокая когерентность во времени проявлялась в высокой степени монохроматичности излучения – узкая спектральная линия, а высокая когерентность в пространстве – в том, что излучение получалось в виде почти параллельного пучка. Другим необычным свойством оказался ярко выраженный пороговый характер работы – лазер скачком начинал работать лишь при достижении определенного уровня возбуждения активной среды.

Итак, развитие радиофизики и радиотехники, квантовой физики и спектроскопии привело к созданию совершенно нового источника света – лазера.

ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРОВ

Кристалл розового рубина, использованный в первом лазере, является кристаллической окисью алюминия (Al_2O_3) с малой примесью (около 5%) ионов хрома (Cr^{3+}). Именно эта примесь придает рубину характерную окраску за счет широкой полосы поглощения света в видимом диапазоне. Рубин обладает люминесценцией, а именно под действием света с длиной волны короче 500 нм (зеленый свет) испускает красный свет. Спектральные и люминесцентные свойства рубина были хорошо изучены. На основании этих исследований была установлена система энергетических уровней, упрощенная схема которой показана на рисунке 17. В спектре поглощения имеется широкая полоса, попадающая в видимый диапазон (сине-зеленый свет). При поглощении этого света ионы хрома переходят с основного уровня E_1 в возбужденное состояние на уровне E_2 (в данном случае это целая полоса). С него происходит безызлучательный переход на сравнительно узкий уровень E_3 , с которого осуществляется переход в основное состояние с испусканием кванта люминесценции на длине волны 694,3 нм (красный свет). Время жизни возбужденных ионов на уровне E_3 составляет около 3 мс. Поэтому эту схему уровней можно, в принципе, использовать для получения инверсной населенности по 3-х уровневой схеме – путем накопления ионов на уровне E_2 при достаточно интенсивном излучении, поглощаемом в полосе уровня E_2 .

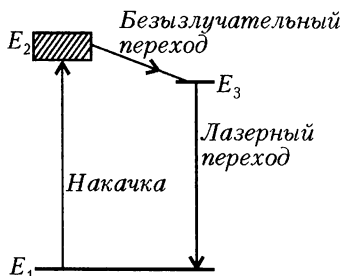


Рис.17. Упрощенная схема уровней рубина

Оценки показали, что нужную степень возбуждения, при которой получается инверсная населенность, можно получить с помощью излучения импульсной лампы-вспышки, которая широко применяется для фотографирования. Эта лампа представляет собой кварцевую трубку с электродами, наполненную ксеноном. Лампа подсоединялась к батарее конденсаторов, которую можно было заряжать до определенной регулируемой

величины высокого напряжения (3–5 кВ). При разряде в лампу вкладывается энергия, равная $CU^2/2$, где C – емкость батареи, а U – напряжение, до которого она заряжена. Эта энергия возбуждает атомы ксенона, испускающие сильно уширенные линии. Получается высокоэффективный источник излучения в широкой области видимого спектра. Энергию излучения можно регулировать, изменяя напряжение на конденсаторной батарее. Длительность вспышки определяется величиной RC , где R – сопротивление горячей лампы. Согласно оценкам, используя существующие лампы, можно было регулировать энергию разряда (составляющую несколько кДж) и, соответственно, энергию излучения лампы при длительности разряда около 1 мс, т.е. менее времени населенности уровня E_3 .

В результате получился лазер, устройство которого показано на рисунке 18. Образец рубина представлял собой цилиндр

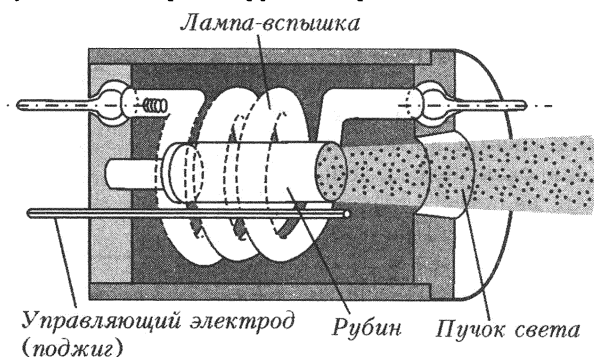


Рис. 18. Устройство рубинового лазера

диаметром 6 мм и длиной 25 мм с плоскими и параллельными торцами, обработанными с высокой оптической точностью. На них с помощью испарения в вакууме наносились слои серебра, имеющие высокий коэффициент отражения (около 95%). Причем на одном торце коэффициент отражения был максимальным, а на другом имелось пропускание около 1%. Эти отражающие слои образовывали высокодобротный резонатор Фабри–Перо. Стержень рубина помещался внутри спиральной лампы-вспышки, которая была окружена алюминиевым кожухом с отполированными внутренними стенками (осветитель), что позволяло собрать излучение лампы на рубине.

Лазер сразу же продемонстрировал свои необычные свойства. В эксперименте излучение наблюдалось на листе бумаги на расстоянии около метра. Напряжение конденсаторной батареи

и, следовательно, энергия излучения накачки последовательно увеличивались. Сначала наблюдалось широкое пятно розового цвета, получающееся из-за спонтанного излучения люминесценции, которое проходило через зеркало с малым пропусканием. При достижении определенного напряжения на лампе картина резко менялась. На фоне розового пятна появлялось яркое красное пятно с резкими краями и с диаметром, близким к диаметру рубина, т.е. само излучение представляло направленный пучок, и наблюдался порог, характерный для генераторов. Наблюдение изменения интенсивности излучения во времени с помощью фотоумножителя (ФЭУ) и осциллографа также продемонстрировало необычный характер излучения (рис.19). До

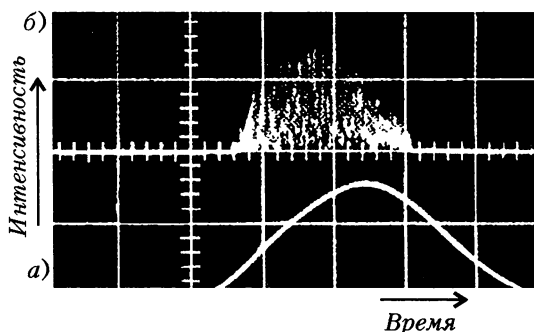


Рис.19. Осциллограммы излучения рубинового лазера; а) до порога генерации; б) после порога

порога наблюдалась плавная кривая интенсивности, соответствующая излучению люминесценции, пропорционального интенсивности лампы накачки. При достижении порога в максимуме этой кривой появлялись короткие (около 0,1 мкс) беспорядочные импульсы, так называемые пички излучения, характерные для режима генерации. По мере увеличения интенсивности накачки их число увеличивалось, и они занимали все больший интервал времени. Происхождение этих пичков позднее объяснили сложными релаксационными процессами генерации лазерного излучения (взаимная связь между величиной инверсной населенности и интенсивностью лазерного излучения, которое эту населенность уменьшает). Другие эксперименты демонстрировали особые когерентные свойства лазерного излучения.

Как уже было упомянуто, в опыте Юнга впервые были продемонстрированы волновые свойства света путем наблюдения явления интерференции. Рассмотрим подробнее этот опыт (см. рис.1). Свет от источника направляется на узкую щель и

испытывает дифракцию на ней. Расходящийся пучок света затем попадает на две узкие щели и также дифрагирует на них. В области перекрытия двух расходящихся из-за дифракции пучков происходит интерференция, результат которой наблюдается в виде полос на экране. Яркие полосы получаются в результате сложения волн, а темные – в результате того, что волны гасят друг друга. Если первую щель убрать, то интерференционная картина исчезает. Это объясняется следующим образом. Источник света имеет конечные размеры, и каждый независимый излучатель посылает свет на две щели под определенным углом. В результате интерференционная картина от каждого излучателя смещается на этот угол. Из-за хаотического распределения излучателей в пространстве и, следовательно, углов, под которыми они освещают две щели, интерференционные картины каждого излучателя накладываются друг на друга. Изображение «замазывается», и мы видим равномерно освещенную область. Узкая щель фиксирует угол, под которым свет падает на две щели. По существу, эта щель формирует волну, которая, в свою очередь, формирует две когерентные между собой волны, поскольку они возбуждаются одной и той же проходящей волной.

В случае лазера отпала необходимость в щели, формирующей когерентный источник. На выходном зеркале лазера наносились две узкие щели. В излучении при этом наблюдались полосы интерференции, как в опыте Юнга, но с тем отличием, что не требовалась дополнительная щель для организации когерентного источника. Излучение, выходящее из зеркала резонатора, уже обладало высокой пространственной когерентностью, т.е. фазы волн отдельных участков сечения пучка были согласованы. Это проявлялось в высокой яркости излучения, обусловленной высокой направленностью пучка (малой величиной телесного угла, в котором сосредоточено излучение, так называемого угла расходимости пучка).

При фокусировании пучка с углом расходимости ϕ собирающей линзой с фокусным расстоянием F излучение концентрируется в пятне с диаметром $d = \phi F$ с соответствующим увеличением интенсивности (мощность света, сосредоточенная в площади пятна). Предельно малый угол расходимости пучка излучения ограничивается дифракцией. Согласно принципам физической оптики, параллельный пучок света, ограниченный круглым отверстием с диаметром D , испытывает дифракцию, в результате которой параллельный пучок становится пучком, расходящимся под углом ϕ , определяемым формулой $\phi = k\lambda/D$, где λ – длина волны, а k – коэффициент порядка 1, зависящий от распределе-

ния интенсивности по сечению пучка. В случае лазера роль отверстия играет диаметр пучка, поэтому предельно малый угол расходимости лазерного пучка определяется дифракцией и называется дифракционной расходимостью.

Высокая пространственная когерентность излучения лазера позволяет получить малый угол расходимости пучка и, следовательно, сконцентрировать энергию в малой площади при фокусировании. Хотя полная энергия лазерного излучения лазера на рубине не превышала долей джоуля, при фокусировании его линзой с фокусным расстоянием около 50 мм на поверхность бритвенного лезвия в нем прожигалось отверстие диаметром менее 0,1 мм, что свидетельствовало о высокой интенсивности лазерного излучения.

Поскольку излучение лазера сосредоточено в спектре, ширина которого не превышает ширины естественной линии, т.е. является в высшей степени монохроматичным, было очевидно, что спектральная яркость, т.е. интенсивность, приходящаяся на единичный интервал длин волн, также чрезвычайно высока. Высокая монохроматичность означает высокую степень временной когерентности. Это было продемонстрировано в опыте с двумя лазерами. При взаимодействии их излучений (наложение друг на друга их пучков в пространстве и совпадение отдельных пучков во времени) также наблюдалась интерференция. В оптике интерференция от независимых источников света никогда не возникает.

Вскоре после создания лазера на рубине А. Джаван с коллегами (США) запустили лазер, работающий на смеси гелия и неона, возбуждаемой электрическим разрядом в трубке при давлении газа около 1 мм рт.ст. В отличие от рубинового лазера этот газовый He-Ne лазер работал в непрерывном режиме. Существенным фактором, обеспечивающим эту особенность, было то, что для создания инверсной населенности использовалась 4-х уровневая схема накачки (см. рис.14). Согласно этой схеме, инверсная населенность возникает между уровнями, расположенными значительно выше основного. Это значит, что нижний уровень лазерного перехода практически не заселен, и, в отличие от 3-х уровневой схемы, нет необходимости возбуждать с основного уровня больше половины частиц. Это сильно облегчает условия возбуждения – требуется несравненно меньшая мощность накачки.

Использовалось каскадное возбуждение уровней атомов в разряженном газе. С помощью электрического разряда получают электроны, ускоренные электрическим полем, которые

могут эффективно возбуждать атомы на уровне столь высокой энергии, которая не достижима при использовании оптического излучения. После возбуждения атомы спонтанно переходят через промежуточные уровни с испусканием фотонов. Яркие светящиеся красные неоновые трубки рекламы – пример такого источника.

Энергия возбуждения атомов одного сорта (He) может передаваться от них атомам газа другого сорта (Ne) при соударениях, которые называются неупругими (рис.20). Среди высоко лежащих уровней, которые возбуждаются электрическим разрядом, есть сравнительно долго живущие (метастабильные). В результате на определенной паре уровней этого газа может возникнуть инверсная населенность. Конкретно, использовался переход в

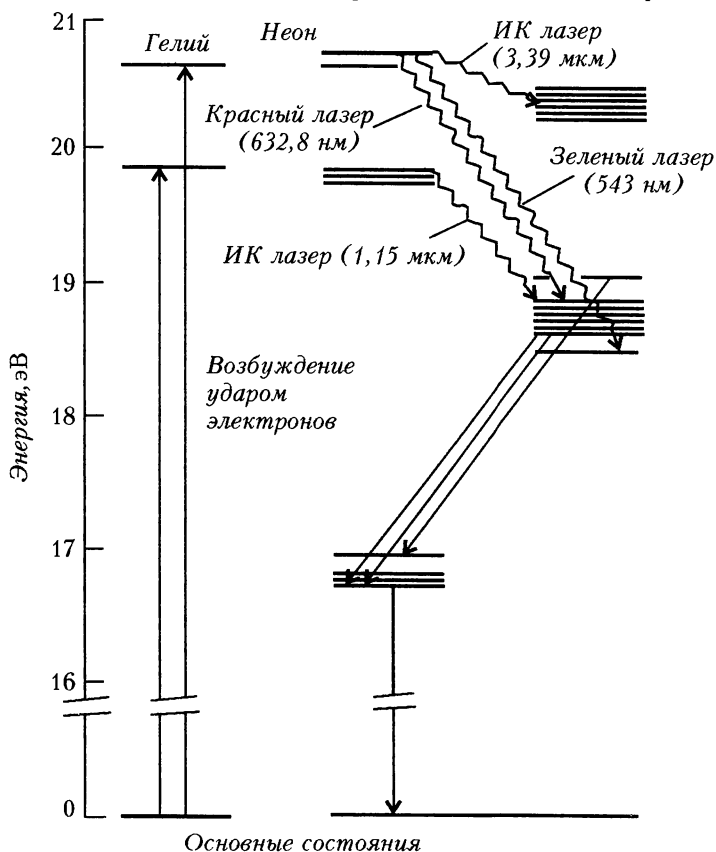


Рис.20. Схема получения инверсной населенности в смеси гелия и неона при электрическом разряде в газе

атоме Ne с длиной волны 1,15 мкм. Позже удалось обнаружить и другие переходы, в частности на длине волны 632,8 нм (красный свет), и He-Ne лазер красного света стал широко использоваться в науке и технике.

Из-за сравнительно низкой плотности газа получается малый коэффициент усиления на единицу длины, и поэтому длина активной среды должна быть довольно большой. Разрядная трубка имела длину около 100 см. Устройство такого лазера показано на рисунке 21. Разряд производился с помощью генератора СВЧ (около 30 МГц) через электроды, размещенные

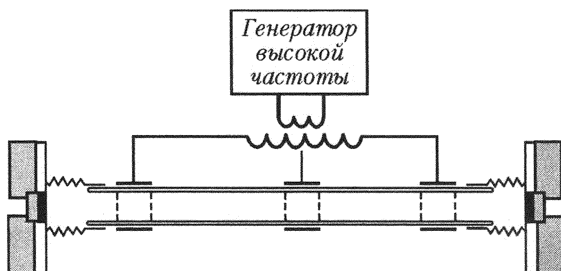


Рис.21. Устройство первого He-Ne газового лазера

снаружи на трубке. Поскольку усиление активной среды было не более 1% на проход, в резонаторе следовало использовать зеркала с потерями не более этого значения, т.е. коэффициент отражения должен быть не менее 99%. Слои металлов не обладают в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне достаточно высоким коэффициентом отражения из-за хотя и малого, но достигающего 2–5% поглощения. Поэтому использовались многослойные диэлектрические зеркала. Они представляют собой тонкие слои прозрачных материалов с разными показателями преломления, нанесенными на поверхность стекла. Как известно (формулы Френеля), на границе двух сред с показателями преломления n_1 и n_2 свет испытывает отражение с коэффициентом $R = ((n_1/n_2) - 1)^2 / ((n_1/n_2) + 1)^2$. При определенном подборе толщины слоев отраженные лучи света будут интерферировать, и коэффициент отражения увеличится. Подбирая толщины слоев с разными показателями преломления и число слоев, можно получить коэффициент отражения не менее 99,9% (рис.22). Сами слои наносятся путем напыления в вакууме на поверхность стекла некоторых материалов, имеющих разные показатели преломления (ZnS с $n = 2,3$ и MgF_2 с $n = 1,37$).

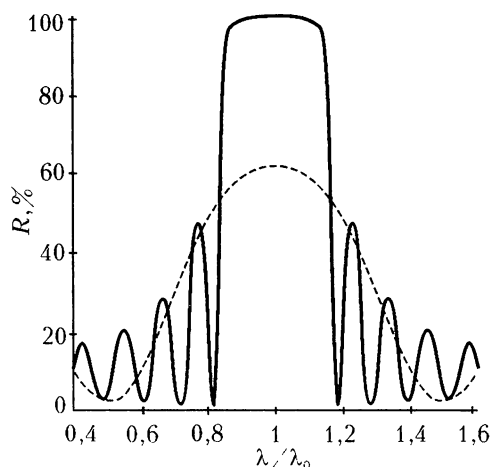


Рис.22. Зависимость коэффициента отражения многослойного диэлектрического зеркала от числа слоев: пунктир — 3 слоя, сплошная линия — 15 слоев

Исследования этого газового лазера непрерывного действия выявили новые особенности. Они обусловлены исключительно высокой временной когерентностью, поскольку лазер работал в непрерывном режиме. Как было отмечено выше, для спонтанного излучения отдельного атома характерной является естественная ширина линии спонтанного излучения, которая соответствует времени жизни энергетического уровня соответствующего перехода. Из-за эффекта Доплера происходит уширение спектральной линии излучения всего ансамбля атомов. С другой стороны, генерация происходит на резонансных линиях резонатора типа Фабри–Перо (модах резонатора), и за счет высокого коэффициента отражения зеркал эти линии оказываются уже, чем линия спонтанного излучения. Это происходит за счет регенеративного процесса. Из-за усиления в активной среде происходит еще большее сужение линии излучения. Частотный интервал между соседними модами резонатора $\delta\nu$ равен обратному времени пробега светом по замкнутому пути между зеркалами, т.е. $\delta\nu = c/(2L)$, что при расстоянии 100 см между зеркалами составляет 150 МГц. Этот частотный интервал оказывается меньше ширины линии лазерного перехода, обусловленного доплеровским уширением. Таким образом, генерация может происходить на нескольких модах резонатора, попадающих в контур усиления активной среды. Такая генерация называется многомодовой. При небольших наклонах зеркал резонатора возникают неаксиальные моды. При их генерации получают определенные структуры излучения по сечению пучка лазера. На рисунке 23 показаны распределения интенсивности по сече-

нию лазерного пучка при небольших наклонах зеркала резонатора с генерацией разных мод. Исследования ширины одиночной линии излучения He-Ne лазера, показали, что ее величина может составлять менее 10^{-1} Гц! Это означает огромную величину временной когерентности и монохроматичности излучения лазера непрерывного действия.

Отметим, что высокая степень временной когерентности газового He-Ne лазера, работающего на длине волны красного света,

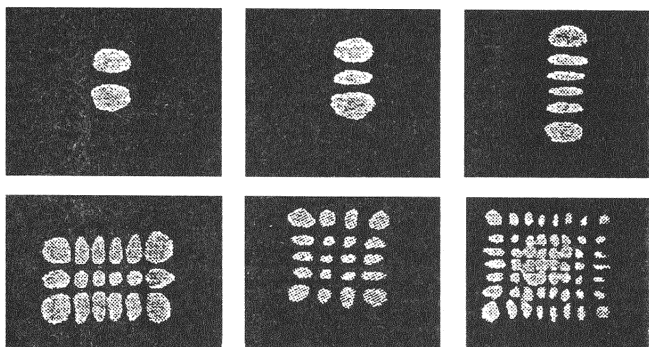


Рис.23. Распределение интенсивности по сечению пучка в случае многомодовой генерации He-Ne лазера

проявляется при наблюдении его излучения невооруженным глазом. Пятно излучения на экране (например, на белой бумаге) имеет зернистую структуру – яркие, дрожащие точки. Это связано с тем, что в глаз попадают лучи, рассеянные поверхностью экрана, причем они испытывают интерференцию с беспорядочно изменяемой фазой между интерферирующими волнами. Высокая степень когерентности приводит к тому, что всегда находятся направления, при которых волны полностью гасят друг друга, а также направления, в которых, наоборот, яркость максимальна. В том случае, когда временная когерентность превышает время инерции глаза (около 0,1 с), изменения интенсивности из-за интерференции становятся заметными как раз в виде вспыхивающих и гаснущих точек.

В случае обычных источников такие эффекты сглаживаются. Постоянный уровень интенсивности получается просто из-за усреднения огромного числа излучателей. Однако если излучение с постоянной интенсивностью от обычных источников наблюдается в очень узком телесном угле и с помощью быстродействующего (с временным разрешением лучшим, чем временная когерентность источника) и чувствительного приемника, то

такие случайные изменения интенсивности из-за интерференции (флуктуации излучения) становятся заметными и для обычных источников.

Итак, создание лазера означало появление генератора электромагнитных волн светового диапазона с принципиальными особенностями, а именно высокой временной (монохроматичность) и пространственной (направленный пучок) когерентностью и порогом действия. Тем самым, устранялось принципиальное различие между источниками света и генераторами радиоволн. Как уже неоднократно говорилось, обычные (не лазерные) источники оптического излучения испускают по существу электромагнитный шум. Их излучение происходит во все стороны, и возможность получения направленных пучков света обуславливается оптическими системами (линзами, зеркалами), которые выбирают лучи определенной направленности, а не физической природой процесса испускания света. Теоретически показано, что оптические системы не могут повысить яркость источника излучения.

Однако с появлением лазеров ситуация радикально изменилась. Например, для лазера на рубине с длиной волны $0,7 \text{ мкм}$ и диаметром пучка 7 мм угол дифракционной расходимости составляет около 10^{-4} рад. Это означает, что диаметр пятна лазерного излучения возрастает всего лишь вдвое на расстоянии 70 м . Диаметр пучка можно увеличить с помощью оптической системы. Например, используя телескоп, можно получить диаметр пучка порядка диаметра его объектива (линзы или зеркала). Так, если зеркало астрономического телескопа имеет диаметр $2,5 \text{ м}$, то угол дифракционной расходимости уменьшится до $3 \cdot 10^{-7}$ рад. Следовательно, увеличение диаметра пучка вдвое получится уже на расстоянии 8000 км .

Высокая направленность лазерного излучения была продемонстрирована в экспериментах по локации Луны, которые были проведены вскоре после создания рубинового лазера. Более того, это свойство лазерного излучения, а также принципиальная возможность достижения огромной энергии и мощности излучения лазеров послужили причиной появления проектов создания лазерного оружия. Все эти вопросы будут обсуждаться позже.

НОВЫЕ ТИПЫ ЛАЗЕРОВ

После запуска первых лазеров с демонстрацией их основных особенностей начался подлинный бум работ по созданию и исследованию лазеров. Концепция взаимодействия фотонов с веществом в виде спонтанного и вынужденного излучения является фундаментальным, универсальным принципом. Он справедлив для самых разных длин волн и применим не только для дискретных уровней энергии, но и для энергетических состояний в виде полос в спектре, характерных для конденсированных сред (жидкости и твердые тела), и в виде зон, характерных для полупроводников. Поэтому неудивительно, что появилось множество типов лазеров, основанных на самых разных принципах создания инверсной населенности и работающих на разных длинах волн от миллиметрового радиодиапазона до мягкого рентгена. Для них использовались различные активные среды, основанные на разных способах возбуждения вещества. Кроме того, развивались новые способы генерации, построенные на модификациях оптического резонатора. Это позволило управлять длиной волны лазерного излучения и временными параметрами, осуществляя режимы от непрерывной генерации на одной длине волны до импульсов вплоть до фемтосекундной длительности.

Важно отметить, что появление многих типов лазеров открыло возможность использовать их излучение для получения инверсной населенности в других материалах. Благодаря высокой интенсивности и монохроматичности лазерного излучения появились лазеры, в которых для накачки используется излучение других лазеров (лазерная накачка). Это позволяет существенно расширять диапазон длин волн лазерного излучения и улучшать выходные параметры – такие как коэффициент полезного действия и качество пучка. Рассмотрим некоторые из многочисленных типов лазеров.

Лазеры, основанные на новых активных средах

Лазеры на люминесцентных кристаллах и стеклах. Наряду с рубином были успешно использованы и другие кристаллы с примесями ионов, которые способны испускать

люминесцентное излучение. В качестве таких примесей используются хром, кобальт, никель, уран, а также редкоземельные элементы. В частности, широкое распространение получили лазеры на кристаллах иттриево-алюминиевого граната с примесью ионов неодима (Nd^{3+}). Этот кристалл, как и рубин, обладает широкими полосами поглощения, что позволяет использовать ламповую накачку. Но, в отличие от рубина, схема уровней допускает накачку по 4-х уровневой схеме, а генерация происходит на длине волны 1,064 нм. Работа по такой схеме позволяет снизить величину энергии накачки и уменьшить нагрев кристалла, повышает коэффициент полезного действия и дает возможность получить непрерывный режим работы. Лазеры на гранатах имеют важное применение в медицине для хирургии и в военном деле в схемах дальномеров и прицелах (точечное оружие).

Оказалось также, что кроме кристаллов можно использовать и люминесцирующие стекла, в том числе стекла с примесью редкоземельных элементов, в частности с ионами неодима. Такое неодимовое стекло особенно замечательно. Дело в том, что изготовление кристаллов с высокой однородностью и размерами, нужными для создания лазеров (с диаметром до 1 см и длиной свыше 10 см), является сложной технологической задачей. А из стекла можно было изготавливать лазерные стержни с диаметром до 10 см и длиной до 1 м, а также лазерные элементы в виде пластин, причем с более высокой оптической однородностью по сравнению с кристаллами. Накачку неодимового стекла можно было производить теми же импульсными лампами. Именно с использованием лазерных элементов на неодимовом стекле создаются гигантские установки, предназначенные для исследований в области управляемого термоядерного синтеза, о которых речь пойдет в разделе о применениях лазеров.

Лазеры на растворах красителей. Также оказалось, что для создания лазеров можно использовать растворы некоторых люминесцирующих веществ, известных как красители. Они имеют широкие полосы поглощения и излучения и поддаются возбуждению излучением импульсных ламп. Элементом активной среды в этом случае является кювета – цилиндрическая трубка с плоскопараллельными окошками, заполненная раствором люминесцирующего красителя. Важной особенностью таких красителей является очень большая ширина полосы усиления. Благодаря этому удалось получить лазерное излучение в широком диапазоне длин волн и создать новый тип лазера с плавной

перестройкой длины волны излучения. Подробнее устройство такого лазера мы обсудим ниже. Лазерная генерация была получена на многих красителях. Благодаря широким линиям усиления и большому набору красителей удалось перекрыть весь видимый диапазон от ближнего ИК (инфракрасного) до ближнего УФ (ультрафиолетового) диапазона.

Широкая линия усиления, присущая красителям, имеет еще одно очень важное значение. Дело в том, что излучение в виде импульса должно иметь достаточную ширину спектра, а именно при длительности импульса τ ширина спектра $\Delta\nu$ должна быть не менее чем $1/\tau$. Благодаря очень широким линиям усиления с помощью лазеров на красителях удалось получить лазерное излучение в виде импульсов, длительность которых составляла несколько фемтосекунд. Особенности таких лазеров будет обсуждена в разделе, посвященном лазерам ультракоротких импульсов.

Газовые лазеры. Газовые лазеры также получили развитие. Совершенствуя конструкции, способы организации электрического разряда в газах, а также используя зеркала резонатора с высоким отражением на других длинах волн, удалось получить генерацию на многих переходах атомов и молекул. Так, в He-Ne лазере помимо генерации на 1,15 мкм и 632,8 нм (красный свет) удалось получить генерацию на 3,39 мкм и в области зеленой части видимого спектра. Коэффициент усиления на 3,39 мкм оказался очень высоким, и He-Ne лазер на этой длине волны стал использоваться в качестве оптического стандарта частоты.

Исследования в области газового разряда привели к созданию аргонового лазера. В нем осуществляется непрерывный разряд в узкой трубке, наполненной аргоном. За счет использования магнитного поля получается разряд с большой плотностью тока. В результате возникает активная среда, которая обеспечивает непрерывную генерацию на уровне нескольких ватт. Лазер работает на длинах волн 514,5 нм (зеленая линия) и 488 нм (голубая линия). Аргоновые лазеры широко используются в так называемых лазерных шоу.

Поиск газоразрядных активных сред, позволяющих получить большую выходную мощность и высокий коэффициент полезного действия (КПД), привел в 1964 году к открытию мощного лазера на углекислом газе. В нем используется инверсная населенность колебательных уровней молекулы CO_2 , получающаяся при электрическом разряде в смеси газов CO_2 , N_2 , He. Усиление на многих вращательно-колебательных

переходах в области длины волны 10 мкм возникает за счет очень эффективного возбуждения колебательных уровней молекулы N_2 электронами, ускоренными в разряде с гелием, и резонансной передачей этого возбуждения молекуле CO_2 при столкновениях. Кроме того, столкновения молекул CO_2 с атомами Не быстро опустошают нижний колебательный уровень лазерного перехода, что и ведет к возникновению инверсной населенности. При оптимизации состава смеси и условий электрического разряда удается получать непрерывную мощность лазерного излучения на длине волны 10,6 мкм до 75 Вт на 1 м длины разряда при КПД порядка 10%. Увеличение мощности достигается наращиванием длины активной среды. В настоящее время выходная мощность лазеров на углекислом газе достигает десятков киловатт. Этот тип лазера прост и дешев и нашел широкое применение в медицине, а также в промышленности, где он с успехом используется для сварки и резки с помощью лазерного луча.

Разновидностью лазера на углекислом газе является газодинамический лазер – ГДЛ. В нем источником энергии является не электрический разряд, а тепловая энергия, возникающая при сжигании углеводородов. Инверсная населенность на лазерном переходе с длиной волны 10,6 мкм создается за счет быстрого расширения газовой смеси, содержащей CO_2 , предварительно нагретой до высокой температуры. Расширение, которое происходит со сверхзвуковыми скоростями, необходимо для понижения температуры и давления смеси за время, с одной стороны, короткое по сравнению с временем жизни верхнего лазерного уровня и, с другой стороны, длительное по сравнению с временем жизни нижнего лазерного уровня. При этом населенность верхнего лазерного уровня остается почти такой же, как и в горячем углекислом газе. А населенность нижнего уровня уменьшается до значения, соответствующего более низкой температуре, получающейся за счет сверхзвукового истечения газа.

Инверсная населенность вдоль потока сохраняется от начала области расширения газа на расстоянии около 20 см. Зеркала резонатора соответствующих размеров располагаются поперек струи истечения газа. По существу, конструкция ГДЛ является своеобразным ракетным двигателем. Продолжительность непрерывной генерации составляет несколько секунд, но ее мощность может достигать нескольких сотен киловатт. Излучение такого лазера насквозь прожигает кирпич! Этот лазер вызвал большой интерес создателей лазерного оружия. Однако из-за неоднородностей показателя преломления газа в струе и отно-

сительно большой длины волны трудно получить остронаправленный пучок.

Экимерные лазеры. Помимо газовых лазеров, работающих в видимом и ИК диапазонах, были созданы газовые лазеры УФ диапазона. Принцип действия их следующий. При электрическом разряде в смесях благородных газов с галогенами (Ag, Kr, Xe и F, Cl) образуются особые короткоживущие молекулы – эксимеры. Их особенность состоит в том, что они существуют лишь в возбужденных состояниях. Таким образом, их образование создает активную среду. В результате родились эксимерные лазеры: XeCl ($\lambda = 309$ нм), XeF ($\lambda = 351$ нм), KrF ($\lambda = 248$ нм), ArF ($\lambda = 193$ нм). Они являются удобными, эффективными и мощными источниками лазерного излучения в УФ диапазоне.

Полупроводниковые лазеры. Эти лазеры представляют собой один из наиболее важных типов лазеров, используемых в настоящее время. Их отличительной особенностью являются малые размеры и способность с высоким КПД (свыше 50 %) преобразовывать электрический ток в лазерное излучение. В значительной мере успехи в области полупроводниковых лазеров обусловлены бурным развитием физики полупроводников и технологий создания полупроводниковых материалов и устройств. Транзистор, интегральные схемы, компьютеры и многочисленные устройства радиоэлектроники обязаны своим появлением физике и технике полупроводников. Едва ли не главным является технология создания новых материалов заданного химического состава с высокой чистотой и с контролируемыми примесями. Эти материалы получают в виде слоев строго контролируемой толщины путем напыления этих слоев в условиях высокого вакуума и определенной температуры.

Полупроводниковый лазер имеет свою историю. Наш замечательный исследователь радиотехники О.Лосев, работавший в Нижегородской радиолaborатории в 20-е годы прошлого столетия, изучая кристаллические генераторы радиоволн (предшественники транзистора), открыл свечение, которое получалось при прохождении тока через контакт между металлом и кристаллами карборунда или оксида цинка. Это было, по существу, открытие светоизлучающего диода – предшественника полупроводникового лазера. Теоретическое обоснование идеи полупроводникового лазера было изложено в работе Н.Г.Басова, Б.М.Вула и Ю.М.Попова в 1959 году еще до появления первых лазеров.

В отличие от других лазеров в полупроводниковом лазере используются не дискретные уровни и полосы, а зоны полупроводникового материала. Это валентная зона и зона проводимости, разделенные запрещенной зоной. Валентная зона целиком заполнена электронами. Если по какой либо причине в валентной зоне отсутствует электрон, то это означает, что в ней появилось возбуждение в виде положительно заряженной квазичастицы – дырки. Носителями заряда в полупроводнике являются электроны в зоне проводимости и дырки в валентной зоне. Лазерный эффект связан с межзонной люминесценцией, которая обусловлена рекомбинацией созданных внешним воздействием избыточных электронов и дырок. Поэтому длина волны полупроводникового лазера определяется шириной запрещенной зоны. Используя полупроводниковые материалы разного состава, можно менять длину волны в пределах от видимой области спектра до ИК диапазона.

Большинство полупроводниковых материалов, используемых в лазерах, основано на соединениях элементов третьей и пятой групп таблицы Менделеева. Это, соответственно, Al, Ga, In, и P, As, Sb. Полупроводниковые лазеры на основе этих материалов перекрывают диапазон длин волн от 630 до 1600 нм. Отличительной чертой полупроводниковых лазеров является исключительно высокий коэффициент усиления активной среды. Он может достигать 10000 на сантиметр длины. Благодаря этому размеры полупроводниковых лазеров весьма малы (типичный размер $300 \times 300 \times 100$ мкм).

Материалы, используемые в полупроводниковых лазерах, имеют некоторые контролируемые примеси. При этом в зависимости от вида примесей получают полупроводники с разной концентрацией электронов и дырок. Полупроводник, в котором преобладают электроны, называется полупроводником *n*-типа, а тот, в котором преобладают дырки, – *p*-типа. Способом накачки полупроводникового лазера является инжекция избыточных носителей заряда через контакт между *p*- и *n*- материалами (по этой причине такой лазер называется инжекционным). Этот контакт называется *p-n*-переходом, который обладает способностью пропускать ток в одном направлении, т.е. является диодом (по этой причине полупроводниковый лазер также называется диодным). Слои полупроводников и нужные переходы получают с помощью современных наукоемких технологий.

Принцип действия такого диода показан на рисунке 24. Вероятность заполнения зоны носителями тока (электронами и дырками) в полупроводниковых материалах определяется так

называемым уровнем Ферми. Поскольку материалы имеют примеси (легированы), уровень Ферми F_p полупроводника p -типа попадает в валентную зону, а уровень Ферми F_n полупроводника n -типа оказывается в зоне проводимости. Если к n - p -переходу не приложено внешнее напряжение, то оба уровня Ферми располагаются на одной горизонтальной прямой (см. рис.24,а). Если же к этому переходу приложено напряжение U , то между

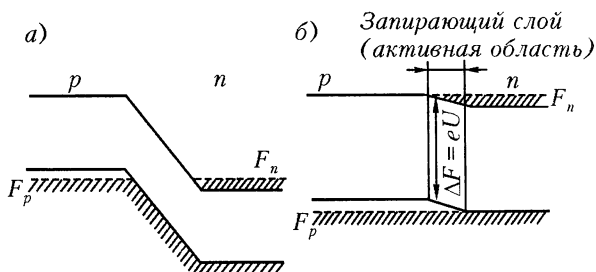


Рис.24. Принцип действия полупроводникового лазера с p - n -переходом: а) нулевое смещение; б) смещение в прямом направлении

двумя уровнями возникает смещение на величину $\Delta F = eU$ (см. рис.24,б). Можно видеть, что при этом в запирающем слое перехода возникает инверсная населенность. Таким образом, когда к образцу приложено внешнее напряжение в прямом направлении, в запирающий слой инжектируются электроны из зоны проводимости n -типа и дырки из валентной зоны p -типа, что и создает инверсную населенность.

На рисунке 25 схематически показано устройство лазера, использующего p - n -переход (заштрихованная область представляет собой запирающий слой). Толщина запирающего слоя обычно очень мала. Надо сказать, что полупроводниковые материалы имеют сравнительно большой коэффициент преломления и поэтому коэффициент отражения на границе полупро-

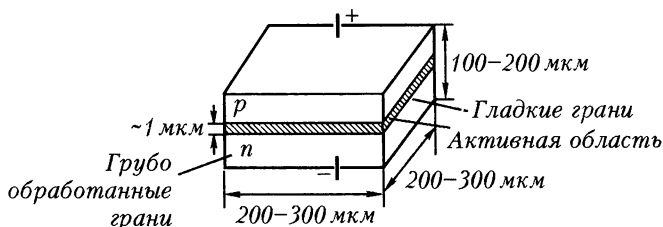


Рис.25. Полупроводниковый диодный лазер

водник – воздух достигает около 35%. При огромном усилении, характерном для инверсной населенности в полупроводнике, такого коэффициента отражения достаточно, чтобы получить оптический резонатор. Он просто образуется торцевыми гранями активного элемента (изготавливаемого обычно путем раскалывания пластин по плоскостям спайности кристалла полупроводникового материала). Поперечные размеры лазерного пучка гораздо больше толщины активной области, т.е. лазерный пучок проходит и в те области, где нет усиления, а есть некоторые потери. Поэтому усиление в активной области должно превосходить не только потери за счет выхода через зеркала резонатора, но и эти дополнительные потери.

Первые полупроводниковые диодные лазеры работали в импульсном режиме и при низкой температуре (жидкий азот). Это было связано с проблемой отвода тепла. Их недостатком была также деградация – они выходили из строя после сравнительно короткого периода работы. В 1963 году Ж.И.Алфёров выдвинул идею, как устранить криогенное охлаждение и предотвратить деградацию. Он предложил заменить простой p - n -переход на переход с гетероструктурами – между двумя материалами с разными проводимостями располагаются дополнительные тонкие слои полупроводников другого состава (отсюда название). Показатель преломления дополнительных слоев несколько меньше, чем у основных частей диода, и за счет полного внутреннего отражения лазерное излучение не выходит за пределы области, в которой имеется усиление. Иными словами, получается оптический волновод, в котором удерживается лазерное излучение. Следовательно, исключаются потери, которые получались в случае простого p - n -перехода. Кроме того, активная область становится тоньше, что увеличивает плотность тока и усиление. Все это снижает требования на теплоотвод и позволяет работать в непрерывном режиме при комнатной температуре. В результате появился полупроводниковый лазер, основанный на двойной гетероструктуре. Он обладает малым порогом и может работать при комнатной температуре в течение весьма продолжительного времени. За разработки гетероструктурных полупроводниковых лазеров Ж.И.Алфёров в 2004 году был удостоен Нобелевской премии по физике. В конструкции полупроводникового лазера стали применяться многослойные структуры. Их свойства объясняются квантовой теорией, в которой они обозначаются как квантовые ямы. Отметим, что из-за огромного коэффициента усиления возможна работа и без резонатора. В этом случае получается усиленное вынужденное излу-

чение, и устройство называется светоизлучающим диодом. Такие излучатели широко применяются в качестве индикаторов в различных бытовых приборах, а также эффективных источников света.

Из-за малых размеров выходная мощность диодного лазера невелика, однако возможности полупроводниковой технологии позволяют создавать компактные наборы многих лазерных диодов, например в виде линеек. Непрерывная выходная мощность такой линейки может достигать сотен ватт.

Из-за своих замечательных эксплуатационных качеств, а также из-за доступности, которая достигается благодаря технологическим достижениям, полупроводниковые диодные лазеры нашли широкое применение в бытовых и технических устройствах записи и воспроизведения информации – так называемая оптическая игла в проигрывателях CD и CD-ROM, лазерные принтеры, передатчики в волоконно-оптических системах связи, а также указки, светящиеся игрушки, фонарики и др. Создание диодных лазеров на основе нитрида галлия, излучающих синий свет, позволило создать более совершенные системы HD-DVD видео. В настоящее время в год выпускаются сотни миллионов диодных лазеров и светоизлучающих диодов.

Важнейшим применением полупроводниковых лазеров также является оптическая накачка твердотельных и волоконных лазеров. Длины волн полупроводниковых лазеров лежат в видимом и ближнем ИК диапазонах и их можно регулировать, подбирая материалы и толщины слоев. В частности, можно получить совпадение с длинами волн поглощения в кристаллах и стеклах с примесями редкоземельных элементов. Тем самым, достигается замена ламп на полупроводниковые лазеры, что резко повышает КПД и улучшает теплоотвод. Это, в свою очередь, позволяет существенно улучшить эксплуатационные характеристики таких гибридных лазеров. В частности, лазеры на гранате с неодимом и лазеры на основе волокон, активированных иттербием, позволяют получать непрерывную выходную мощность на уровне киловатта при достаточно компактных размерах. Это очень важно, в частности, для военных применений.

Химические лазеры. Инверсная населенность колебательных уровней молекул может возникать в результате химических экзотермических реакций (с выделением тепла). Это позволяет получить химический лазер. Первые химические лазеры были созданы в СССР В.Л.Тальрозе и его сотрудниками. Необходи-

мая для накачки энергия в химическом лазере обеспечивается в процессе перестройки химических связей. Примером такой реакции является горение смеси фтора с водородом. Вначале за счет химической реакции $F + H_2 \rightarrow HF^* + H$ образуется возбужденная молекула фтористого водорода. Затем атом фтора восстанавливается в ходе реакции $H + F_2 \rightarrow HF^* + F$. Сложение этих реакций дает реакцию фторирования водорода $F_2 + H_2 \rightarrow 2HF^*$, которая является разветвленной цепной химической реакцией с получением возбужденных молекул HF^* .

На рисунке 26 приведена общая схема химического лазера. В нем имеется камера сгорания, в которой образуются атомы

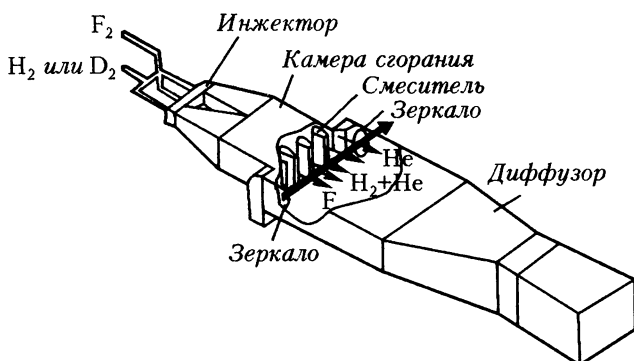


Рис.26. Схема химического лазера, использующего реакцию горения фтора с водородом или с дейтерием

фтора за счет термической диссоциации молекул фтора. Горячий атомарный фтор пропускается через сопло и таким образом охлаждается так же, как в газодинамическом лазере. В это же сопло в охлажденный сверхзвуковой поток фтора вдувается поток водорода и в результате химической реакции образуются колебательно-возбужденные молекулы HF^* с инверсной населенностью на уровнях, соответствующих переходу с длиной волны 3,6 мкм. В США по этой схеме был построен химический лазер MIRACL, работающий в непрерывном режиме с выходной мощностью 2,2 МВт. Он предназначен для военных целей. Подобно газодинамическому лазеру, в этом химическом лазере используются элементы ракетной техники для получения за счет горения высоких температур и сверхзвукового истечения раскаленных газов.

Замечательно, что химический лазер может работать и в условиях низких температур, если с помощью химической реак-

ции происходит возбуждение электронных уровней, которое приводит к люминесценции. Примером такого возбуждения может служить свечение насекомого светлячка. Химические реакции в его организме вызывают холодное свечение, которое называется хемилюминесценцией.

Оказалось, что с помощью химических реакций можно получить возбужденные состояния атомов с образованием инверсной населенности с узкими линиями излучения. Американскими исследователями был создан химический кислород-йодный лазер СОИЛ. Принцип его действия основан на уникальной особенности молекул кислорода. Они в возбужденном электронном состоянии имеют огромные времена жизни – сотни секунд. Квантовая теория позволяет определить время жизни возбужденного энергетического состояния и, следовательно, вероятность спонтанного излучения. Электроны, как известно, характеризуются особой величиной – спином. Молекулы кислорода в основном и в возбужденном состояниях имеют разные значения спина электрона, а, согласно квантовой теории, переходы с изменением спина запрещены. Поэтому молекулы кислорода в возбужденном состоянии являются особым, долго живущим образованием – так называемым синглетным кислородом. Оказалось, что при образовании кислорода в химической реакции хлорирования щелочного раствора перекиси водорода
$$\text{H}_2\text{O}_2 + 2\text{KOH} + \text{Cl}_2 = \text{O}_2 \uparrow + 2\text{KCl} + 2\text{H}_2\text{O}$$
 кислород образуется в возбужденном состоянии, т.е. в виде синглетного кислорода. Таким образом, в довольно простой химической реакции с доступными веществами можно получить вещество, являющееся, по существу, активной средой. Казалось бы, поместив это вещество в резонатор, можно получить лазер.

Однако это невозможно из-за исключительно малой вероятности испускания фотонов спонтанного излучения. А без этих фотонов не получится и вынужденного излучения. Эта трудность обходится следующим образом. Синглетный кислород смешивается с небольшим количеством паров йода. Эти пары в виде молекул йода получают при нагреве йода до 100 °С. При смешении паров йода с синглетным кислородом происходят два процесса. Во-первых, столкновение молекул синглетного кислорода с молекулами йода приводит к их диссоциации на атомы. Во-вторых, столкновения молекул синглетного кислорода уже с атомами йода приводят к их возбуждению. По счастливому стечению обстоятельств энергия возбужденного состояния кислорода слегка превосходит возбужденный уровень атома йода, поэтому протекает эффективный процесс столкновительного

возбуждения атомов йода молекулами синглетного кислорода. Таким образом, получается активная среда из атомов йода, причем спонтанное излучение в этой среде вполне достаточно для получения вынужденного излучения в резонаторе. Поскольку концентрация йода берется в десятки раз меньше, чем концентрация синглетного кислорода, на диссоциацию йода используется малая доля молекул синглетного кислорода, а каждый атом йода многократно «прокручивается», испуская фотоны на длине волны 1,315 мкм.

В отличие от фтор-водородного лазера для работы кислород-йодного химического лазера не требуются высокие температуры и получается более однородная активная среда. Это обстоятельство, а также более короткая длина волны позволяют получить пучок лазерного излучения с высокой направленностью.

Важной особенностью химических лазеров является их автономность – они не требуют источников электроэнергии для создания активной среды. Их эффективность оценивают не в процентах, а числом джоулей, получаемых с грамма химических реактивов (подобно тому, как эффективность автомобиля оценивают километрами на литр бензина). Именно автономность делает химические лазеры главными кандидатами на роль лазерного оружия.

Лазеры, основанные на модификациях резонатора

Параметры лазерного излучения можно существенно изменять путем модификации резонатора. В современных лазерах резонатор часто представляет собой не просто два параллельных зеркала, а довольно сложную оптическую систему.

Получение узкой спектральной линии лазерного излучения. Как было указано, резонатор лазера имеет большое число мод с частотным интервалом между ними, как правило, меньшим, чем ширина линии лазерного перехода. В результате генерация получается в виде спектра из нескольких чрезвычайно узких линий (многомодовая генерация). Для того чтобы получить излучение лишь на одной линии (одномодовый режим генерации), используется особая конструкция резонатора. Она получается при помещении в резонатор специального устройства – селектора мод (рис.27). Обычно это стеклянная плоскопараллельная пластина. Френелевское отражение на ее гранях также образует эталон Фабри–Перо, но малой добротности и с частот-

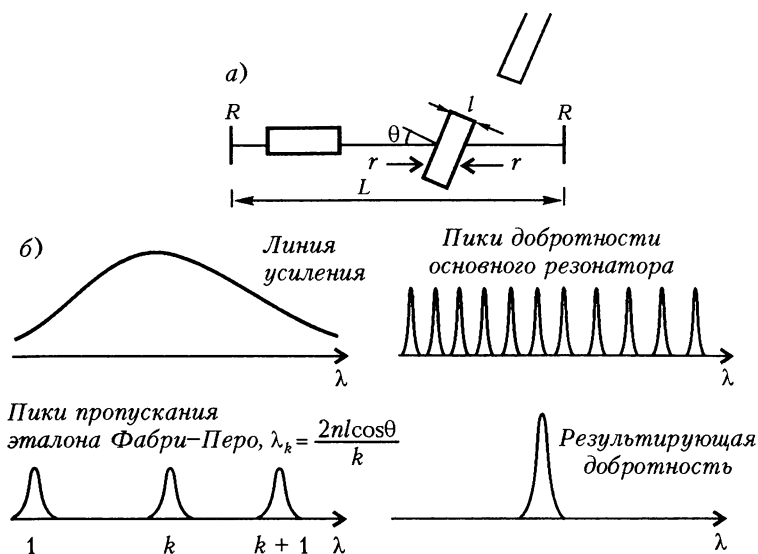


Рис.27. Принцип получения одномодового монохроматического лазерного излучения. Схема лазера (а): R – зеркала основного резонатора длиной L, r – отражения дополнительного эталона Фабри-Перо (селектора мод) толщиной l, перестройка длины волны осуществляется изменением угла наклона θ . Результирующая высокая добротность резонатора лазера получается за счет наложения линии усиления, резонансных пиков основного резонатора и эталона Фабри-Перо (б)

ным интервалом между модами, определяемым толщиной пластины. Ее можно подобрать такой, чтобы этот частотный интервал превышал ширину полосы усиления активной среды. Таким образом, получается сложный резонатор, у которого наиболее добротная мода возникает при совпадении резонансных частот обоих резонаторов. В этом случае генерация возникает лишь на этой высокодобротной моде.

В принципе можно получить не только узкую спектральную линию и, тем самым, высокую монохроматичность излучения, но и плавно перестраивать длину волны этой линии. Для этого в резонатор помещают устройство, основанное на явлении дисперсии (призма или дифракционная решетка), отклоняющее лучи в зависимости от длины волны. В этом случае параллельность зеркал резонатора «работает» лишь для узкой области длин волн, причем эту область можно плавно изменять наклоном одного из зеркал – получается так называемый селективный резонатор. Он в сочетании с селектором мод позволяет получать

генерацию с узкой спектральной линией, длина волны которой плавно перестраивается наклоном зеркала.

В спектроскопии широко используются монохроматоры. Это приборы, в которых с помощью призм или дифракционных решеток из широкого спектра источника света вырезается узкая область спектра, причем ее положение можно плавно регулировать. Очевидно, что яркость излучения на выходе монохроматора невелика. Лазеры дали в руки спектроскопистов замечательную возможность огромного увеличения яркости монохроматического излучения. В лазерах на красителях генерация получается в широких полосах спектра. Если эти лазеры снабдить селективным резонатором с плавной перестройкой по длинам волн, то получается лазерный монохроматор с чрезвычайно узкой линией и высокой яркостью излучения. Путем замены кюветы с красителем такой лазерный монохроматор перекрывает вся видимую область спектра.

Модуляция добротности резонатора. Почти сразу же после создания импульсного лазера на рубине была выдвинута идея, как принципиально можно увеличить пиковую мощность его излучения. Мы видели (см. рис.19), что излучение этого лазера состоит из беспорядочного набора импульсов — «пичков». Их появление объясняется следующим образом. С момента включения импульсной лампы ее излучение начинает увеличивать населенность. Через некоторый интервал времени инверсная населенность достигает порогового значения, возникает генерация лазерного излучения, в результате которой нарастает его интенсивность. Это, естественно, сопровождается уменьшением населенности верхнего уровня. По мере развития процесса генерации интенсивность оказывается столь большой, что источник накачки не справляется с поддержанием населенности выше порога. Под действием вынужденного излучения она становится даже меньше той, что требуется для выполнения порогового условия. Генерация срывается, при этом населенность верхнего уровня оказывается меньше порогового значения. Требуется некоторый интервал времени, пока накачка снова не поднимет населенность верхнего уровня для возникновения генерации. После этого происходит следующий цикл генерации с испусканием очередного «пичка». Итак, возникновение генерации препятствует достижению высокого уровня населенности верхнего уровня и приводит к тому, что лазерное излучение оказывается разбитым на множество импульсов.

Возникла идея превратить эти многие импульсы в один с

большей пиковой мощностью. Поскольку генерация мешает увеличению инверсной населенности, ее следует на некоторое время исключить. Для этого достаточно убрать одно из зеркал резонатора или наклонить его на значительный угол, при котором добротность резонатора меньше той, что требуется для генерации. В отсутствие генерации можно получить существенно большую величину инверсной населенности (ее максимальное значение определяется эффективностью источника накачки). Затем следует быстро поставить зеркало в положение максимальной добротности. Условия возникновения генерации окажутся перевыполненными, т.е. усиление в активной среде будет существенно превышать потери. Скорость развития генерации станет выше, интенсивность за короткое время достигнет более высокого значения. В лазерное излучение перейдет избыток энергии, полученный за счет существенного превышения пороговой населенности. В результате получится одиночный импульс с длительностью, меньшей длительности отдельного «пичка», и с энергией, приблизительно равной энергии всех «пичков». Как видно, этот режим генерации получается в результате изменения во времени добротности резонатора, поэтому он получил название режима модуляции добротности, или Q-модуляции. Режим, который получается при постоянной добротности резонатора, обычно называют свободной генерацией.

Главная проблема осуществления режима модуляции добротности состоит в быстром возвращении зеркала в точное положение параллельности зеркал резонатора. Причем это надо сделать действительно быстро – за время порядка нескольких проходов света между зеркалами, т.е. не более десятков наносекунд. Эта достаточно сложная задача решается, в основном, двумя методами: помещением оптического затвора внутри резонатора или путем быстрого вращения одного из зеркал.

Для этой цели подходит электрооптический затвор. Он основан на эффекте изменения поляризации света в некоторых жидкостях (эффект Керра) или в некоторых твердых телах (эффект Погкельса) при приложении к ним электрического поля (рис.28). Если это поле подается в виде электрического импульса, то затвор открывается на время

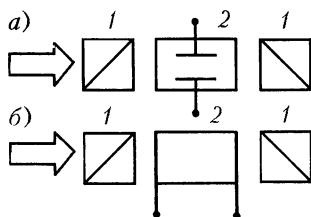


Рис.28. Схемы электрооптических затворов Керра (а) и Погкельса (б): 1 – скрещенные поляризаторы, 2 – ячейки затворов

его длительности. Схемы электроники позволяют получать электрические импульсы длительностью в несколько наносекунд. Такой затвор и был использован в рубиновом лазере (рис.29). Сразу же удалось резко увеличить пиковую мощность лазерного

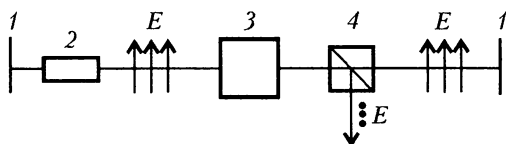


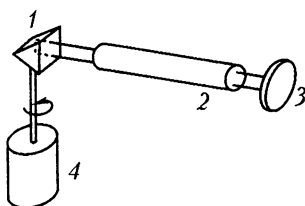
Рис.29. Схема Q-модулированного лазера с затвором Керра: 1 – зеркала резонатора, 2 – рубин, 3 – ячейка Керра, 4 – поляризационная призма

излучения. Хотя энергия излучения получилась на порядок меньше энергии в обычной первоначальной схеме свободной генерации (затвор вносит дополнительные потери), за счет генерации одиночного импульса с длительностью в десятки наносекунд пиковая мощность достигала нескольких мегаватт. Эта мощность в тысячи раз превышала пиковую мощность в «пичках» свободной генерации. По этой причине импульс лазера этого типа был назван «гигантским». Главным недостатком этого метода является достаточно сложная схема электрооптического затвора, а преимуществом – возможность синхронизации срабатывания затвора и, стало быть, момента появления лазерного импульса с внешним сигналом.

Другой метод, основанный на зависимости добротности резонатора от угла наклона зеркал по отношению к оси резонатора, оказался более эффективным и достаточно простым. Зеркало резонатора помещается на оси быстро вращающегося мотора (около 400 об/с). Максимальная добротность получается лишь в момент, когда это зеркало находится в положении, перпендикулярном оси резонатора. В других положениях добротность минимальна. Время оборота достаточно для того, чтобы импульсная лампа успела накачать рубин. Когда это зеркало займет положение, параллельное по отношению к другому, добротность станет максимальной и начнется генерация. Проблемой является обеспечение точного положения вращающегося зеркала для достижения максимальной добротности. Дело в том, что при быстром вращении ось мотора может несколько наклоняться. Таким образом, не будет параллельности зеркал, нужной для максимальной добротности. Для решения проблемы был использован остроумный прием. Зеркало заменялось призмой полного внутреннего отражения (призма-крыша). Такая призма облада-

ет способностью отражать пучок света точно назад независимо от наклона пучка, падающего на нее. Если на ось мотора вместо зеркала поместить такую призму, то при вращении будет автоматически реализоваться положение, при котором свет в резонаторе будет отражаться точно назад к неподвижному зеркалу. Схема такого лазера с вращающейся призмой показана на рисунке 30. Важно отметить, что такая конструкция лазера практически не вносит дополнительных потерь в резонатор.

Рис.30. Схема Q-модулированного лазера с вращающейся призмой: 1 – призма-крыша, 2 – рубин, 3 – неподвижное выходное зеркало, 4 – мотор



Недостатком схемы является не столь быстрое включение добротности, что затрудняет генерацию импульсов короче 30 – 50 нс, а также невозможность точной синхронизации испускания импульса излучения с внешним сигналом.

Яркой демонстрацией высокой пиковой мощности лазера с модуляцией добротности стал электрический пробой воздуха (лазерная искра) при фокусировании пучка короткофокусной (с фокусным расстоянием около 50 мм) линзой. Возникновение искры с характерным свечением и треском, но без каких-либо электродов с высоким напряжением производило сильное впечатление. Этот пробой объясняется тем, что при фокусировании пучка с мощным импульсом получается интенсивность излучения порядка 10^{12} Вт/см², ей соответствует напряженность электрического поля в световой волне около 10^7 В/см. Неудивительно, что при таких электрических полях происходит пробой газа.

В дальнейшем совершенствование лазеров с модуляцией добротности привело к разработке еще одной конструкции. В ней использовался эффект нелинейного поглощения. Как отмечалось выше, величина поглощения определяется населенностью уровней. В оптическом диапазоне верхний уровень, на который происходит поглощение, практически не заселен. При малой интенсивности обычных источников света населенность нижнего уровня почти не меняется, и коэффициент поглощения не зависит от интенсивности. Высокая интенсивность, присущая лазерным источникам, вносит существенные изменения в характер поглощения. Изменяются населенности уровней, ответственных за поглощение – нижний уровень обедняется, а

верхний заселяется, что приводит к уменьшению коэффициента поглощения. Он становится зависимым от интенсивности, т.е. поглощение становится нелинейным (зависящим от интенсивности), а соответствующее вещество — просветляющимся поглотителем.

Большими коэффициентами поглощения в видимом спектре обладают вещества типа красителей (обычно это органические молекулы). Оказалось, что растворы некоторых красителей имеют интенсивные полосы поглощения, совпадающие с длиной волны излучения лазера на рубине, и коэффициент поглощения на этой длине волны уменьшается при увеличении интенсивности лазерного излучения. Такие красители и были использованы в качестве просветляющихся поглотителей.

Конструкция лазера с просветляющимся поглотителем очень проста (рис.31). Между зеркалом резонатора и кристаллом рубина помещается кювета с раствором просветляющегося кра-

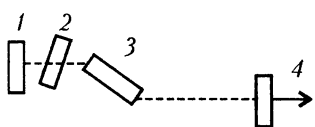


Рис.31. Схема Q-модулированного лазера с просветляющимся поглотителем: 1 — зеркало со 100-процентной отражающей способностью, 2 — кювета с раствором красителя, 3 — рубин, 4 — выходное зеркало

сителя. Это означает, что отражение от зеркала будет уменьшено в δ^2 раз, где δ — коэффициент поглощения в кювете. Этот коэффициент, зависящий от концентрации и толщины слоя раствора, подбирается таким, чтобы генерация возникала при накачке, существенно превышающей порог, который достигается в отсутствие кюветы. При возникновении генерации лазерное излучение, проходящее кювету, начинает уменьшать поглощение в красителе. Это означает, что увеличивается коэффициент отражения от зеркала резонатора, что приводит к увеличению добротности. Таким образом происходит автоматическое лавинообразное увеличение эффективного коэффициента отражения зеркала резонатора, т.е. самомодуляция добротности с образованием гигантского импульса.

Лазеры с просветляющимися красителями получили широкое распространение из-за своей исключительной простоты. Но их недостатком является невозможность управления от внешнего сигнала, которое надежно достигается в случае использования электрооптических затворов для модуляции добротности. Вот почему в тех случаях, когда требуется такое управление (например, синхронизация с внешним процессом), используется лазер

с электрооптическим затвором, несмотря на определенную сложность его конструкции.

Нерезонансная обратная связь. Выше было указано, что важнейшей частью мазера и лазера является резонатор, обеспечивающий положительную обратную связь на определенных резонансных частотах (модах). А можно ли получить генерацию без использования резонатора? Оказывается, можно. Как мы видели, в лазерах для получения положительной обратной связи используется резонатор Фабри–Перо. Он выполняет, по существу, две функции: возвращение определенной доли излучения обратно в активную среду для получения вынужденного излучения и формирование стабильных конфигураций электромагнитного поля (мод резонатора) за счет интерференции падающих и отраженных волн на зеркалах резонатора. В результате получается обратная связь по энергии и по фазе волн излучения. Это схематически показано на рисунке 32,а. Однако при высоких коэффициентах усиления активной среды возможна положительная обратная связь только по энергии, но не по фазе. Это можно сделать при замене зеркал некоторой рассеивающей поверхностью. Доля излучения, рассеянного обратно в актив-

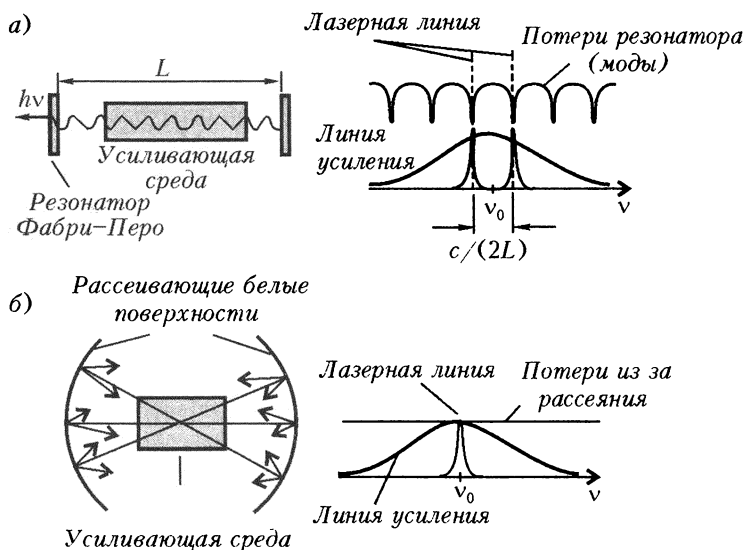


Рис.32. Резонансная обратная связь по энергии и фазе (а) и нерезонансная обратная связь по энергии (б)

ную среду, может оказаться достаточной для возбуждения лазера. Но при этом не получается характерных для резонатора мод. Это схематически показано на рисунке 32,б. Возникает обратная связь без согласованных фаз и, следовательно, без резонансных мод, т.е. нерезонансная обратная связь. Единственным резонансным элементом в таком лазере остается линия усиления активной среды, и поэтому спектр лазерного излучения довольно медленно стягивается к ее центру.

Улучшение технологии выращивания кристаллов рубина и изготовления импульсных ламп привели к тому, что удалось достичь высоких коэффициентов усиления лазерного излучения. Так, в лаборатории Н.Г.Басова был продемонстрирован рубиновый лазер, в котором одно из зеркал было заменено листом белой бумаги. Генерация получалась в виде расходящегося пучка, угол расхождения которого определялся диаметром рубиновых стержней и расстоянием между оставшимся зеркалом и рассеивающей поверхностью. Таким образом, отсутствие резонатора не является принципиальным ограничением для осуществления лазерного эффекта.

Это в принципе допускает существование лазерного эффекта в природных условиях. В этой связи заметим, что мазерный и лазерный эффекты действительно были обнаружены при астрофизических исследованиях. Наблюдалось усиленное вынужденное излучение на переходах радикалов ОН на длине волны 18,5 см и молекул H_2O на длине волны 1,35 см. Усиленное излучение молекул CO_2 на хорошо известном лазерном переходе с длиной волны 10,6 мкм зафиксировано в атмосферах Марса и Венеры. Было показано, что сочетание инверсной среды, которая может возникать за счет излучения звезд, и рассеяния на межзвездной пыли может привести к образованию гигантских космических мазеров и лазеров.

НЕЛИНЕЙНАЯ ОПТИКА

Высокая интенсивность излучения, присущая лазерам, фундаментально изменяет оптику. Физическая оптика – наука о свете – является по существу учением о том как электроны различных, в том числе прозрачных, веществ откликаются на электромагнитные волны света. Электрическое поле волны заставляет электрон колебаться с частотой световой волны, но необязательно с той же фазой. В зависимости от того, как электрон связан с атомами материала, его колебания могут отставать или опережать колебания в световой волне. Колеблющиеся электроны, в свою очередь, испускают электромагнитные волны на той же частоте, но с измененной фазой. Сложение этих волн и определяет, как свет распространяется через материал и, тем самым, сообщает ему оптические свойства (например, показатель преломления или коэффициент поглощения). В классической оптике амплитуды колебаний электронов под действием электрического поля световой волны достаточно малы, и оптические свойства материалов практически не зависят от интенсивности света. Давайте сравним величину электрического поля световой волны с электрическими полями в атомах и молекулах. Связь между интенсивностью I (Вт/см²) и максимальной напряженностью электрического поля в световой волне E (В/см) можно приблизительно определить как $E \approx 30\sqrt{I}$. Интенсивность даже самых ярких обычных источников света не превышает 10^2 Вт/см². Это соответствует максимальным напряженностям электрического поля порядка 100 В/см. В то же время напряженность кулоновского поля протона, удерживающего электрон в атоме водорода (внутриатомное поле), составляет $5 \cdot 10^9$ В/см. Очевидна малость воздействия света на оптические свойства вещества.

Появление лазеров радикально изменило ситуацию. С помощью лазеров в настоящее время возможно получать интенсивности, достигающие 10^{21} Вт/см². При таких интенсивностях электрические поля электромагнитной волны уже в сотни раз превосходят внутриатомные электрические поля. При высоких интенсивностях, присущих лазерному излучению, начинают проявляться эффекты зависимости оптических

свойств вещества от интенсивности — оптика становится нелинейной.

Уже с первым лазером на рубине удалось наблюдать эффект нелинейной оптики — генерацию оптической гармоник. При пропускании лазерного излучения через прозрачный кристалл кварца наблюдалось появление излучения с такой же направленностью, как и лазерное, но с длиной волны в два раза меньшей. Создание лазеров с модуляцией добротности, способных генерировать «гигантские» импульсы с пиковой мощностью на уровне 10^8 Вт, способствовали бурному развитию нелинейной оптики. Следует заметить, что сам лазер является оптическим устройством, в котором проявляются эффекты зависимости оптических свойств от интенсивности. В самом деле, рост интенсивности уменьшает населенность верхнего лазерного уровня и, соответственно коэффициент отрицательного поглощения. Эффект насыщения усиления, в результате которого получается выходная мощность лазерного излучения, — типичный эффект нелинейной оптики. Еще один из эффектов нелинейной оптики — зависимость коэффициента поглощения вещества от интенсивности света, проходящего через него, — используется в лазерах с модуляцией добротности.

Под действием электрического поля световой волны, проходящей через прозрачное вещество, оно поляризуется. Для исследования эффектов нелинейной оптики рассматривают поляризацию среды P под действием электромагнитной волны с электрическим полем E . Зависимость поляризации от напряженности электрического поля выражается так: $P = \kappa E + \chi^{(2)} E^2 + \chi^{(3)} E^3 + \dots$, где коэффициенты $\kappa, \chi^{(2)}, \chi^{(3)}, \dots, \chi^{(n)}$, определяемые свойствами материала, называются оптическими восприимчивостями. В частности, κ — линейная оптическая восприимчивость, которая определяет величину показателя преломления, а $\chi^{(2)}, \chi^{(3)}, \dots, \chi^{(n)}$ — нелинейные восприимчивости, величины которых определяют эффективности нелинейных эффектов. Отметим, что эти величины очень малы. Вот почему нелинейные эффекты были обнаружены лишь после создания лазеров, причем особую роль сыграли лазеры с модуляцией добротности, позволяющие получать пиковые мощности на уровне десятков и даже сотен мегаватт. Для повышения эффективности нелинейных эффектов выбирают вещества с наибольшими значениями коэффициентов восприимчивости, отвечающими за соответствующий эффект. К ним, в частности, относят нелинейные кристаллы.

Надо сказать, многие из нелинейных эффектов были открыты и исследованы нашими учеными Р.В.Хохловыми и С.А.Ахмановым и американским ученым Н.Бломбергенем. Основными эффектами нелинейной оптики являются: генерация гармоник, суммарной и разностной частот, параметрическая генерация и усиление, выпрямление света, вынужденное комбинационное рассеяние (рассеяние Рамана), вынужденное рассеяние Мандельштама–Бриллюэна, эффекты, связанные с изменением показателя преломления, – самофокусировка и фазовая самомодуляция. Огромное значение этих эффектов нелинейной оптики заключается в том, что они позволяют получать лазерное излучение на других длинах волн.

Генерация второй гармоники, суммарной и разностной частот. Ряд нелинейных эффектов обусловлен оптической восприимчивостью второго порядка ($\chi^{(2)}$). Пожалуй, важнейший из них – генерация второй гармоники. Это был первый нелинейный эффект, который наблюдался сразу же после появления рубинового лазера. При пропускании излучения рубинового лазера через кристалл кварца возникает пучок излучения на длине волны в два раза меньшей, чем длина волны лазерного излучения. В этом процессе два фотона, имеющие одну и ту же частоту ν , проходя через подходящий материал (нелинейный кристалл), могут вызвать появление одного кванта с удвоенной частотой 2ν . Для обеспечения высокой эффективности этого процесса нужно, чтобы волны с частотой ν и частотой 2ν распространялись в нелинейном кристалле с одной скоростью. В этом случае процесс преобразования частот будет согласованно проходить на всем протяжении нелинейного материала.

Однако хорошо известно, что прозрачные материалы обладают дисперсией, т.е. зависимостью показателя преломления от длины волны (обычно показатель преломления растет с увеличением частоты), что приводит и к зависимости скорости распространения от частоты. Поэтому непросто получить нужное совпадение. Для этого используется двойное лучепреломление в кристаллах. Особенности распространения света внутри кристаллов, обладающих двойным лучепреломлением, состоят в том, что световая волна, попадая в кристалл, превращается в две волны, характеризующиеся разными скоростями и поляризациями. Одну из этих волн принято называть обыкновенной, а другую – необыкновенной. Они различаются поляризациями. Показатель преломления для обыкновенной волны n^o не зависит от направления ее распространения в кристалле. Поэтому

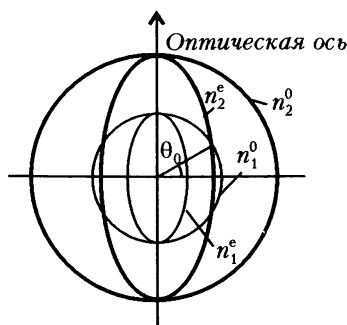


Рис.33. Показатели преломления в кристалле n_1^0, n_1^e для частоты ν и n_2^0, n_2^e для частоты 2ν

зависимость n^0 от угла распространения представляется окружностью. Напротив, показатель преломления для необыкновенной волны n^e зависит от направления распространения, и эта зависимость представляется эллипсом. На рисунке 33 показаны изменения показателей преломления от угла между лучами и оптической осью кристалла. Тонкими линиями показаны кривые для показателей преломления обыкновенной и необыкновенной волн с частотой ν , а жирными линиями – для частоты 2ν . Легко видеть, что существует направление под углом θ к оптической оси кристалла, для которого выполняется условие $n_\nu^0 = n_{2\nu}^e$. Это условие называется условием волнового синхронизма, и его выполнение обеспечивает максимальную эффективность нелинейного преобразования частот. Практически это достигается путем ориентации кристалла, из которого изготавливается плоскопараллельная пластина, через которую пропускается пучок лазерного излучения.

Аналогичным образом можно получить генерацию суммарной частоты, когда два фотона с частотами ν_1 и ν_2 преобразуются в фотон с частотой $\nu_3 = \nu_1 + \nu_2$, а также – генерацию разностной частоты $\nu_3 = \nu_1 - \nu_2$.

Параметрическая генерация и усиление. Важным видом нелинейного процесса является параметрическое взаимодействие (термин радиофизики), схематически показанный на рисунке 34. Его важность заключается в том, что при повороте нелинейного кристалла одна частота лазерного излучения преобразуется в две, причем их значения будут зависеть от угла поворота нелинейного кристалла. Тем самым можно создать источник

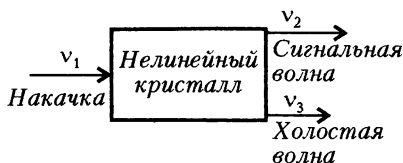


Рис. 34. Параметрическое взаимодействие

лазерного излучения с плавной перестройкой по частоте в широких пределах.

Кроме того, можно получить усиление лазерного излучения не за счет использования активной среды, а за счет преобразования энергии волны на одной частоте в энергию волны на другой. Такое параметрическое преобразование получается при выполнении соответствующих условий (выбор кристалла и его ориентация, длины волн и их поляризация для накачки и усиливаемого сигнала). Такой новый способ усиления световых волн и создания новых источников лазерного излучения на его основе был впервые предложен С.А.Ахмановым и Р.В.Хохловым. Параметрические генераторы обладают замечательной особенностью – плавной перестройкой длины волны путем поворота нелинейного кристалла. В настоящее время множество типов лазеров в сочетании с использованием нелинейных эффектов позволяют получать практически любую частоту лазерного излучения от далекого УФ диапазона до миллиметрового радиодиапазона.

Нелинейные эффекты самовоздействия света. Существуют также нелинейные эффекты, которые обусловлены членом третьего порядка поляризации прозрачного материала ($\chi^{(3)}$). В отличие от эффектов, связанных с $\chi^{(2)}$, которые наблюдаются в особых, нелинейных кристаллах, эффекты, связанные с $\chi^{(3)}$, могут наблюдаться практически в любых материалах, например в стеклах, жидкостях и даже газах, но, разумеется, при достаточно больших интенсивностях лазерного излучения. Весьма важным эффектом является изменение показателя преломления под действием электрического поля световой волны. Известно, что под влиянием электрического поля, приложенного к некоторым жидкостям (эффект Керра) или к некоторым кристаллам (эффект Поккельса), в них возникает двойное лучепреломление, связанное с изменением показателя преломления. Подобным же образом электрическое поле интенсивной электромагнитной волны также может вызвать изменение показателя преломления. В

этом случае наблюдается так называемый высокочастотный эффект Керра. Он получается в результате некоторой деформации электронных облаков атомов и молекул под действием электрического поля световой волны, что вызывает зависимость показателя преломления n от интенсивности света I : $n = n_0 + n_2 I$. Величина коэффициента n_2 определяется конкретным веществом и обычно весьма мала. Тем не менее, при интенсивном лазерном излучении эффект проявляется, и эти проявления весьма важны.

Пусть через слой прозрачного вещества распространяется, как показано на рисунке 35, пучок лазерного излучения, интенсивность которого максимальна в середине пучка и спадает до

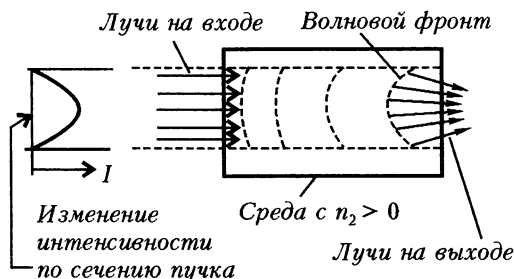


Рис.35. Эффект самофокусировки

нуля на краях (колоколообразное распределение интенсивности по диаметру пучка). Тогда, если $n_2 > 0$, будет происходить изменение фазы волны и, соответственно, искривление волнового фронта, так как центральная часть пучка будет отставать от краев. Поскольку лучи света перпендикулярны поверхности волнового фронта, получается, что вместо параллельного пучка наблюдается схождение лучей, подобное тому, которое происходит после прохождения линзы, причем фокусное расстояние такой «линзы» зависит от интенсивности лазерного пучка. Таким образом, под действием интенсивного лазерного света среда автоматически приобретает свойства собирающей линзы. Это явление было предсказано нашим ученым Г.А.Аскарьяном и названо им самофокусировкой.

Теперь рассмотрим эффект, который получается при прохождении через такую среду лазерного излучения в виде импульса (рис.36). В этом случае будет иметь место изменение показателя преломления в соответствии с изменением интенсивности во времени. Это означает, что теперь фаза волны будет изменяться во времени. Такое явление называется фазовой самомодуляцией

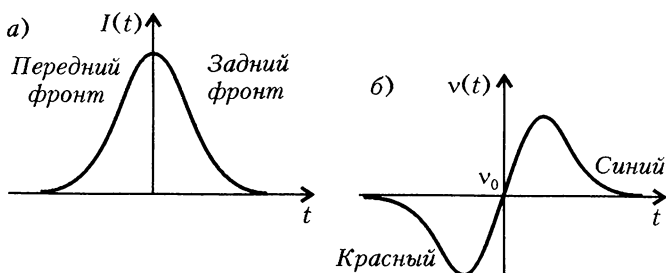


Рис.36. Эффект фазовой самомодуляции: а) зависимость от времени интенсивности; б) изменение со временем частоты

(ФСМ). Из радиотехники известно, что изменение фазы во времени приводит к изменению частоты. Следовательно, будет изменяться частота света.

Ниже будет показано, что оба эти эффекта играют существенную роль в методах генерации ультракоротких импульсов лазерного излучения.

ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА

Лазеры привели к появлению еще одной новейшей отрасли оптики – волоконной оптики.

Явление полного внутреннего отражения на границе двух сред с разными показателями преломления позволяет осуществить световод. Такой световод можно наблюдать в эффектном опыте. Пучок света вводится в струю воды, вытекающего из резервуара. Свет оказывается как бы замкнутым в струе воды благодаря эффекту полного внутреннего отражения на границе воды и воздуха. При добавлении в воду люминесцирующего красителя (флуоресцеина) струя приобретает окраску. Из расплавленного стекла можно вытягивать тонкие нити (волокна), допускающие значительный изгиб, которые возможно использовать как световоды. На их основе и возникла волоконная оптика.

В частности, появилась возможность удобной передачи изображений на расстоянии. Для этого используется жгут из большого числа стеклянных волокон, образующий многожильный световод (рис.37). На его торец проектируется изображение, кото-

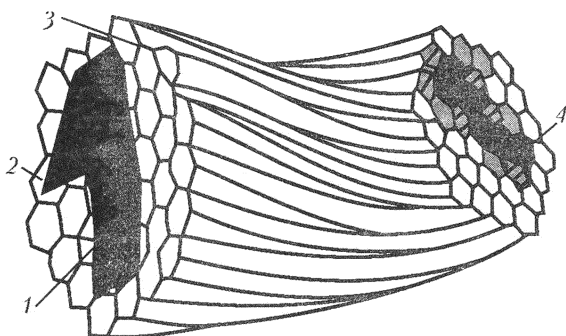


Рис.37. Многожильный волоконный световод для передачи изображения: 1 – изображение, поданное на входной торец, 2 – светопроводящая жила, 3 – изолирующая прослойка между жилами, 4 – мозаичное изображение, переданное на выходной торец

рое передается на выходной торец жгута как совокупность элементов изображения, каждый из которых проходит через свое волокно. Очевидно, что качество изображения будет тем

лучшим, чем тоньше волокно и чем больше их число. Такая система волоконной оптики в сочетании с системой подсветки нашла широкое применение в медицине для осмотра внутренних органов (эндоскоп).

Распространение света по световоду существенно зависит от его диаметра. Если диаметр световода велик по сравнению с длиной волны, то свет распространяется по законам геометрической оптики и практически не зависит от длины волны. Когда же диаметр становится сравнимым с длиной волны, распространение приобретает волноводный характер и существенно зависит от длины волны. В радиотехнике сверхвысоких частот для передачи радиоволн используются волноводы (трубы прямоугольного сечения с хорошо проводящими внутренними стенками). Поперечные размеры волноводов существенно определяют характер распространения волн. Для конкретных длин волн существуют определенные конфигурации поля электромагнитных волн (моды), которые распространяются по волноводу. Оптимальным является распространение волны одной моды (одномодовый режим).

Типичный волоконный световод состоит из сердцевины и оболочки, в которых используются стекла разного сорта, и полимерного защитного покрытия (рис.38). Показатель преломления оболочки несколько меньше показателя преломления сердцевины, благодаря этому создаются условия полного внутреннего отражения. При определенном соотношении радиуса сердцевины, разности показателей преломления сердцевины и оболочки и длины волны по сердцевине распространяется лишь одна мода, подобно тому как распространяются радиоволны сантиметрового диапазона по волноводам. Световоды, удовлетворяющие этому соотношению, называются одномодовыми. Обычно диаметр сердцевины одномодового волоконного световода составляет 4–8 мкм, а разница показателей преломления сердцевины и оболочки имеет значение около $3 \cdot 10^{-2}$. Диаметр оболочки принципиального значения не имеет и обычно составляет 120–150 мкм. Важность одномодовых волокон, в частности, заключается в том, что выходящее из торца излучение можно с помощью подходящего объектива преобразовать в

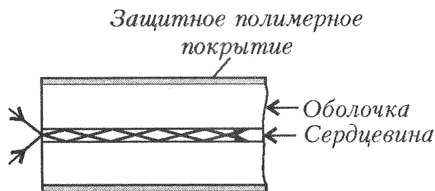


Рис. 38. Оптический одномодовый световод (оптическое волокно)

Рис. 38. Оптический одномодовый световод (оптическое волокно)

пучок света с минимальной расходимостью, определяемой дифракцией света (дифракционная расходимость).

С появлением лазеров возникла идея использовать волоконные световоды для передачи сигналов в виде лазерного излучения. Однако стремление передавать свет с помощью оптических волокон натолкнулось на проблему поглощения света в стекле. Даже самые прозрачные стекла при длине распространения 1–5 м в два раза ослабляли свет. Дело в том, что в обычном стекле содержатся примеси, которые и вызывают поглощение света. Потребовалась специальная технология приготовления стекла, лишенного этих примесей, и изготовления из него одномодовых волокон. Основой стекла является окись кремния (SiO_2 – плавленый кварц), и для изготовления стекла обычно берут песок, который оказывается недостаточно чистым. Исследования, проведенные в 60-х годах прошлого века, показали, как можно изготавливать стекла с высокой химической чистотой. Для этого используется особая технология получения стекла путем осаждения из газовой фазы. Сами газы допускают высокую степень очистки. Чтобы получить разные показатели преломления сердцевины и оболочки, в процессе изготовления добавляются особые контролируемые примеси. Так, окислы германия и фосфора увеличивают показатель преломления, а фториды его уменьшают.

Сама технология изготовления оптических волокон является исключительно сложной. Она включает два главных этапа. На первом этапе методом осаждения из газовой фазы получают заготовку (преформу). Обычно она имеет диаметр около 2 см и длину порядка 1 м, причем добавлением примесей в ней достигается нужный для одномодового волокна профиль изменения показателей преломления. На втором этапе из заготовки получают само волокно. С этой целью заготовку помещают в печь для ее расплава и производят быстрое, с контролируемой скоростью, вытягивание волокна. При этом происходит уменьшение диаметра с сохранением профиля показателя преломления. Оба этапа (изготовление заготовки и вытяжка волокна) технологически очень сложны, так как диаметр сердцевины и профиль показателя преломления необходимо поддерживать с высокой точностью. Затем на полученное волокно наносится полимерная оболочка. Используя такую замечательную наукоемкую технологию, удастся изготавливать оптические волокна, в которых ослабление света с длиной волны 1–1,5 мкм в два раза получается на длине около 1 км.

Появление таких оптических волокон вызвало революцию в

области коммуникаций – возникла волоконно-оптическая связь (ВОЛС), системы которой в настоящее время буквально опутали земной шар и являются важнейшей частью Интернета. В этих системах в качестве передатчиков используются полупроводниковые лазеры, отличающиеся миниатюрностью и высоким КПД. Важной особенностью является большое число каналов связи (около тысячи), которые одновременно передаются по одному волокну. Благодаря этому скорость передачи достигает сотен терабит в секунду! Также важнейшей особенностью волоконно-оптической связи является ее закрытость. В отличие от радиосвязи, включающей спутниковую связь, сигналы, распространяющиеся по сердцевине волокна, нельзя перехватить.

Надо сказать, что в нашей стране исследования по волоконной оптике, включая освоение технологий изготовления нужных волокон, начались по инициативе и под непосредственным руководством А.М.Прохорова, который предвидел исключительную важность этих исследований. Был создан специальный Научный центр волоконной оптики Российской академии наук. В нем под руководством Е.М.Дианова созданы уникальные установки для изготовления волокон и проводятся интенсивные работы по волоконной оптике как в области фундаментальных исследований, так и в области применений в науке и технике.

Волоконные лазеры. Успехи в области волоконной оптики и, в частности, технологии изготовления одномодовых волоконных световодов привели к созданию твердотельных лазеров нового типа – волоконных лазеров. В них используются оптические волокна, в сердцевину которых добавляются примеси редкоземельных элементов (Nd, Yb, Er, Tm). При этом стекло сердцевины становится таким же, как стекло в лазерах на стеклах, активированных ионами редкоземельных элементов, с оптической накачкой. Иными словами, такие волокна могут быть активными средами – их называют активными волокнами. В качестве источников накачки можно использовать полупроводниковые лазерные диоды. В результате получается компактный, эффективный и удобный в эксплуатации волоконный лазер.

Эти лазеры имеют очень важные преимущества. Поскольку лазерное излучение распространяется по световоду, исключается влияние механических воздействий на резонатор. Но при этом возникает вопрос: как организовать резонатор и как осуществить накачку стекла сердцевины? Ведь главная особенность волокна – изолированность излучения, распространяющегося в сердцевине за счет полного внутреннего отражения.

Сначала рассмотрим проблему накачки. «Подобраться» к сердцевине можно, если нарушить условия полного внутреннего отражения. Дело в том, что при полном внутреннем отражении световая волна проникает за геометрическую границу раздела сред, но это проникновение ограничивается весьма малым расстоянием. Эта особенность полного внутреннего отражения иллюстрируется рисунком 39. Пусть свет, падающий на грань

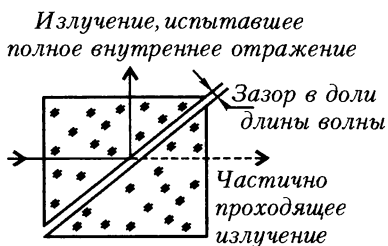


Рис. 39. Нарушение полного внутреннего отражения

призмы, полностью отражается. Но если к границе стекло–воздух подводится стекло другой призмы, то при достаточно близком расстоянии часть излучения проникнет в это стекло. Это расстояние составляет доли длины волны, и от его конкретного значения зависит, какая часть излучения выйдет наружу. На таком принципе нарушения

полного внутреннего отражения основаны особые устройства волоконной оптики, называемые ответвителями, которые позволяют вводить в оптическое волокно излучение, а также выводить часть излучения, распространяющегося в волокне. При этом можно вводить в волокно излучение накачки и выводить из него лазерное излучение, поскольку они отличаются по длинам волн. Правда, в одномодовое волокно можно эффективно ввести лишь одномодовое излучение, например диодного полупроводникового лазера, поскольку это излучение нужно сфокусировать в сечение сердцевины. В одномодовом режиме мощность такого лазера обычно не превышает 1 Вт. Это, естественно, ограничивает выходную мощность волоконного лазера.

Для создания волоконных лазеров большой мощности используется другой способ накачки. Принцип его действия поясняется рисунком 40. Диаметр оболочки волокна значительно больше, чем диаметр сердцевины, поэтому в торец волокна можно сфокусировать многомодовое излучение от линейки полупроводниковых диодов с мощностью до сотен ватт. При распространении излучения накачки в оболочке оно испытывает полное внутреннее отражение на границе стекло–полимер, многократно пересекает сердцевину, в которой испытывает поглощение. При достаточной длине волокна практически вся энергия источника накачки окажется вложенной в сердцевину. Такой способ накачки называется накачкой через двойную оболочку.

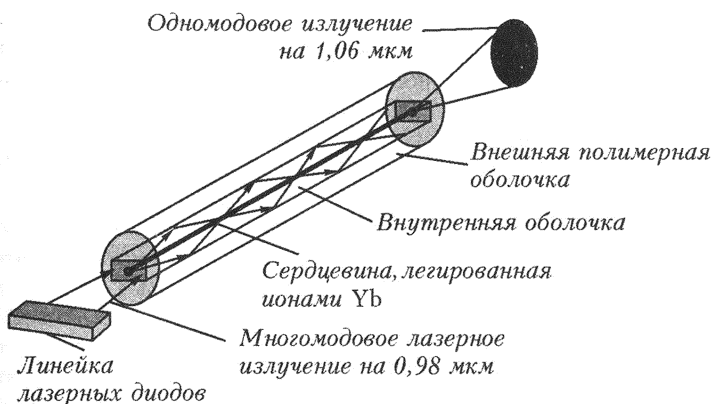


Рис.40. Волоконный одномодовый лазер с накачкой от набора полупроводниковых диодных лазеров через двойную оболочку

Теперь рассмотрим особенности резонаторов волоконных лазеров. Помимо обычной конфигурации резонатора, образуемой параллельными зеркалами, может использоваться схема замкнутого кольца, как показано на рисунке 41. В такой схеме излучение также оказывается запертым. Но здесь, в отличие от обычной схемы, отсутствуют стоячие волны, а резонансные частоты (моды резонатора) получаются за счет интерференции волны с собою же при «накручивании» ее в последовательных обходах кольца. Если на оптической длине кольца укладывается целое число полуволн, то получается конструктивное сложение амплитуд. Частотный интервал между модами такого кольцевого резонатора равен c/L (c – скорость света, а L – оптическая длина пути обхода кольца). Оптическое волокно позволяет естественным образом получить такой кольцевой резонатор. Для этого отрезок активного волокна сваривается в кольцо, излучение накачки вводится через один ответвитель, а лазерное излучение выводится через другой ответвитель. Как было указано, такая система накачки не позволяет получать высокие выходные мощности.

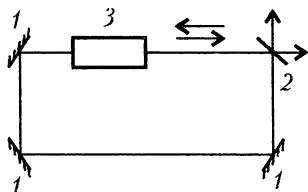


Рис.41. Кольцевой резонатор: 1 – зеркала с отражением 100%, 2 – зеркало с пропусканием, 3 – активная среда

В случае накачки через двойную оболочку нужно использовать резонатор Фабри–Перо. Но возникает проблема зеркал.

При описании He-Ne лазера было указано, что для получения высоких коэффициентов отражения используются многослойные интерференционные покрытия, причем коэффициент отражения определяется разностью показателей преломления соседних слоев и их числом. Такие многослойные структуры называются брэгговскими, в честь английского физика Л.Брэгга. В обычных многослойных зеркалах число слоев не превосходит 15–20 по технологическим причинам, а высокий коэффициент отражения достигается за счет значительной разности показателей преломления. В волоконных лазерах удалось реализовать новый тип зеркал. Это так называемые волоконные брэгговские решетки. Технология их изготовления – выдающееся достижение в области волоконной оптики. Было установлено, что под действием УФ излучения в некоторых стеклах происходят необратимые структурные изменения, сопровождаемые изменением показателя преломления. Эти изменения, вообще говоря, зависят от сорта стекла, длины волны УФ излучения и дозы облучения и обычно не превосходят 10^{-3} от первоначального значения показателя преломления. Они могут получаться в стекле сердцевины одномодового волокна. Этот эффект и используется для изготовления волоконных брэгговских решеток.

Хотя изменение показателя преломления невелико (по сравнению с многослойными зеркалами), число таких слоев можно сделать весьма большим (свыше десяти тысяч). В результате удается получать коэффициенты отражения, большие 90%, что вполне достаточно для резонатора Фабри–Перо. На концах одномодового волокна изготавливаются брэгговские решетки зеркал резонатора с нужными отражениями и оптимальным выходным пропусканием. Таким образом, можно создать одномодовый волоконный лазер с выходной мощностью до десятков и даже сотен ватт. Этот лазер можно рассматривать как эффективный преобразователь многомодового излучения (с большой расходимостью пучка) набора полупроводниковых диодов в одномодовое излучение волоконного лазера.

Как отмечалось, изгиб волокна не влияет на работу лазера. Поэтому не требуется точная настройка, и лазер значительно менее чувствителен к внешним механическим воздействиям. В принципе волокно можно использовать в виде плоской катушки, что делает конструкцию лазера весьма компактной. По существу, активная среда волоконного лазера (сердцевина волокна) представляет собой цилиндр диаметром в несколько микрон и длиной до нескольких метров. Это означает, что тепло при накачке активной среды выделяется через большую поверхность

во внешнюю оболочку сердцевины волокна, диаметр которой в десятки раз превосходит диаметр сердцевины. Важно также, что оболочка состоит из плавленого кварца с высокой теплопроводностью. Это существенно облегчает проблему теплоотвода. Поэтому, в отличие от традиционных твердотельных лазеров, использующих стержни из лазерных стекол и кристаллов, волоконные лазеры не требуют водяного охлаждения. При использовании одномодового волокна можно получить выходное излучение с дифракционной расходимостью. Благодаря использованию в качестве источников накачки лазерных диодов волоконные лазеры получаются очень компактными и с высоким КПД. Они позволяют достигать средней мощности свыше 1 кВт. В настоящее время на основе этих лазеров создаются системы для использования в технологиях резки и сварки, конкретно – в автомобильной и авиационной промышленности.

ЛАЗЕРЫ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ

Особым достижением лазерной науки и техники стало создание лазеров ультракоротких импульсов. Измерение коротких интервалов времени и повышение временного разрешения методов исследований быстропротекающих явлений в значительной степени связаны с проблемой получения коротких вспышек света. После создания лазеров сразу же возникла идея использовать их для получения коротких интенсивных импульсов света, тем более что первый лазер на рубине уже испускал излучение в виде импульсов. Правда, эти импульсы представляли собой беспорядочную последовательность.

Стремление получать лазерное излучение в виде импульсов диктовалось еще и желанием существенно увеличить пиковую мощность излучения. Энергия лазерного излучения, будучи сосредоточенная в коротком импульсе, приводит к высокой пиковой мощности. Выше было показано, как с помощью метода модуляции добротности удалось существенно сократить длительность импульса и на порядок повысить пиковую мощность, что, в свою очередь, способствовало успехам нелинейной оптики. За годы, прошедшие с появления первого лазера (1960), достигнут огромный прогресс как в сокращении длительности, так и в увеличении мощности лазерного излучения. Проблема генерации лазерных импульсов ультракоротких импульсов стала важной областью лазерной науки и техники. Удаётся получать излучение в виде импульсов с длительностями, близкими к фундаментальному пределу – периоду световой волны, который составляет 1–2 фемтосекунды ($1 \text{ фс} = 10^{-15} \text{ с}$).

Трудно представить себе краткость фемтосекунды. Одна фемтосекунда относится к привычной для нас секунде, как одна секунда относится к 32 миллионам лет. Некоторое представление об этой величине можно составить, рассматривая дистанции, которые проходит свет за короткие промежутки времени. Как известно, скорость света, 300 тысяч километров в секунду, является максимально возможной в природе. За одну секунду свет проходит 300000 км, т.е. расстояние, несколько меньшее расстояния до Луны (380000 км). За одну микросекунду свет проходит 300 м, за одну наносекунду – 30 см, за одну пикосекунду – 0,3 мм, а за одну фемтосекунду – 0,3 мкм.

Возникает вопрос: зачем нужны столь короткие импульсы? В обычных условиях даже самые быстрые объекты не могут заметно сместиться за столь короткие времена. Однако некоторые из наиболее фундаментальных процессов во Вселенной происходят с характерными временами, сопоставимыми с фемтосекундой. Это – явления микромира, например движения электронов между атомами в твердых телах, колебания частей молекул, разрыв и формирование химических связей в молекулах, которые происходят за времена десятков фемтосекунд и менее. В микромире существенную роль играют перемещения в масштабах микро- и нанометров. Поэтому для исследований движений и передачи энергии в микромире требуется временное разрешение исследовательских методик на уровне пико- и фемтосекунд.

Лазеры, испускающие свет в виде ультракоротких импульсов с длительностями вплоть до 5 фс, как раз и дают ученым возможность изучать эти явления, используя методики, являющиеся, по существу, развитием техники скоростного фотографирования, но с неизмеримо большим быстродействием. Недаром создание этих лазеров сравнивают с изобретением микроскопа. Микроскоп позволил увидеть микрообъекты, а лазер, генерирующий ультракороткие импульсы, позволил проследить, как протекают сверхбыстрые процессы в микромире молекул и твердых тел. В частности, удалось непосредственно «наблюдать» процессы образования и разрушения молекул, а до появления лазеров фемтосекундных импульсов сведения об этих процессах получались только по результатам косвенных экспериментов. Мы подробнее рассмотрим это в разделе, посвященном применениям лазеров.

Бесконечная волна с определенной частотой является идеализацией. Все реальные волны ограничены во времени, а значит, имеют конечную ширину спектра. Математическое рассмотрение (преобразования Фурье) дает связь между продолжительностью волны Δt и шириной спектра $\Delta \nu$: $\Delta t \cdot \Delta \nu \approx 1$. Типичным случаем ограниченной волны является импульс в виде волнового пакета (рис.42), который получается заключением несущей частоты в огибающую. Ширина огибающей определяет длительность импульса. Замечательным достижением лазерной науки и техники стала генерация в виде импульсов с длительностью, близкой к фундаментальному пределу – периоду световой волны. Столь короткие длительности импульсов света можно получить благодаря волновой природе света. Известно, что сложение двух волн с близкими частотами приводит к явлению, которое называется биением колебаний. На рисунке 43 показан резуль-

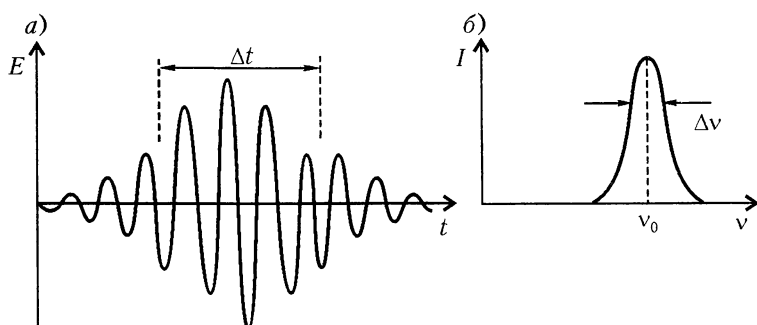


Рис.42. Волновой пакет: а) зависимость электрического поля от времени; б) зависимость интенсивности от частоты

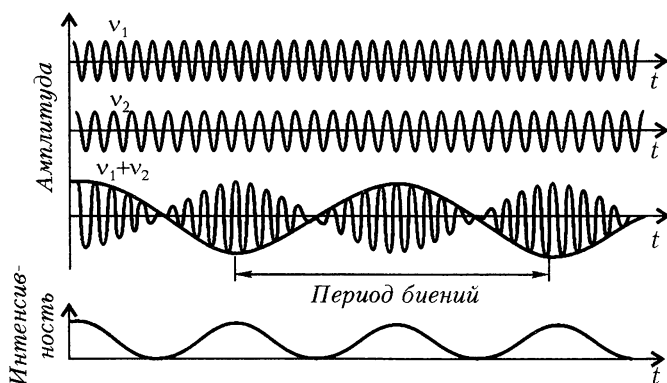


Рис.43. Биения двух колебаний с частотами ν_1 и ν_2

тат такого сложения. Период биений определяется разностью частот. В оптике световые волны характеризуются не амплитудой, а интенсивностью, которая определяется квадратом амплитуды, усредненным по периоду волны, и в случае двух световых волн их сложение приводит к периодическому изменению интенсивности, определяемому разностью частот. При сложении трех и более волн с одинаковой разностью частот между соседними волнами результат уже будет зависеть от соотношения фаз. В том случае когда амплитуды всех волн совпадают, сложение приведет к образованию ярко выраженного максимума (рис.44).

Из математики известно, что периодическую функцию произвольной формы (периодическая последовательность) можно представить в виде ряда Фурье, т.е. суммой синусоид с частотами, отличающимися друг от друга на определенную кратную величину, т.е. с эквидистантным расположением частот: $A(t) =$

$= \sum A_n \sin(\omega + n\Delta\omega)$ (n определяет число складываемых синусоид).

Сама математическая операция (анализ Фурье) заключается в вычислении амплитуд синусоид, на которые раскладывается периодическая функция. Отсюда следует, что можно провести обратную операцию, т.е. сложить волны с соответствующими амплитудами и частотами, и получить периодическую последовательность импульсов, причем их форма, а значит и длительность, будет определяться числом сложенных волн. Иными словами, можно провести синтез периодической последовательности импульсов путем сложения многих непрерывных волн.

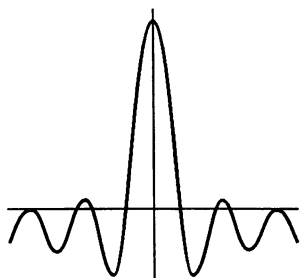


Рис. 44. Сложение пяти волн с кратными частотами $f_0, 2f_0, 3f_0, 4f_0, 5f_0$

Как было указано выше, резонатор лазера обладает набором мод, соседние частоты которых отличаются на постоянную величину. Генерация может происходить на многих модах, попадающих в полосу усиления активной среды, и, таким образом, лазер способен излучать много волн на этих частотах. Это обстоятельство является ключевым для получения импульсов ультракороткой длительности. Лазер, по существу, может являться синтезатором, в котором получается достаточно много волн с нужными для получения ультракоротких импульсов частотами, фазами и амплитудами.

Из формул преобразования Фурье следует, что для получения импульса длительностью τ требуется, чтобы интервал $\Delta\nu$, охватывающий все слагаемые синусоиды, отвечал соотношению $\tau \cdot \Delta\nu \approx 1$. Это означает, что для получения определенной длительности импульса лазерного излучения необходима определенная ширина спектра. Например, для получения 10-фемтосекундного импульса требуется ширина спектра около 10^{14} Гц. Это означает, что при длине волны в середине спектра 500 нм (зеленый свет) ширина спектра должна быть около 100 нм.

Как уже говорилось, существуют активные среды с широкими полосами усиления, например люминесцентные красители. Их ширины спектров соответствуют длительностям на уровне фемтосекунд. Активные среды в виде кристаллов и стекол с примесями ионов редкоземельных элементов или переходных металлов также могут иметь огромные ширины полосы усиления. Так, кристалл сапфира имеет полосу усиления от 650 до

1100 нм, что позволяет получать длительность импульса короче 3 фс. Мы видели, что с помощью селектора мод можно заставить лазер работать лишь на одной моде. Но теперь, напротив, его нужно заставить работать на множестве мод, попадающих в полосу усиления. Для этого необходимо убрать любые селекторы, т.е. создать по возможности равные условия генерации для мод, попадающих в полосу усиления. В этом случае спектр излучения будет представлять собой гребенку многих мод, амплитуды которых будут мало отличаться друг от друга.

Итак, лазер, работающий с активной средой с достаточно большой шириной полосы усиления, способен, в принципе, испускать большое число волн с эквидистантными частотами. Сложение этих волн может дать импульс с длительностью, определяемой соотношением $\tau \cdot \Delta\nu \approx 1$. Однако результат сложения многих волн зависит от их фаз. В формуле ряда Фурье предполагается, что все синусоиды имеют одну и ту же фазу. Многомодовое лазерное излучение обеспечивает большое число волн с нужными частотами и амплитудами, но не с фазами. Действительно, каждая мода возникает из спонтанного излучения, которое по определению является волной со случайной фазой.

Чтобы выявить особенности влияния фазы на образование импульсов лазерного излучения, давайте более подробно рассмотрим, как получается это излучение в результате сложения большого числа волн. Это удобно сделать с помощью компьютера. Пусть каждая волна описывается выражением $A(t) = A_0 \sin(\omega t + \phi)$, где A_0 – амплитуда, ω – частота, а ϕ – фаза. Давайте сложим 100 волн с равными амплитудами, с частотами, отличающимися на определенный интервал $\Delta\omega$, и с определенными фазами ϕ_n : $A(t) = \sum A_0 \sin((\omega + n\Delta\omega) + \phi_n)$ (здесь n пробегает значения от 1 до 100). Фаза каждой из волн пусть будет определенной, но случайной величиной в интервале $(0; \pi)$. Поскольку свет характеризуется интенсивностью, которая пропорциональна амплитуде волны, результат сложения возведем в квадрат. Таким образом, мы получим изменение интенсивности во времени.

На рисунке 45,а приводится пример такого сложения. Оно, по существу, моделирует многомодовое (100 мод) излучение при условии, что в резонаторе отсутствует какое-либо устройство, регулирующее фазы мод (так называемый режим свободной генерации). Мы видим, что изменение интенсивности в зависимости от времени представляет собой набор случайных выбросов

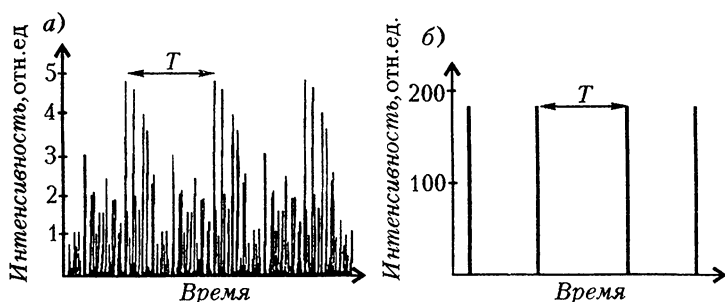


Рис.45. Сложение ста волн с равными амплитудами и с частотами, отличающихся на постоянный интервал: а) фазы распределены случайным образом; б) фазы полностью согласованы

интенсивности от нуля до некоторой максимальной величины, причем это изменение повторяется с периодом $2\pi/\Delta\omega$. Это так называемые флуктуационные импульсы многомодового лазерного излучения. Отметим, что их типичная длительность определяется шириной спектра, охватывающего все моды, т.е. может быть очень мала, но столь же мал типичный интервал между соседними флуктуационными импульсами. Поэтому регистрация многомодового лазерного излучения даже с помощью быстродействующей аппаратуры дает некоторый постоянный (усредненный) уровень интенсивности.

Теперь подобным же образом сложим те же волны, но с вполне определенными фазами – конкретно равными нулю (рис.45,б). Мы видим, что вместо хаотического изменения интенсивности во времени получается периодическая последовательность одиночных на периоде импульсов. Их длительность будет определяться полной шириной спектра всех 100 мод. Интервал между импульсами достаточно большой, и в этом случае регистрация покажет последовательность коротких импульсов.

Таким образом, чтобы получить генерацию ультракоротких импульсов в результате сложения многих мод, необходимо, чтобы их фазы были согласованы. Это и удается сделать в режиме работы лазера, который называется режимом синхронизации мод. Он основан на ряде эффектов нелинейной оптики, и для его успешной реализации потребовались многолетние и настойчивые исследования лазеров. Здесь мы дадим упрощенное объяснение основного принципа синхронизации мод.

Обратите внимание на то, что рисунки 45,а и 45,б имеют разные масштабы по оси ординат. При согласованных фазах

интенсивность получающегося одиночного импульса на периоде повторения в огромное число раз превосходит интенсивность флукуационных импульсов. Как было сказано, существует нелинейный эффект – уменьшение поглощения некоторых веществ (просветляющиеся поглотители) при увеличении интенсивности света, проходящего через них. Эти просветляющиеся поглотители используются в лазерах с модуляцией добротности. Вот с помощью таких просветляющихся поглотителей и удастся осуществить согласование фаз (синхронизацию мод) и получить, тем самым, генерацию ультракоротких импульсов.

Следует отметить важное свойство просветляющегося поглотителя. Он при прекращении действия интенсивного излучения снова приобретает первоначальный коэффициент поглощения. Каждый поглотитель характеризуется определенным значением времени релаксации, т.е. восстановления первоначального поглощения. У одних оно составляет многие наносекунды (больше времени прохода светом расстояния между зеркалами резонатора), у других оно может составлять десятки и даже единицы пикосекунд. Соответственно, эти поглотители («медленные» и «быстрые») различным образом осуществляют режим модуляции добротности.

Чтобы пояснить это, рассмотрим, как взаимодействует многомодовое излучение с просветляющимися поглотителями, имеющими разные времена релаксации просветленного состояния $\tau_{\text{рел}}$. Вначале, для простоты, обсудим взаимодействие с излучением в виде одного короткого импульса, сопровождаемое спутником – импульсом такой же длительности, но с меньшей интенсивностью, следуемым спустя время τ . Когда $\tau_{\text{рел}} > \tau$, поглотитель остается просветленным к моменту прихода спутника, и он, несмотря на малую интенсивность, проходит через поглотитель, испытывая малое ослабление. В случае, когда $\tau_{\text{рел}} < \tau$, поглотитель успевает восстановить свое поглощение, и спутник сильно поглощается, так как его интенсивность недостаточна для просветления. Таким образом, просветляющийся поглотитель с малым значением $\tau_{\text{рел}}$ способен действовать как дискриминатор ультракоротких импульсов по амплитуде. Иными словами, при пропускании через такой поглотитель излучения с набором импульсов с разными интенсивностями и с интервалами между ними большими, чем $\tau_{\text{рел}}$, через него преимущественно будут проходить те из них, которые имеют достаточно большую интенсивность. Чем больше интенсивность в импульсе, тем меньше он будет ослабляться. Такой процесс и имеет место в

многомодовом лазере с просветляющимся поглотителем, имеющим малое время релаксации просветленного состояния. При многократных проходах в резонаторе через просветляющийся поглотитель с малым значением $\tau_{\text{рел}}$ происходит выделение наиболее интенсивного флуктуационного импульса по сравнению с другими. В конце концов на периоде остается лишь один импульс, что и требуется для режима синхронизации мод.

Различие действия просветляющихся поглотителей с разным временем релаксации проявляется в возможности возникновения гигантского импульса лазерного излучения. Если время релаксации сравнительно велико (несколько наносекунд), порядка времени прохода света между зеркалами резонатора, то при усилении спонтанного излучения каждый флуктуационный импульс будет вносить свой вклад в просветление поглотителя, поскольку после прохода очередного флуктуационного импульса поглотитель не успевает возвращаться в первоначальное состояние. Иными словами, имеет место интегральный эффект просветления, и увеличение добротности будет практически одинаковым во времени. В этом случае при регистрации лазерного излучения обычными фотоэлектронными приемниками на экране осциллографа наблюдается гладкий гигантский импульс. Если бы мы исследовали часть осциллограммы с высоким временным разрешением, то увидели бы, что излучение имеет флуктуационную структуру, характерную для многомодового излучения.

Если же просветляющийся поглотитель имеет малое время релаксации (несколько пикосекунд), порядка характерной длительности флуктуационных импульсов и интервала между ними, то в этом случае просветление, вызванное флуктуационным импульсом, будет прекращаться после его прохождения. Поскольку флуктуационные импульсы имеют самые различные интенсивности, каждый из них будет по-разному просветлять поглотитель. Это приводит к тому, что коэффициент усиления будет разным для флуктуационных импульсов разной интенсивности. Иными словами, увеличение добротности будет разным, и при многократных проходах резонатора будет происходить разное усиление (зависимость от интенсивности) флуктуационных импульсов. В результате при формировании гигантского импульса на интервале времени обхода резонатора останется лишь один усиленный (самый интенсивный) флуктуационный импульс. В этом случае гигантский импульс приобретает совсем другой вид (рис.46) – в его огибающей заключена периодическая последовательность ультракоротких импульсов.

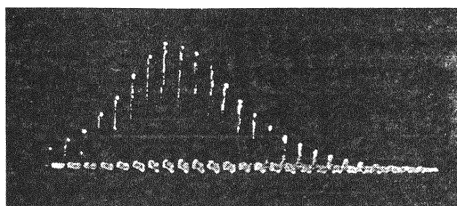


Рис.46. Гигантский импульс с одновременной синхронизацией мод

Этот процесс можно смоделировать на компьютере. На рисунке 47 показано развитие генерации при использовании «быстрого» просветляющегося поглотителя. Видно, что по мере последовательных обходов резонатора происходит «дискри-

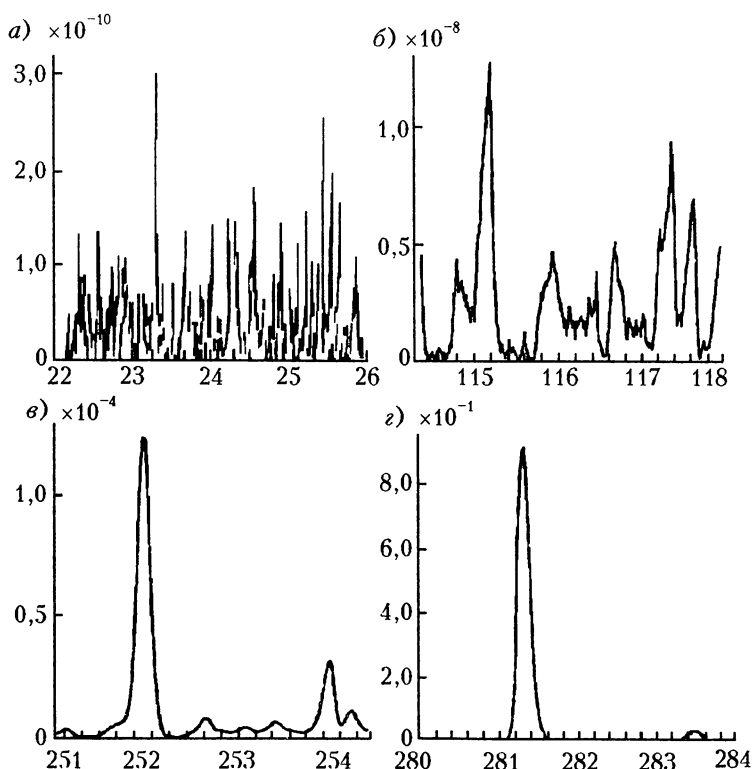


Рис.47. Компьютерное моделирование процесса развития генерации в лазере с помощью «быстрого» просветляющегося поглотителя

нирование» усиления флукуационных импульсов по их первоначальным амплитудам и в конце концов на периоде обхода светом резонатора остается одиночный ультракороткий импульс. Таким образом, получается такой же результат, как и при синхронизации мод, т.е. быстрый просветляющийся поглотитель способен осуществить режим синхронизации мод. Поскольку этот режим осуществляется самим лазерным излучением, он называется режимом пассивной синхронизации мод.

Подчеркнем, что такое действие просветляющегося поглотителя получается лишь тогда, когда его время релаксации сравнимо или меньше характерного времени флукуаций интенсивности многомодового излучения. Это означает, что нельзя получить ультракороткие импульсы с длительностью менее времени релаксации, которое даже у самых «быстрых» просветляющихся поглотителей составляет не менее 10–30 пс. Для преодоления этого недостатка был изобретен искусственный просветляющийся поглотитель, основанный на другом явлении нелинейной оптики, а именно на эффекте самофокусировки. Он заключается в том, что прозрачная среда может превратиться в собирающую линзу, фокус которой зависит от интенсивности проходящего света. Если изменение показателя преломления происходит за счет поляризации вещества, обусловленной деформацией электронных оболочек атомов, то это изменение называют высокочастотным эффектом Керра. Этот эффект обладает большим быстродействием. Электроны следуют за изменениями электрического поля световой волны за времена порядка 10^{-15} с.

Эффект самофокусировки можно использовать для нужного изменения пропускания в зависимости от интенсивности. Пусть через слой прозрачного вещества проходит пучок лазерного света. На некотором расстоянии располагается диафрагма с диаметром, меньшим диаметра пучка. При малой интенсивности часть пучка задерживается диафрагмой, что равносильно некоторому поглощению. Когда интенсивность пучка становится достаточно большой, эффект самофокусировки приводит к образованию линзы, и все излучение проходит через диафрагму. Это равносильно уменьшению поглощения. Если излучение состоит из набора флукуационных импульсов, то каждый из них станет образовывать свою линзу. Интенсивные импульсы будут без ослабления проскакивать через диафрагму, а слабые будут ею ослабляться. Таким образом, самофокусировка в сочетании с диафрагмой действует как просветляющийся поглотитель с очень малым временем релаксации просветленного состояния. Лазер, в

котором такое устройство используется для самосинхронизации мод, называется лазером с керровской линзой.

Однако получению предельно коротких импульсов препятствует еще одно обстоятельство. Дело в том, что вещества, через которые распространяется свет, обладают дисперсией, т.е. зависимостью показателя преломления от длины волны (частоты). Это приводит к разной скорости распространения света с разной частотой. В случае прохождения волны света через вещество скорость определяется как фазовая скорость $v_{\text{фаз}} = c/n$, где n – показатель преломления. Поскольку n зависит от частоты, волны разных мод будут распространяться с разными скоростями, и согласование фаз, при котором получается короткий импульс, нарушится. Как уже говорилось, импульс (волновой пакет) обладает определенной шириной спектра. Пусть теперь такой импульс с широким спектром распространяется в среде, обладающей дисперсией. За счет различия в скоростях распространения станет изменяться соотношение фаз, что приведет к изменению формы импульса. Различные частоты как бы «идут не в ногу». Те волны, для которых показатель преломления больше, начнут отставать от тех, для которых он меньше. В результате происходит увеличение длительности импульса (он «расплывается»). Кроме того, на переднем фронте импульса окажутся те частоты, для которых скорость распространения выше, а на хвосте – для которых она ниже. В итоге в пределах увеличенной длительности получается линейное изменение частоты в зависимости от времени (частотная модуляция), такое изменение частоты во времени в радиотехнике и в лазерной физике называется чирпом. Соответствующее изменение формы импульса будет тем больше, чем больше длина пути в диспергирующей среде. Таким образом, при многократных проходах импульса в резонаторе через активную среду, обладающую дисперсией, будет получаться увеличение длительности импульса – он становится чирпированным.

Для компенсации такого удлинения следовало бы пропустить чирпированный импульс через слой вещества с дисперсией противоположного знака. Тогда отставшие частоты смогли бы нагнать ушедшие вперед, и импульс снова принял бы первоначальную форму с минимальной длительностью. Однако в природе нет веществ с нужной отрицательной дисперсией. Замечательным достижением в разработке лазеров ультракоротких импульсов явилось создание специального устройства, обладающего отрицательной дисперсией. Оно основано на распространении света с разными длинами волн по разным путям,

что можно сделать с помощью призм или дифракционных решеток.

Следует сказать, что чирп в импульсе может возникать не только из-за дисперсии. Выше было указано, что при распространении импульса через вещество в нем изменяется показатель преломления. Помимо эффекта самофокусировки, изменение показателя преломления вызывает эффект фазовой самомодуляции – ФСМ, причем изменение фазы волны во времени приводит к изменению ее частоты. Поэтому эффект ФСМ ведет к уширению спектра, также сопровождаемого линейной модуляцией несущей частоты в импульсе, т.е. чирпом. Знак чирпа, т.е. увеличивается или уменьшается несущая частота в огибающей импульса, зависит от знака нелинейной добавки показателя преломления n_2 ($n = n_0 + n_2 I$).

Итак, причиной уширения импульса, сопровождаемого возникновением чирпа, является дисперсия, величина которой не зависит от интенсивности (линейный эффект), а ФСМ, которая зависит от интенсивности (нелинейный эффект), также вызывает чирп, но и уширяет спектр. Уширение спектра важно для сокращения длительности импульса, поскольку чем короче импульс, тем шире должен быть спектр. Система призм позволяет скомпенсировать не только чирп, возникающий из-за дисперсии вещества активной среды, но и этот дополнительный чирп, возникающий из-за ФСМ. В результате этого удастся получать предельно короткую длительность импульса, соответствующую ширине спектра, увеличенной за счет ФСМ.

В конечном счете лазер, генерирующий ультракороткие импульсы фемтосекундной длительности, принимает вид, показанный на рисунке 48. В этом лазере используется кристалл сапфира, обладающий широкими полосами

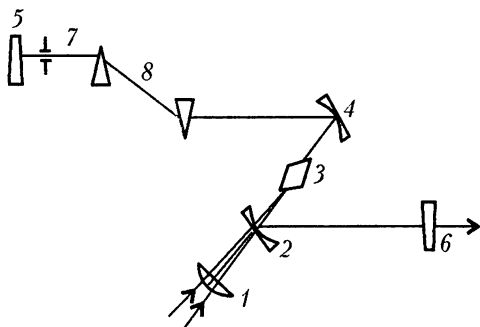


Рис.48. Схема лазера с керовской линзой: пучок зеленого света лазера непрерывного действия фокусируется линзой 1 через зеркало 2 в кристалл сапфира 3; вогнутые зеркала 2, 4 и плоские зеркала 5, 6 образуют резонатор; диафрагма 7 служит для возникновения эффекта керовской линзы; призм 8 регулируют дисперсию

поглощения и усиления. Для накачки используется излучение лазера, работающего в непрерывном режиме на длине волны, попадающей в полосу поглощения (зеленый свет). Такими лазерами накачки могут быть либо газовый аргонный лазер, либо твердотельный неодимовый лазер с преобразованием его излучения во вторую гармонику. Мощность лазера накачки должна быть не менее 5 Вт. Пучок лазера накачки фокусируется в кристалл сапфира для достижения нужного уровня инверсной населенности и усиления. Грани кристалла срезаются под углом Брюстера для предотвращения отражений от них, которые могли бы вызвать нежелательную селекцию мод. Резонатор образован четырьмя зеркалами, двумя плоскими на концах резонатора и двумя вогнутыми, фокусирующими лазерный свет в кристалл сапфира. Для обеспечения эффекта керровской линзы, который получается за счет самофокусировки в самом кристалле сапфира, вводится диафрагма, а для компенсации дисперсии – пара призм. При тщательном подборе элементов лазера и оптимальной настройке удастся получать импульсы длительностью до 5 фс. Частота следования импульсов определяется оптической длиной между зеркалами резонатора и обычно составляет около 80 МГц. Длина волны максимума спектра приходится на 750 нм (красный свет).

Успешная работа по созданию лазеров фемтосекундных импульсов сопровождалась теоретическими исследованиями физических процессов генерации. В результате экспериментальных и теоретических работ была установлена картина довольно сложного механизма генерации в лазерах с пассивной синхронизацией мод, работающих в непрерывном режиме. Оказалось, что при распространении импульса через среду с дисперсией, значение которой можно регулировать, и среду, обладающую керровской нелинейностью, которая приводит к ФСМ, эти два эффекта могут взаимодействовать сложным образом. Баланс их противоположных действий может привести к формированию устойчивых волновых пакетов, которые называются оптическими солитонами. Эти образования способны распространяться на значительные расстояния без изменения формы.

Картина генерации фемтосекундных импульсов в форме оптических солитонов выглядит, на основании теоретической модели, следующим образом. Из-за эффекта керровской линзы формируется одиночный импульс, «бегающий» между зеркалами. При его распространении в материале активной среды возникает также ФСМ. Она в комбинации с некоторой отрицательной дисперсией, которая устанавливается с помощью пары

приз, приводит к формированию солитона. Он-то и является импульсом, испускаемым лазером. Роль керровской линзы и активной среды фактически сводится к возникновению и стабилизации режима генерации, а вот форма и длительность импульса определяется формируемым солитоном.

Поскольку для образования солитона требуется выполнение определенных условий, становится очевидным экспериментально установленный факт, что для генерации фемтосекундных импульсов требуется высокая стабильность уровня накачки и механическая стабильность всей установки. Так же объясняется ограниченная выходная энергия одиночного импульса, поскольку он является солитоном (по определению, огибающая солитона ограничивает фиксированную площадь, которая пропорциональна энергии). Нужные для работы лазера эффекты получаются лишь при ограниченной средней выходной мощности, которая обычно менее 1 Вт, при этом энергия в одиночном импульсе не превосходит 10 нДж.

Новейшие достижения в области генерации лазерного излучения в виде фемтосекундных импульсов связаны с волоконными лазерами. Одномодовые волокна, активированные ионами редкоземельных элементов (Nd, Yb, Er), обладают ширинами полос усиления, достаточными для генерации импульсов длительностью до 30 фс. Исследования волоконных лазеров показали, что они могут работать в режиме генерации фемтосекундных импульсов. Мы не станем детально обсуждать устройство этих лазеров, ограничившись констатацией того факта, что они по сравнению с лазером на сапфире более компактны, эффективны и удобнее в эксплуатации.

Режим синхронизации мод приводит к совершенно необычным свойствам излучения.

До сравнительно недавнего времени исследования лазеров проводились в двух совершенно разных направлениях. Одно из них – стремление получить предельно узкую линию спектра излучения, вплоть до долей герца. Это с необходимостью требует высокой стабильности. В частности, высокостабильное излучение с предельно узкой линией необходимо для создания оптических сверхточных часов. Другое направление – стремление предельно сократить длительность импульса, что, в частности, важно для получения сверхвысокой пиковой мощности. Естественно, что при этом получается излучение с очень широким спектром.

Создание лазеров фемтосекундных импульсов, работающих в непрерывном режиме, привело к слиянию этих, казалось бы,

несовместимых направлений. Эта неожиданная связь между сверхбыстродействием и сверхстабильностью возникает из-за того, что фемтосекундные лазеры формируют импульсы за счет генерации огромного числа мод, каждая из которых представляет собой волну с узкой линией спектра. Благодаря согласованности мод происходит их интерференционное сложение. В результате получается строго периодическая последовательность фемтосекундных импульсов, а спектр состоит из отдельных узких линий, причем полная ширина спектра определяется числом синхронизованных мод.

Таким образом, фемтосекундный лазер непрерывного действия выступает, подобно двуликому Янусу, в двух совершенно различных ипостасях. С одной стороны, с помощью подходящего затвора можно выделить одиночный импульс из последовательности, и в этом случае мы имеем источник излучения в виде мощного фемтосекундного импульса, пригодного для исследований сверхбыстрых явлений. Спектр такого импульса будет непрерывным с шириной, соответствующей его длительности. С другой стороны, с помощью подходящего спектрального прибора (монокроматора) можно выделить лишь одну спектральную линию (моду лазера), и в этом случае мы имеем источник лазерного излучения с исключительно высокой монохроматичностью и стабильностью интенсивности во времени. Именно эта особенность фемтосекундных лазеров позволила использовать их для создания сверхточных оптических часов, что мы обсудим в разделе, посвященном применению.

ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ

Теперь необходимо рассмотреть очень важный вопрос о том, как же измеряется длительность столь коротких импульсов света. Обычно форму импульсов света исследуют с помощью фотоэлектронных приемников (фотоэлементов или фотоумножителей) и электронного осциллографа. Однако при длительностях менее $0,1$ нс фотоэлектронные методы становятся неприемлемыми из-за искажений в электрических цепях электронных приборов. Поэтому были разработаны специальные методы измерения с использованием самих лазерных ультракоротких импульсов. По существу, в этих методах используются явления интерференции и нелинейной оптики, в частности эффект генерации второй гармоники, о котором речь шла выше. Интенсивность излучения второй гармоники пропорциональна квадрату интенсивности излучения, входящего в нелинейный кристалл. Из-за высокой интенсивности, присущей лазерному излучению в виде ультракоротких импульсов, эффект генерации второй гармоники сравнительно легко реализуется.

На рисунке 49 показана схема, позволяющая измерять длительность ультракоротких импульсов – УКИ. По существу, это схема хорошо известного в оптике интерферометра Майкельсона. Пучок излучения в виде последовательности УКИ расщепляется на две части. Затем после отражения от зеркал они снова сводятся в один пучок, который направляется в нелинейный кристалл. Излучение второй гармоники регистрируется приемником (фотоумно-

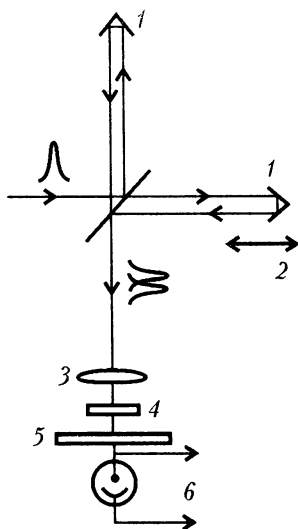


Рис. 49. Схема измерения длительности ультракороткого импульса: 1 – уголкового отражатели, 2 – регулируемое перемещение, 3 – линза, собирающая излучение, 4 – нелинейный кристалл, 5 – фильтр для выделения излучения 2-й гармоники, 6 – фотоэлектрический приемник

житель), сигнал с которого принимается осциллографом. Одно из зеркал может перемещаться контролируемым образом. В результате в пучке, направляемом в нелинейный кристалл, импульсы оказываются сдвинутыми относительно друг друга на определенную величину, определяемую перемещением зеркала, а именно на величину задержки $\Delta t = 2l/c$, где l – перемещение зеркала, а c – скорость света. Когда импульсы накладываются друг на друга, интенсивность в пучке оказывается максимальной, поскольку она складывается из двух импульсов, а когда они раздвинуты на интервал, больший длительности УКИ, интенсивность оказывается минимальной, равной интенсивности в одном импульсе. Это различие проявляется в сигнале излучения второй гармоники, которая регистрируется приемником.

Поясним это примером. Пусть интенсивность в импульсе в каждом из разделенных пучков равна I , тогда при совпадении импульсов в нелинейном кристалле интенсивность будет $2I$, а сигнал излучения второй гармоники будет $(2I)^2 = 4I^2$. При полном расхождении импульсов каждый из них в отдельности генерирует вторую гармонику, поэтому сигнал излучения второй гармоники будет $(I^2 + I^2) = 2I^2$. Как видим, сигнал излучения зависит от степени наложения импульсов. На самом деле различие будет еще больше, так как при наложении импульсов происходит интерференция, в результате которой складываются амплитуды световых волн. Пиковая интенсивность может возрасти в 4 раза, а сигналы излучения второй гармоники в случае совпадения импульсов и их полного расхождения станут различаться в 8 раз.

Итак, с помощью схемы, показанной на рисунке 49, можно получить зависимость сигнала излучения второй гармоники от величины временной задержки Δt . Соответствующая кривая называется автокорреляционной функцией интенсивности излу-

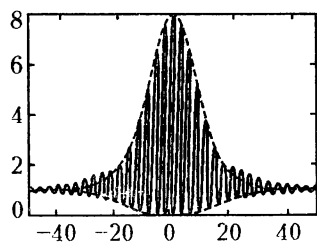


Рис. 50. Автокорреляционная функция интенсивности

чения. Конкретный вид этой кривой, получаемой в эксперименте, показан на рисунке 50. Она имеет следующие особенности: максимум кривой в 8 раз превосходит значение на крыльях, а сама кривая изрезана интерференционными пиками с периодом, равным периоду волны в максимуме спектра излучения. Поэтому, зная спектр излучения, нет необходимости градуиро-

вать задержку. Конкретно для лазера на сапфире этот период равен 2,6 фс. Ширину профиля автокорреляционной функции можно определить по числу интерференционных пиков. Связь между этой шириной и длительностью импульса, вообще говоря, определяется формой импульса. Экспериментальные и теоретические исследования позволяют сделать заключение о форме импульса (он, как было сказано, является солитоном), генерируемого лазером с керровской линзой. С хорошей точностью, длительность импульса в 1,5 раза меньше ширины профиля автокорреляционной функции интенсивности.

Подчеркнем, что в схеме не требуется никаких устройств с высоким быстродействием. Временное разрешение и точность измерений достигаются точностью перемещения зеркала. Из-за огромной скорости света для измерения фемтосекундных импульсов достаточны перемещения с помощью микрометрического винта.

УСИЛЕНИЕ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ

Стремление сократить длительность импульса лазерного излучения связано с желанием повысить пиковую мощность. Сравнительно скромная энергия лазерного излучения (1–10 Дж), будучи сосредоточена в фемтосекундном импульсе, дает пиковую мощность, близкую к петаватту (1 ПВт = 10^{15} Вт), а при фокусировании лазерного пучка получается интенсивность до 10^{21} Вт/см². Чтобы иметь представление об этой величине, полезно оценить величины некоторых физических характеристик, связанных с интенсивностью света.

Хорошо известно, что свет оказывает давление на отражающую или поглощающую поверхность. Величина этого давления определяется интенсивностью света и обычно крайне мала. В начале прошлого века выдающийся русский физик П.Н.Лебедев, имя которого носит Физический институт Российской академии наук, поставил уникальные эксперименты, доказывающие существование давления света. Он использовал самый интенсивный источник света того времени – электрическую дугу. Потребовалось исключительное мастерство экспериментатора, чтобы зафиксировать крайне малую величину давления. Но при интенсивности 10^{21} Вт/см² давление света достигает 300 Гбар, что превосходит давление в центре Солнца. Такое давление и другие эффекты взаимодействия света с веществом, в принципе, дают возможность ускорять вещество до величин 10^{22} g (g – ускорение свободного падения). Разумеется, вещество при взаимодействии с таким излучением превращается в плазму, а само взаимодействие продолжается не более нескольких фемтосекунд. Но в пределах столь короткого промежутка времени можно в лабораторных условиях создать экстремальные физические условия, подобные тем, что имеют место в недрах звезд, вблизи «черных дыр», а также при ядерных взрывах.

С интенсивностью связана напряженность электрического поля в световой волне. При интенсивности 10^{21} Вт/см² она превосходит 10^{12} В/см, что намного больше напряженности кулоновского взаимодействия в атомах. Внешние электроны срываются с атомов и ускоряются до скоростей, приближающихся к скорости света. При этом становятся существенными эффек-

ты теории относительности (релятивистские эффекты), например увеличение массы с ростом скорости. Поведение вещества в столь сильных световых полях изучается релятивистской нелинейной оптикой.

Как отмечено выше, энергия одиночного импульса в непрерывной последовательности, генерируемой лазером с керровской линзой, не превосходит десятка наноджоулей. Поэтому для увеличения энергии и, соответственно, пиковой мощности необходимо усиление. В лазерной технике широко используются лазеры-усилители. Они отличаются от лазеров-генераторов отсутствием резонатора. Через активную среду пропускается лазерное излучение, которое усиливается за счет вынужденного излучения. Для увеличения коэффициента усиления можно использовать несколько слоев активной среды (каскадов усиления), а можно несколько раз пропускать лазерное излучение через один и тот же слой (многопроходовая схема), пока не наступит насыщение (уменьшение усиления) активной среды. Обычно используют сочетание того и другого.

Однако при усилении лазерного излучения в виде ультракоротких импульсов возникают специфические трудности. Помимо необходимости сохранять длительность импульса при усилении, которая, естественно, увеличивается из-за влияния дисперсии активной среды, возникает проблема взаимодействия интенсивного излучения с веществом. Попросту говоря, это проблема повреждения усилителя собственным усиленным и интенсивным излучением.

Известно, что при интенсивностях $10^{11} - 10^{12}$ Вт/см² практически во всех прозрачных материалах наблюдается сильная самофокусировка с последующим оптическим пробоем (за счет огромных напряженностей электрических полей, соответствующим таким интенсивностям), приводящим в твердых телах к необратимым повреждениям. Из-за очень короткой длительности импульса интенсивность излучения достигает этих значений при сравнительно малых энергиях. Это означает, что при разумных размерах усилительной среды не удастся получить существенной энергии усиленных импульсов. Для преодоления этой трудности была использована замечательная методика – усиление чирпированных импульсов. Ее сущность заключается в том, что усиливается импульс с большой длительностью, а после усиления длительность сокращается.

Выше было показано, что дисперсия приводит к удлинению импульса и появлению чирпа (линейной частотной модуляции). Для борьбы с этим используются системы компенсации чирпа

(регулятор дисперсии с помощью пары призм). Оказалось, что это явление изменения длительности, сопровождаемого чирпом, можно с большим успехом использовать для решения проблемы усиления ультракоротких импульсов. Соответствующая техника усиления является оптическим аналогом техники, широко используемой в радиолокации. Сущность этой методики заключается в следующем.

Как известно, действие радиолокационной станции основано на приеме радиоволн в виде импульсов, отраженных от целей. При этом максимальное расстояние, на котором можно обнаружить цель (дальнодействие радиолокатора), зависит от мощности радиоволн, испускаемых станцией, и чувствительности приемника. Поскольку испускаемые станцией радиоволны и отраженные сигналы ослабляются пропорционально R^{-2} , где R – расстояние до цели, то дальнодействие радиолокатора определяется фундаментальной зависимостью от мощности P : $R \sim P^4$. Как видим, это очень сильная зависимость. Для определения заданного числа целей в каком-то направлении нужно, чтобы радиолокатор обладал еще и соответствующим разрешением по дальности. Оно определяется длительностью импульса радиоволн. Пространственная протяженность импульса радиоволн – длительность импульса, умноженная на скорость света, должна быть меньше, чем расстояние между целями. Таким образом, для увеличения дальнодействия нужно увеличивать мощность (точнее, энергию радиоволны в импульсе) генератора радиоволн, а для увеличения разрешения по дальности нужно сокращать длительность импульса.

Возникает принципиальная проблема, с которой в 40-х годах прошлого века столкнулись специалисты, работающие в области радиолокации. При сокращении длительности импульса соответственно увеличивается пиковая мощность и, следовательно, растет напряженность электрического поля в радиоволне. Это приводит к электрическим пробоям в генераторе и в тракте передачи волны к излучаемой антенне. Стремление улучшить разрешение радиолокатора по дальности вступало в противоречие со стремлением увеличить его дальнодействие.

Было найдено остроумное решение этой проблемы. Общий принцип его показан на рисунке 51. Генерируется импульс с большой длительностью. Большая длительность позволяет иметь значительную энергию при допустимом значении пиковой мощности. Но несущая радиочастота в этом импульсе линейно изменяется во времени, т.е. осуществляется частотная модуляция с полной шириной частоты модуляции ΔF . Как было

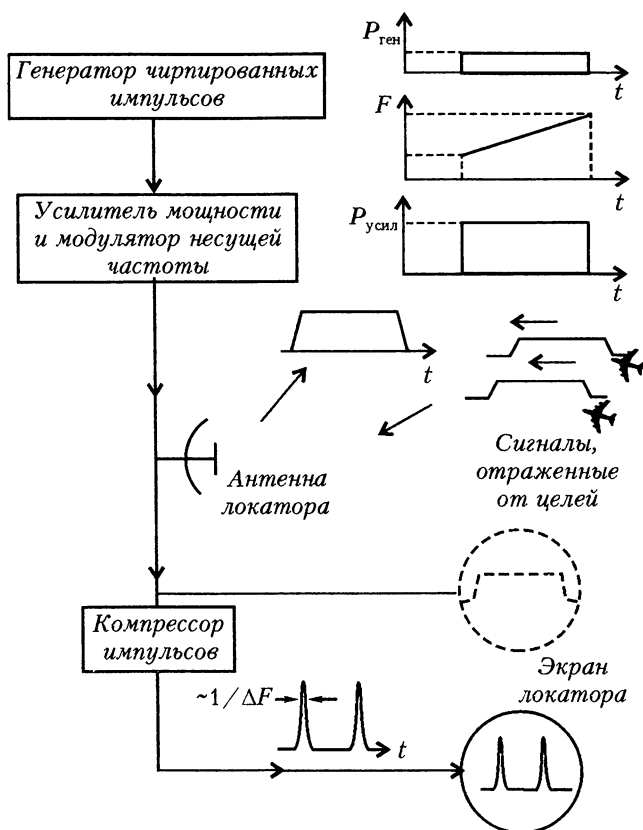


Рис.51. Блок-схема радиолокатора, использующего принцип чирпирования импульсов. Пунктиром показано, каким был бы сигнал на экране без компрессии отраженных от целей сигналов

указано выше, такие импульсы с линейной частотной модуляцией называются чирпированными.

Таким образом, радиолокатор испускал радиоволны в виде длинных, но чирпированных импульсов. Отраженные от разных целей сигналы также являются длинными импульсами, и они накладываются друг на друга, что мешает различить отдельные цели. Однако в приемнике эти сигналы пропускаются через специальное радиотехническое устройство, представляющее собой линию задержки, причем величина задержка линейно зависит от частоты. Такая линия задержки, по существу, является системой, обладающей определенной дисперсией. Величина этой

дисперсии и ее знак устанавливаются таким образом, что чирп отраженных импульсов компенсируется, и каждый импульс от цели сжимается до минимальной длительности, которая соответствует ширине спектра, т.е. до длительности, приблизительно равной $1/\Delta F$. В результате на экран радиолокатора поступают сигналы в виде коротких импульсов, длительность которых обеспечивает нужное разрешение по дальности. Радиолокационные установки, работающие на этом принципе, получили название чирп-радаров. Так работают практически все современные радиолокаторы, в частности уникальные установки, предназначенные для обнаружения объектов в космосе.

Для применения в лазерной технике важно, что таким способом (увеличение длительности импульса с частотной модуляцией и последующее сжатие при использовании нужной дисперсии) можно манипулировать величиной пиковой мощности импульса без изменения энергии в импульсе. Аналогичный подход и был использован для эффективного усиления ультракоротких лазерных импульсов.

Лазер непрерывного действия с керровской линзой генерирует непрерывную последовательность фемтосекундных импульсов с частотой следования около 80 МГц. Длительность этих импульсов составляет 10–30 фс, а энергия не превышает 10 нДж. Далее производится выделение из последовательности отдельных импульсов с помощью электрооптического затвора. В результате частота следования импульсов снижается. Необходимость снижения частоты следования связана с проблемой накачки активной среды усилителя. Чем больше усиленная энергия импульса на выходе усилителя, тем большую энергию нужно вложить в активную среду усилителя. Из-за проблем отвода тепла необходима пауза между циклами усиления, в течение которой усилительная среда охлаждается до нужной температуры. Поэтому приходится увеличивать интервал между циклами накачки. Кроме того, средняя мощность источников накачки (в качестве них обычно используются лазеры с модуляцией добротности, генерирующие импульсы наносекундной длительности) также ограничена. При выходной энергии около 1 мкДж частота повторения усиленных импульсов может составлять не более 1 МГц, при энергии около 1 мДж она должна быть снижена до 1–10 кГц, а при энергии в несколько джоулей интервал между усиленными импульсами достигает нескольких минут.

Импульсы, выделенные электрооптическим затвором, направляются в систему, использующую пару отражательных

дифракционных решеток, которые действуют подобно паре призм регулятора дисперсии. Замена призм дифракционными решетками дает следующие преимущества. По сравнению с призмами дифракционные решетки обладают гораздо большей угловой дисперсией. Поэтому, применяя их, можно достигать существенно больших изменений длительности импульса. Также исключаются нелинейные эффекты в материале призм (например, самофокусировка), которые могут ограничить мощность излучения. Величину дисперсии, получающейся в системе с дифракционными решетками, можно подбирать такой, что фемтосекундный импульс превращается в chirпированный с увеличением длительности в $10^3 - 10^4$ раз. Эта система двух решеток, растягивающая импульс, называется экспандером.

После растяжения импульса его пиковая мощность уменьшается во столько же раз. Используя усилительную систему, состоящую либо из усилителя, в котором усиливается излучение многократно пропускается через активную среду (многопроходовой усилитель), либо из отдельных каскадов усиления с прогрессивным увеличением диаметра лазерного пучка, можно увеличить энергию импульса в $10^8 - 10^9$ раз, избегая повреждения усилительных элементов.

Наконец, растянутые и усиленные импульсы пропускаются через другую пару дифракционных решеток, настроенных так, что их дисперсия компенсирует chirп усиленного импульса. В результате он сжимается до почти первоначального значения длительности. Эта система двух дифракционных решеток называется компрессором.

В результате получается схема, показанная на рисунке 52. Площадь дифракционных решеток компрессора должна быть достаточно большой, чтобы интенсивность излучения не превышала порог разрушения покрытия решеток (обычно это тонкий слой золота, наносимый напылением в вакууме). Этот порог для отражательных дифракционных решеток, обычно используемых в схеме компрессора, составляет около 1 мДж/см^2 . Это означает, что для усиления фемтосекундных импульсов до энергий в несколько джоулей требуются дифракционные решетки с размерами, близкими к метру. Современная техника позволяет изготавливать такие решетки, и они были использованы в уникальных лазерных установках, созданных в США, Японии, Франции, а также в нашей стране. Эти установки позволяют получать импульсы с энергией в десятки джоулей при длительности в десятки фемтосекунд. При этом пиковая мощность достигает порядка 1 ПВт (10^{15} Вт), а при фокусировании

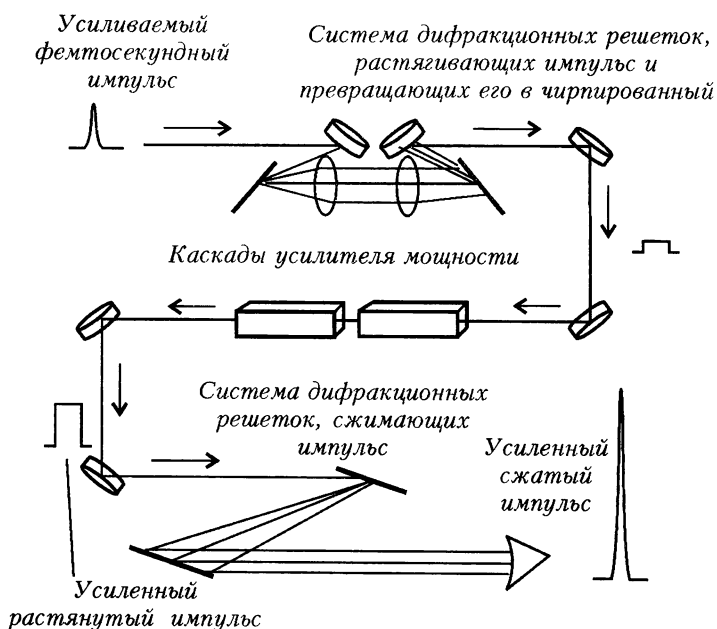


Рис.52. Схема установки для усиления чирпированных импульсов

излучения получается интенсивность порядка 10^{21} Вт/см². Было установлено, что для усиления в таких установках целесообразно использовать не вынужденное излучение, а параметрическое усиление. Это стало возможным благодаря созданию лазеров накачки на неодимовом стекле с нужными параметрами. В нашей стране в Институте прикладной физики Российской академии наук создана уникальная установка, на которой удастся получать импульсы длительностью 45 фс с пиковой мощностью 500 ТВт ($0,5 \cdot 10^{15}$ Вт).

НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРОВ

Благодаря своим уникальным свойствам лазеры нашли многочисленные применения в науке, в технике и медицине. Эти применения можно подразделить на группы, в которых используется то или иное свойство излучения лазеров. К таким свойствам относятся: высокая интенсивность лазерного излучения, сосредоточенная в направленном пучке, исключительно короткая длительность импульса излучения, а также уникальные спектральные характеристики. В некоторых случаях границы таких групп перекрываются, т.е. некоторые применения требуют комбинации свойств. Ниже рассматриваются лишь некоторые примеры применений лазеров, основанные на тех или иных характеристиках лазерного излучения.

Применения, основанные на высокой интенсивности направленного пучка

Появление лазера – источника света высокой интенсивности с почти параллельным пучком – сразу же вызвало огромный интерес с многочисленными спекуляциями о «лучах смерти». Специалисты спокойно и иронически относились к этому. Одно американского ученого журналист спросил: можно ли убить человека лазером? Он ответил, что пожалуй, можно, если зарядить ружье вместо пули кристаллом рубина. Но работы по лазерам быстро прогрессировали и почти сразу же были продемонстрированы важные применения. Уже через два года после создания первого лазера (1962) лазер на рубине был использован американскими учеными для локации Луны. С помощью астрономического телескопа диаметр пучка лазера расширялся до метрового размера с соответствующим уменьшением телесного угла расходимости пучка. Излучение направлялось на поверхность Луны, рассеивалось во все стороны, в том числе и в телескоп. В фокусе помещался чувствительный фотомножитель – ФЭУ – с узкополосным фильтром, пропускающим лазерное излучение и отсекающим излучение фона. Несмотря на огромные потери света при его распространении к Луне и обратно, был уверенно зарегистрирован отраженный сигнал. В 1963 году аналогичный эксперимент был поставлен в СССР (коллектив,

руководимый Н.Г.Басовым). Излучение с энергией 50–70 Дж, сосредоточенное в импульсе длительностью около 2 мс, направлялось в телескоп с диаметром зеркала 2,6 м Крымской астрофизической обсерватории АН СССР. По расчетам на Луне освещалось пятно диаметром около 15 км. Свет, рассеянный поверхностью Луны, удавалось зарегистрировать чувствительной аппаратурой, использующей ФЭУ. В приемник попадало около 40 фотонов, что было достаточно для регистрации.

В дальнейшем эти эксперименты претерпели существенное улучшение. С помощью советского «Лунохода» и американских станций «Аполло» на Луну были доставлены уголковые отражатели – наборы призм полного отражения в обратном направлении. Площадь отражающей поверхности составляла около $0,5 \text{ м}^2$. Это существенно увеличивало интенсивность отраженного излучения. В этом случае уже использовались лазеры с модуляцией добротности, излучающие импульсы длительностью несколько наносекунд. Это означает, что точность измерения пути света к Луне и обратно была лучше, чем несколько метров. Была увеличена выходная энергия и улучшено качество пучка. В результате удалось научиться измерять огромные расстояния с точностью до десятков сантиметров, что имеет огромное значение для геодезии. В частности, удается получать информацию о дрейфе континентов и перемещении полюсов Земли.

В военном деле высокая направленность лазерного пучка и наличие эффективных компактных лазеров привели к созданию дальномеров и точных прицелов. (Обычно используются твердотельные лазеры на гранатах с неодимом.) Появилось так называемое «точечное оружие». Ракеты и бомбы в сочетании с такими лазерными системами обладают точностью попадания в цель менее 1 м.

Прогресс в области лазеров сделал реальным то, что казалось фантастикой, а именно создание лазерного оружия. Оно связывается с химическими лазерами, которые являются автономными и способными генерировать лазерные пучки в течение секунд с мощностью в несколько мегаватт. В США существуют проекты и ведутся разработки систем химических лазеров, предназначенных для уничтожения баллистических ракет. Ракеты имеют тонкие оболочки систем горючего и поэтому очень уязвимы на взлете. Еще 20 лет тому назад было продемонстрировано уничтожение баллистической ракеты излучением химического лазера MIRACLE на расстоянии около одной мили. Усовершенствованные лазеры этого типа предполагается размещать на космических платформах.

Еще один проект основан на использовании химического кислород-йодного лазера мегаватного уровня в непрерывном режиме. Он устанавливается на модифицированном самолете Боинг-747. С помощью вспомогательных лазеров производится обнаружение цели, определение расстояния до нее и наведение мощного лазерного пучка в уязвимый участок цели. Баки с химическими реагентами позволяют произвести около 20 «выстрелов». Предполагается, что такая «лазерная пушка» сможет поражать баллистические ракеты на разгонном участке их траектории полета с расстояния около 400 км. Стоимость каждого самолета оценивается в 1,5 млрд долларов. В печати неоднократно сообщалось об успешных испытаниях. Считается, что такие лазерные системы будут частью американского противоракетного щита. Предполагается осуществить патрулирование в районах нахождения подводных лодок. Официально создание таких систем объясняют угрозой со стороны Ирана и КНДР.

Также проводятся разработки тактического лазерного оружия и систем уничтожения лазерным излучением подозрительных предметов в борьбе с терроризмом. Эти системы основаны на волоконных лазерах с накачкой лазерными диодами. Они достаточно компактны, обладают высоким КПД и позволяют получать пучок со средней мощностью в киловатты.

Способность высокой концентрации энергии излучения при фокусировании лазерного пучка привела к применениям в промышленности и медицине. Мощные лазеры на CO_2 , а в последнее время и волоконные лазеры успешно применяются для резки, сверления и сварки в автомобильной и авиационной промышленности. Также появились «лазерные скальпели» в хирургии.

Главное преимущество использования лазеров заключается в точности обработки. Она, в свою очередь, существенно зависит от размера пятна, в которое можно сфокусировать излучение. Этот размер определяет область, куда направляется энергия лазерного излучения, вызывая нагрев вещества с последующими изменениями (плавление, испарение, образование плазмы). Распределение интенсивности по диаметру пятна имеет колоколообразную форму (рис.53). Диаметр кружка d , в котором концентрируется практически вся энергия ($\sim 80\%$), определяется дифракцией пучка на входном отверстии фокусирующей линзы: $d = 1,22(\lambda/D)F$, где λ – длина волны, D – диаметр линзы, F – фокусное расстояние линзы. При типичных значений величин, входящих в эту формулу, размер области, куда направляется энергия, достаточно мал. Это определяет преимущество лазер-

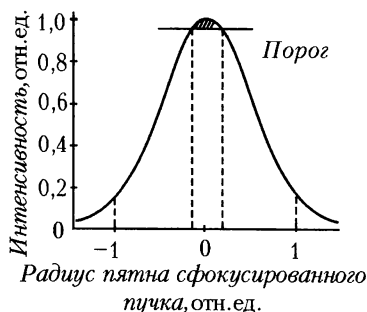


Рис. 53. Распределение интенсивности в фокальном пятне. Пунктиром показана область интенсивности, превышающая некоторый (условный) порог воздействия излучения на вещество

ной резки и сварки металлов по сравнению с электросваркой и сваркой с использованием ацетиленовых и плазменных горелок.

Однако точность обработки металлов с помощью лазерного излучения в непрерывном режиме или при сравнительно длинных импульсах (более нескольких наносекунд) оказывается хуже, чем следует из размера пятна фокусировки. Это объясняется процессом взаимодействия лазерного излучения с металлом. Он нагревается вплоть до плавления и испарения

с выносом материала (абляция) из области воздействия излучения на материал. При этом края обработки при резке и сверлении недостаточно гладкие. На них часто остаются капли расплавленного металла. Для прецизионной обработки, нужной, например, для современной электроники, это неприемлемо.

Оказалось, что использование лазерного излучения в виде ультракоротких импульсов позволяет получать резкие края обработки. Это происходит из-за очень быстрого воздействия излучением на материал. Энергия лазерного излучения вкладывается в область фокуса быстрее, чем происходит диффузия тепла в окружающую (необлученную область). Вещество быстро испаряется и даже ионизируется. Абляция материала получается не в виде капель расплавленного материала, а в виде пара и плазмы. Это приводит к тому, что получается резкий край обработки материала.

При тщательном контроле мощности лазерного пучка испарение может происходить в области максимума распределения интенсивности по диаметру пятна фокусировки. Таким образом, используя лазерное излучение в виде ультракоротких импульсов, можно преодолеть дифракционный предел. Так, в пленках серебра на стеклянных подложках удавалось получать отверстия диаметром 300 нм. Этот подход был использован также для ремонта больших микросхем. При их изготовлении иногда получается нежелательное замыкание микропроводов. С помощью прецизионного испарения можно порвать это соединение. Это было с успехом продемонстрировано на многих материалах,

включая не только металлы, но и алмаз, карбид кремния, различные полупроводники.

Прецизионная обработка прозрачных материалов с помощью лазерного излучения также возможна. Естественно возникает вопрос, как энергия лазерного излучения может быть вложена в прозрачный материал. Как было указано, высокая интенсивность лазерного излучения способствовала развитию нелинейной оптики. Одним из проявлений нелинейной оптики являются многофотонные процессы, в которых элементарный акт перехода из одного состояния в другое происходит в результате поглощения не одного, а нескольких фотонов. Принципиальную возможность такого перехода в атоме из одного энергетического состояния в другое отметил А. Эйнштейн еще 1905 году. Частным случаем является двухфотонное поглощение. В 1929 – 1931 годах М. Гепперт-Майер (США) выполнила расчет двухфотонного перехода атома водорода из возбужденного состояния $2S$ в основное состояние $1S$ с испусканием двух фотонов (переход с испусканием одного фотона запрещен). На основании этих расчетов были объяснены важные результаты астрофизических наблюдений.

В отличие от линейной оптики, вероятность многофотонного перехода зависит от интенсивности, а именно – она пропорциональна I^n . Такая зависимость от интенсивности приводит к тому, что прозрачное вещество начинает поглощать свет, если его интенсивность достаточно велика. До появления лазеров многофотонные процессы никак не проявлялись в оптических экспериментах, а теперь они не только были обнаружены и изучены, но и стали играть роль в важных применениях, в частности при прецизионной обработке прозрачных материалов. Основная идея такой обработки основана на том факте, что при фокусировании пучка пространственное распределение интенсивности имеет, как уже говорилось, колоколообразную форму. Если характер взаимодействия с веществом, в которое сфокусировано излучение, носит нелинейный характер (например, многофотонное поглощение) или обладает порогом, то в таком взаимодействии будет участвовать лишь часть излучения с интенсивностью выше определенного значения. Эта часть сосредоточена в кружке, диаметр которого меньше дифракционного. На этом обстоятельстве и основан ряд применений лазеров. Очевидно, что для этого требуется высокая пиковая мощность излучения, которая получается при фокусировании лазерного излучения в виде импульсов.

Однако при обработке таких материалов, как стекло, важно

избежать растрескивания, которое получается при чрезмерном вложении энергии в область фокусирования пучка. Исследования показали, что этого можно избежать, сокращая длительность импульса лазерного излучения. Рассмотрим механизм взаимодействия излучения в виде импульсов с прозрачными материалами. Сначала в результате многофотонного поглощения происходит нагрев объема вещества, в котором имеет место поглощение. Интенсивность при этом настолько высока, что нагрев приводит к образованию плазмы с высокой плотностью. Такая плазма поглощает все излучение, так как уже не требуется многофотонное поглощение. Это механизм хорошо известного оптического пробоя с образованием искры. Энергия в плазме передается окружающему веществу, вызывая сильный нагрев, высокое давление и образование ударных волн. Очевидно, чем длиннее импульс, тем большая энергия будет вкладываться в плазму. Таким образом, контроль этой энергии можно осуществить изменением длительности импульса. Это наблюдалось, например, в экспериментах по получению в стеклянной пластинке малых отверстий. При сравнительно длинных импульсах порядка 100 пс подбиралась минимальная энергия импульса, достаточная для образования отверстия минимального диаметра. Но его возникновение сопровождалось сильным растрескиванием стекла около отверстия. Это, естественно, происходило из-за большой энергии, вкладываемой в плазму. Уменьшение длительности до 100 фс позволило сильно уменьшить энергию, сохраняя нужную интенсивность для многофотонного поглощения, а также уменьшить энергию, вкладываемую в плазму. В результате получались аккуратные отверстия диаметром порядка микрон.

Как известно, в случае импульсного источника пиковая мощность связана со скважностью – отношением периода следования импульсов к их длительности. Так, типичный фемтосекундный лазер на сапфире генерирует непрерывную последовательность импульсов с длительностью ~ 50 фс и частотой следования ~ 100 МГц при средней мощности $\sim 0,5$ Вт. Это означает, что пиковая мощность превышает 10^5 Вт. При фокусировании пучка такого лазера легко получить условия достаточно сильно-го многофотонного поглощения.

Таким образом, сокращение длительности импульса, во-первых, увеличивает интенсивность, что нужно для процесса взаимодействия с веществом (быстрый нагрев, многофотонное поглощение в прозрачных материалах), а во-вторых, позволяет вкладывать малые порции энергии, что определяет точность

обработки. Образно можно сравнить действие излучения с длинными импульсами с отбойным молотком, а с ультракороткими импульсами – с резцом скульптора.

Этот же подход создания малых отверстий при минимальном повреждении в окружающем материале был с успехом использован в медицине и биологии. В медицине – для изготовления специальных искусственных кровеносных сосудов. Они должны быть изготовлены из пластмассовых трубочек, не отвергаемых организмом, и иметь многочисленные отверстия особой формы. На рисунке 54 изображены примеры таких имплантационных кровеносных сосудов, полученных с помощью излучения фемтосекундных лазеров.

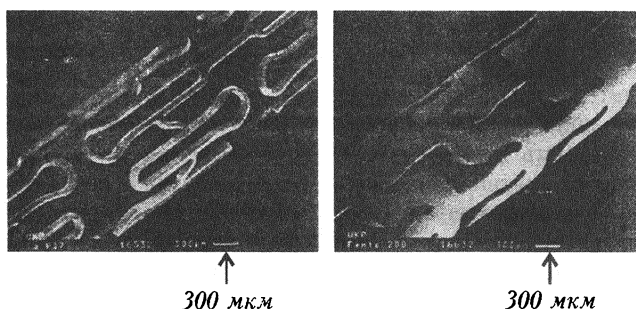


Рис.54. Имплантационные кровеносные сосуды, полученные с помощью фемтосекундных импульсов

Такой же подход используется в микрохирургии. Благодаря возможности острого фокусирования и получения значительной интенсивности в малом объеме излучение фемтосекундного лазера можно уподобить острейшему скальпелю. С его помощью в микрососудистой хирургии можно делать многочисленные маленькие отверстия в мышце сердца для улучшения кровообращения. А в микрохирургии глаза происходит следующее. Пучок фемтосекундного лазера фокусируется на точную глубину в роговицу глаза, что сопровождается образованием маленьких пузырьков. Затем слой, подвергнутый такой обработке, можно удалить. Лазер позволяет вырезать слой более гладко, чем стандартные методики со скальпелем. Обеспечивается лучший контроль разрезов, практически не затрагивая окружение.

Аналогичную методику используют для получения микроскопических отверстий в биологических клетках. Из-за малой энергии фемтосекундного импульса получается отверстие без

существенных повреждений за его пределами. Клетка остается живой после такого воздействия. Если в растворе содержатся молекулы ДНК, то они через образовавшееся отверстие могут попасть внутрь клетки. В обычных условиях мембрана клетки защищает ее от такого проникновения. Новая методика получения малых отверстий в живой клетке является частью исследований в области генной инженерии. Уже появилось несколько работ, посвященных такой лазерной микрохирургии биологической клетки.

Многофотонное поглощение лазерного излучения используется и для усовершенствования микроскопа. Как известно, дифракция света ограничивает разрешающую способность оптических приборов. Так, дифракция на краях круглой диафрагмы объектива микроскопа приводит к тому, что в фокальной области вместо точки получается пятно с колоколообразным распределением интенсивности по радиусу (см. рис.53). Наложение пятен в фокальной плоскости определяет предел разрешения, который не может быть меньше величины, задаваемой формулой для размера этого пятна. Уменьшение размера пятна и, соответственно, увеличение разрешающей способности микроскопа достигается как увеличением численной апертуры объектива (D/F), так и уменьшением длины волны. И то, и другое имеют ограничения. В частности, сокращение длины волны до УФ диапазона может повреждать исследуемые объекты и сильно рассеивается в биологических тканях. Использование лазерного излучения в сочетании с многофотонным поглощением позволяет обойти это ограничение.

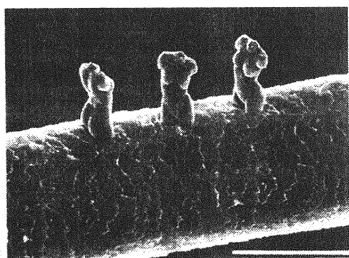
Обычно биологические объекты, такие как клетки, окрашиваются для лучшего наблюдения. В частности, структуры ядер клеток, содержащие молекулы наследственности ДНК, называются хромосомами из-за их способности быть окрашенными. Если используется люминесцирующий краситель, то можно получить еще более яркое изображение. Предположим, что такой краситель освещается светом, длина волны которого больше, чем длина волны поглощения. В этом случае люминесцентное свечение будет отсутствовать. Теперь станем повышать интенсивность до уровня, при котором начнется двухфотонное поглощение. В таком случае размер кружка, в котором интенсивность достаточна для поглощения, может быть существенно уменьшена. Таким образом, при тщательном контроле интенсивности лазерного излучения и положения фокуса пучка на объекте можно сделать видимой область объекта с размерами в несколько раз меньшими, чем те, что ограничиваются дифракци-

ей. С помощью прецизионного перемещения образца можно получить изображение всего объекта.

Важно отметить, что на практике обычно используется лазерное излучение с длиной волны около 1 мкм. Оно способно проникать довольно глубоко в биологическую ткань (до 1 мм) и, что важно, в отличие от УФ излучения не повреждает объект, а разрешение получается такое, для которого при обычных условиях пришлось бы использовать жесткое УФ излучение. Соответствующая техника называется двухфотонной (трехфотонной) микроскопией ближнего поля.

Другим замечательным применением лазеров с использованием двухфотонного поглощения является изготовление микро- и наноструктур. Это применение основано на полимеризации некоторых материалов в жидкости, происходящей под действием УФ излучения. В результате полимеризации в местах, подвергнутых облучению, вещество отвердевает. Это широко используется в зубоврачебной практике. Если такую жидкость осветить лазерным излучением видимого или ближнего ИК диапазона, то полимеризация может возникнуть за счет двухфотонного поглощения при достаточно высокой интенсивности.

а)



б)

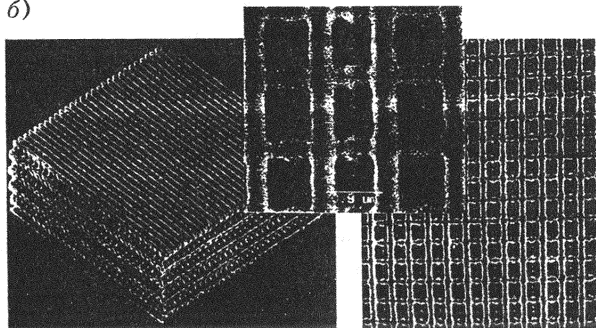


Рис.55. Копия скульптуры Венеры на человеческом волосе (а) и периодические микроструктуры (б)

При фокусировании лазерного пучка излучение будет поглощаться в малом объеме вблизи фокуса. Путем перемещения фокуса внутри жидкости можно получить отвердевание вещества в структуре определенной формы.

В частности, использовалось сфокусированное излучение фемтосекундного лазера на сапфире с длиной волны около 800 нм. Излучение с такой длиной волны не вызывает полимеризации. Однако при высокой интенсивности происходит двухфотонное поглощение, действие которого эквивалентно излучению с длиной волны ~ 400 нм, которое уже способно вызвать полимеризацию. Сканируя фокус лазерного пучка с помощью компьютера от точки к точке и тщательно контролируя интенсивность и продолжительность облучения, после удаления жидкости удается получать трехмерные миниатюрные структуры. Точность деталей таких структур может составлять около 100 нм. На рисунке 55 показаны образцы таких структур, полученные Б.Н.Чичковым и его коллегами из Лазерного центра города Ганновера (Германия).

Лазерные излучения на других длинах волн

Как уже говорилось, лазеры были запущены на многих типах активных сред с генерацией на длинах волн от ИК до УФ диапазонов. Благодаря исключительно высокой мощности и интенсивности лазерного излучения удается осуществлять многие эффекты нелинейной оптики, в частности позволяющие генерировать излучение на длинах волн, отличающихся от длины волны лазера. Генерация за счет таких нелинейных эффектов, как генерация гармоник, параметрическое преобразование волн, вынужденные рассеяния (комбинационное, или рамановское, и Мандельштама–Бриллюэна), является важнейшей частью квантовой электроники, так как дает возможность существенно расширить диапазон длин волн лазерного излучения. Особенно важным является параметрическое преобразование, которое позволяет генерировать лазерное излучение с плавной перестройкой длины волны в широком спектральном диапазоне.

На рисунке 56 представлена шкала электромагнитных волн от радиодиапазона до рентгеновского излучения. На ней стрелками отмечены диапазоны длин волн излучения, которое получается с помощью лазеров. Мы подробнее остановимся на двух областях: терагерцового излучения ($\sim 10^{12}$ Гц), лежащего на границе радиоволн и далекого ИК излучения (отмечена двумя стрелками), и излучения, лежащего на границе крайнего УФ

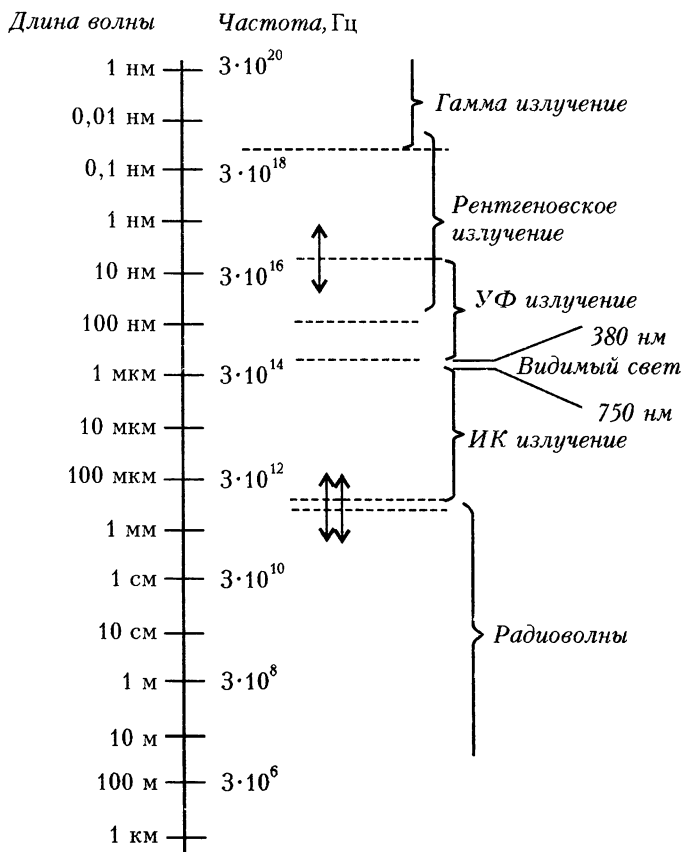


Рис.56. Шкала электромагнитных волн

диапазона (вакуумный ультрафиолет – ВУФ) и мягкого рентгена (~ 2 нм) (отмечена одной стрелкой). Также рассмотрим генерацию особого вида излучения – так называемый суперконтинуум. Генерация этих видов излучений связана с использованием лазеров, работающих в режиме ультракоротких (фемтосекундных) импульсов. Причем в случае генерации около мягкого рентгена излучение может получаться уже в виде аттосекундных ($1 \text{ ас} = 10^{-18} \text{ с}$) импульсов. При генерации суперконтинуума и излучения терагерцового диапазона важнейшей особенностью излучения и в том и другом случае является исключительно широкий сплошной спектр излучения, что, на первый взгляд, никак не свойственно лазерному излучению. Однако широкий

спектр сочетается с высокой направленностью пучка (высокая пространственная когерентность) и яркостью излучения, характерного для лазерного излучения.

Суперконтинуум. Было обнаружено, что при фокусировании пучка лазера УКИ в слой прозрачного вещества (например, в такие жидкости, как CCl_4 , тяжелая вода, этиленгликоль, или в такие твердые тела, как стекла, плавленый и кристаллический кварц) возникает излучение с очень широким непрерывным спектром, простирающимся на всю ширину спектра видимого излучения (отсюда название – суперконтинуум), и распространяющееся в том же направлении, что и лазерный пучок. Спектр этого излучения практически такой же, как и спектр лампы накаливания, но излучение имеет продолжительность не более длительности импульса, который его вызывает. С помощью соответствующей оптики (линза или вогнутое зеркало) его легко преобразовать в параллельный пучок.

Механизм генерации этого излучения можно пояснить, не останавливаясь на второстепенных деталях, следующим образом. В оптике известен эффект Доплера–Физо, заключающийся в изменении длины волны (частоты) света в зависимости от скорости движения источника света v по отношению к наблюдателю: $\lambda = \lambda_0 (1 \pm v/c)$, где λ_0 – длина волны источника, а c – скорость света в вакууме (плюс соответствует удалению, а минус – приближению источника по отношению к наблюдателю). Этот эффект широко используется в астрономии. Именно с его помощью определяются скорости движения звезд по смещению спектральных линий и было открыто явление разбегания галактик после Большого взрыва.

Рассмотрим схему мысленного эксперимента, изображенную на рисунке 57. Луч лазера с определенной длиной волны проходит через две стеклянные призмы и фиксируется наблюдателем. Пусть теперь одна из призм быстро смещается, как

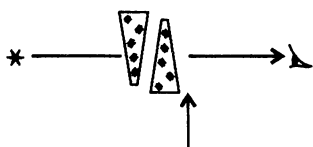


Рис.57. Схема мысленного эксперимента, поясняющая образование широкого спектра (суперконтинуума) при быстром изменении показателя преломления

показано на рисунке. Направление луча не меняется, но меняется оптическая длина пути (оптическая длина пути l в слое вещества с показателем преломления n в n раз больше длины того же слоя в воздухе). Изменение оптического пути во времени эквивалентно перемещению источника с соответствующей скоростью. В результате должна изменяться длина волны. Подчеркнем,

что важна именно скорость. Поэтому даже малые перемещения, но за короткое время вызовут изменение длины волны. Итак, пусть призма начинает двигаться в направлении, указанном стрелкой, затем останавливается и возвращается в первоначальное положение. На рисунке 58 показано, как меняется длина волны – точнее, частота – в результате такого движения призмы. Заметим, что изменение оптической длины пути означает изме-

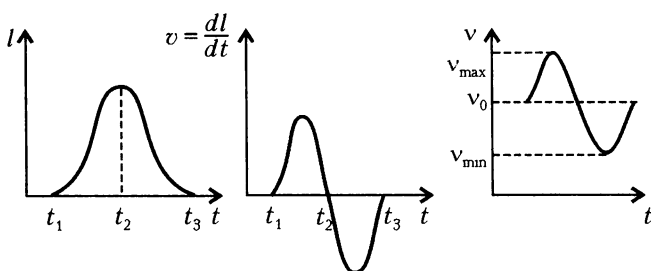


Рис.58. Изменение оптического пути, его скорости и частоты (длины волны) при движении одной из призм. Призма начинает движение в момент t_1 , достигает максимального перемещения в момент t_2 и возвращается в первоначальное положение в момент t_3

нение фазы световой волны, т.е. движение призмы осуществляет фазовую модуляцию. Она и является причиной изменения длины волны.

Теперь обратимся к нелинейным эффектам самовоздействия (см. главу 7). К ним относится эффект фазовой самомодуляции (ФСМ) лазерного излучения, которая обусловлена изменением показателя преломления в зависимости от интенсивности: $n = n_0 + n_2 I$ и играет важнейшую роль в формировании фемтосекундных импульсов.

Хотя само изменение показателя преломления невелико даже в случае фокусирования лазерного пучка, оно происходит за время не более чем длительность импульса, и поэтому скорость изменения может быть велика. Поясним это примером. Пусть импульс излучения фемтосекундного лазера (с усилителем) имеет энергию 10 мкДж при длительности 40 фс (пиковая мощность 0,25 ГВт – вполне реальное значение). При фокусировании в стеклянную пластинку линзой с фокусным расстоянием $F = 50$ мм интенсивность составит около $3 \cdot 10^{11}$ Вт/см². Для стекла n_2 равно приблизительно $4 \cdot 10^{-16}$ см²/Вт, и изменение показателя преломления будет порядка $1,2 \cdot 10^{-4}$. Область высокой интенсивности (перетяжка фокуса) занимает длину около 0,5 см. Следовательно, изменение оптической длины пути соста-

вит $(0,5 \cdot 1,2) \cdot 10^{-4}$ см. Это изменение происходит за время, меньшее половины длительности импульса. Отсюда получаем скорость «движения» $(0,6 \cdot 10^{-4}) / (2 \cdot 10^{-14}) = 3 \cdot 10^9$ см/с. Видно, что даже при сравнительно умеренных параметрах лазерного излучения скорость, входящая в формулу эффекта Доплера-Физо, может приближаться к скорости света. Это означает, что длина волны может изменяться почти в 2 раза, что и обуславливает огромную ширину спектра, простирающегося от ближнего ИК до ближнего УФ диапазона.

Итак, за счет эффекта фазовой самомодуляции длина волны может непрерывно изменяться в широкой области в пределах длительности импульса лазерного излучения (напомним, что этот эффект играет существенную роль в генерации УКИ в виде солитонов, правда в генераторе он не столь велик). В результате получается УКИ с очень широким непрерывным спектром. Значение этого специфического способа генерации излучения очень велико. Во-первых, можно выделить определенный участок спектра, совпадающий с полосой усиления какой-либо активной среды и, тем самым, получить лазер УКИ на новой длине волны. Во-вторых, излучение с широким непрерывным спектром можно использовать в спектроскопии с высоким временным разрешением, которая будет обсуждаться в следующем разделе.

Терагерцовые пучки. В интервале между диапазоном радиоволн и длинноволновой границей ИК диапазона лежат волны с частотой в области терагерц. Частоте 1 ТГц соответствует длина волны 300 мкм и период волны 1 пс. Важность этого диапазона обусловлена тем, что целый ряд физических и химических явлений связаны с соответствующими квантами энергии, в частности — явление сверхпроводимости. Исследования в этом диапазоне волн проводятся давно, они начались задолго до появления лазеров. Но их проведение сопряжено с большими трудностями, связанными как с самими источниками излучения, так и со способами его регистрации.

Естественно, что тепловые источники, обладающие широким спектром излучения, испускают и терагерцовые волны. Однако яркость таких источников, которая зависит от температуры, мала. При повышении температуры максимум спектра излучения сдвигается в сторону коротких волн — в соответствии с законом Вина. Таким образом, увеличение интенсивности в терагерцовой области за счет повышения температуры сопровождается еще большим увеличением интенсивности излучения в коротковолновой области. Это создает большие трудности при

регистрации терагерцового излучения. Дело в том, что обычно используются приемники, основанные на нагреве излучением: болометры и пироэлектрические приемники, а излучение в коротковолновой области создает сильный фон.

Терагерцовое излучение можно получить также радиотехническими методами, например с помощью лампы бегущей волны. Однако продвижение в сторону субмиллиметров требует миниатюризации, которая ограничена возможностями соответствующих технологий. Кроме того, такие источники работают только на вполне фиксированной длине волны. Это же относится и к лазерам, излучающим в дальнем ИК диапазоне (громоздкие лазеры на парах некоторых молекул).

Трудности, связанные с желанием иметь яркий источник терагерцового излучения в широкой области спектра и с возможностью плавной перестройки длины волны, а также чувствительный приемник, были в значительной мере преодолены за счет совершенно новой методики, основанной на использовании фемтосекундных лазеров. С их помощью удалось генерировать излучение в виде так называемых терагерцовых пучков.

Для генерации терагерцового излучения с помощью фемтосекундных лазеров используются либо явление фотопроводимости полупроводников, либо нелинейный эффект выпрямления света. При освещении полупроводника светом, энергия фотонов которого превосходит ширину запрещенной зоны, в нем рождаются носители тока (электроны и дырки), и проводимость резко увеличивается. С прекращением освещения эти носители уничтожаются за счет рекомбинации, и проводимость снова увеличивается до первоначального значения. Выбором сорта полупроводника и специальной обработкой его поверхности можно уменьшить время жизни носителей до долей пикосекунды. Таким образом, появляется возможность создать быстродействующий ключ электрического тока, управляемый лазерными УКИ. Он представляет собой щель между электродами, заполненную таким полупроводником (фотопроводником). Этот оптоэлектронный ключ с субпикосекундным быстродействием нашел применение в сверхбыстродействующей электронике.

С помощью такого ключа удается генерировать терагерцовое излучение в схеме, представляющей собой миниатюрный (доли миллиметра) диполь, подсоединенный к источнику электричества, между концами которого располагается вышеупомянутый ключ. При его замыкании диполь становится миниатюрной антенной (полуволновой вибратор), излучающей электромагнитные волны, причем максимальная энергия излучения сосре-

доточена на длине волны, вдвое превышающей длину диполя. Поскольку ток в антенне быстро затухает, электромагнитное излучение получается в виде очень короткого «всплеска» электрического поля с широким непрерывным спектром, соответствующим длительности излучения (рис.59). По существу, это миниатюрная реализация опытов Герца с заменой разрядника на

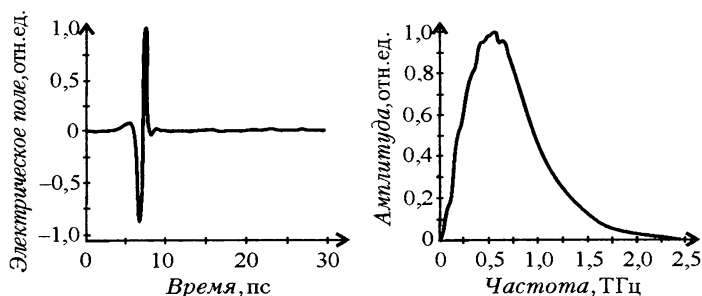


Рис.59. «Всплеск» электрического поля (а) и спектр терагерцового излучения (б)

оптоэлектронный ключ. Современная технология позволяет изготовить такой диполь с длиной в доли миллиметра. Соответственно, получается источник терагерцового излучения. Само излучение с помощью линзы и параболического зеркала можно преобразовать в параллельный пучок.

С использованием фотопроводимости можно генерировать терагерцовое излучение и без диполя. В этом случае фотопроводник помещается в промежуток между электродами с расстоянием между ними до 1 см. За счет сравнительно большого расстояния между электродами к ним можно приложить большее напряжение. При освещении фотопроводника в нем возникает ультракороткий импульс тока, который, в соответствии с законами электродинамики (уравнения Максвелла), порождает электромагнитные волны с частотами, определяемыми скоростью изменения тока. Таким образом, поверхность фотопроводника становится источником терагерцового излучения, энергия которого значительно больше, чем в случае миниатюрной антенны (за счет большего напряжения). При использовании усиленных фемтосекундных импульсов для освещения фотопроводника удавалось получать импульсы терагерцового излучения с энергией до 1 мкДж.

Еще один способ основан на нелинейном эффекте выпрямления света. Рассмотрение поляризации среды под действием

электрического поля световой волны, которая приводит к эффектам нелинейной оптики, показывает, что в некоторых нелинейных средах под действием мощной световой волны с постоянной интенсивностью возникает постоянная поляризация, величина которой определяется интенсивностью света. Эта постоянная поляризация, в свою очередь, приводит к появлению постоянного электрического поля в среде, через которую проходит лазерный пучок. На рисунке 60 показана схема эксперимента по регистрации такого электрического поля. Пусть излучение происходит в виде импульса. Поскольку наводимое электрическое

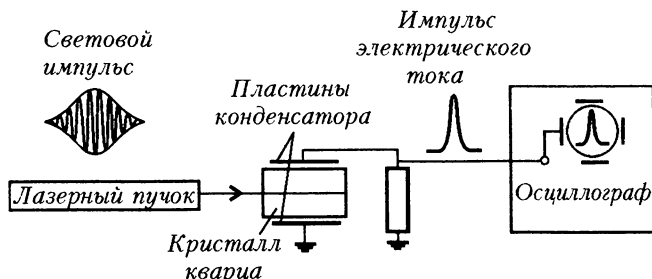


Рис.60. Схема эксперимента, в котором наблюдается оптическое детектирование

поле пропорционально интенсивности, оно будет иметь форму огибающей световой волны лазера. Это и есть, в терминах радиотехники, детектирование. Излучение, соответствующее изменению электрического поля в нелинейной среде, имеет широкий спектр с максимумом на частоте $\sim 1/\tau_{\text{имп}}$. Это означает, что с помощью существующих фемтосекундных лазеров можно генерировать частоты вплоть до 50 ТГц.

Важно отметить, что с помощью указанных способов терагерцовое излучение генерируется в виде импульсов, которые «привязаны» к лазерным импульсам. Это открывает возможность использовать для регистрации терагерцового излучения технику временного стробирования. Ее суть заключается в том, что приемник реагирует лишь на сигналы в определенном интервале времени (длительность строба). Тем самым отсекается фон, чем повышается чувствительность и точность регистрации сигналов. Техника стробирования с огромным успехом используется в радиолокации и телевидении, а также в научных приборах (синхронное детектирование). Такая регистрация является, по существу, когерентной (согласованной во времени).

Терагерцовое излучение, генерируемое с помощью фемтосекундного лазера, получается в виде импульса, имеющего ха-

ракторный вид, а именно – однопериодный «всплеск» напряженности электрического поля (не интенсивности!). Эту зависимость амплитуды электромагнитной волны от времени можно зарегистрировать следующим образом. В некоторых кристаллах под действием приложенного к ним электрического поля возникает двойное лучепреломление. Это – эффект Поккельса. Он наблюдается и при прохождении через такой кристалл терагерцового излучения. В этом случае двойное лучепреломление вызывает электрическое поле электромагнитной волны. Если в момент пропускания через кристалл терагерцового излучения через него проходит пучок света, то наводимое терагерцовым излучением двойное лучепреломление изменит поляризацию этого пучка. Измеряя это изменение, можно определить величину двойного лучепреломления и, следовательно, величину электрического поля. Если световой пучок состоит из ультракоротких импульсов, то величина электрического поля будет измеряться в интервале времени, равным длительности этих импульсов. Изменяя задержку оптических ультракоротких импульсов относительно импульса терагерцового излучения, можно по точкам определить форму волны электрического поля терагерцового излучения.

Соответствующая схема регистрации терагерцового излучения показана на рисунке 61. Пучок фемтосекундного лазера расщепляется на две части, импульсы в которых можно сдвигать

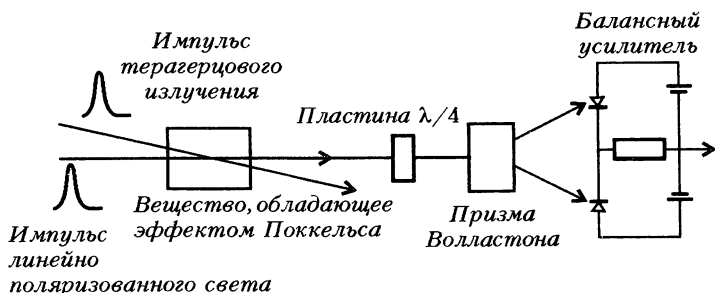


Рис.61. Принцип регистрации терагерцового излучения с помощью эффекта Поккельса

относительно друг друга с помощью регулируемой линии задержки. Излучение одной части возбуждает источник терагерцового излучения. Оно с помощью линзы и параболических зеркал преобразуется в параллельный пучок и фокусируется в кристалл, обладающий эффектом Поккельса. В этот же кристалл фокусируется и вторая часть пучка фемтосекундного лазера.

Обычно используется тонкий кристалл ZnTe, обладающий достаточно сильным эффектом Поккельса и в котором групповые скорости излучения фемтосекундного лазера (~ 800 нм) и терагерцового излучения не сильно различаются. Это означает, что оптический импульс и импульс терагерцового излучения совпадают на протяжении всей длины кристалла. Пучок фемтосекундного лазера после прохождения кристалла проходит пластинку $\lambda/4$ для получения двух ортогональных компонент поляризации. Эти компоненты разделяются в поляризационной призме Волластона, и каждая часть поступает на один из двух приемников, связанных с двухканальным усилителем. Из отношения сигналов определяется степень поляризации, которая пропорциональна величине электрического поля. Путем изменения величины задержки прописывается профиль изменения величины электрического поля (не интенсивности!). Именно с помощью такой методики регистрируется форма импульса терагерцового излучения, а с помощью Фурье-преобразования получается спектр. Отметим, что это, как и в случае суперконтинуума, — непрерывный и широкий спектр.

Спектроскопические измерения получают, помещая в пучок образец и сравнивая сигналы до образца и после его прохождения. После вычитания получается сигнал, характеризующий образец. С помощью Фурье-преобразования можно получить спектр поглощения, а также изменения фазы в зависимости от длины волны. Последнее означает зависимость коэффициента преломления от частоты, что часто оказывается не менее важным.

При поперечном перемещении образца в пучке можно получить «просвеченное» изображение в терагерцовом диапазоне. Разумеется, это изображение получается по точкам (пикселям). Но благодаря высокой частоте повторения фемтосекундных импульсов вышеописанные манипуляции можно проводить достаточно быстро и получать изображение в реальном масштабе времени. Высокая стабильность фемтосекундных лазеров обеспечивает высокую чувствительность и точность регистрации. Изображение в терагерцовых лучах имеет важное практическое применение. Так, удастся исследовать внутренность предметов, полностью прозрачных в рентгеновских лучах, например изделий из пластмассы. Приборы, построенные на этом принципе, уже начинают использовать в контрольных пунктах аэропортов наряду с рентгеновской аппаратурой.

Генерация гармоник высшего порядка (вплоть до мягкого рентгена). Аттосекундные импульсы. Лазерные системы с усилением фемтосекундных импульсов и фокусированием ла-

зерного пучка позволяют генерировать коротковолновое, вплоть до мягкого рентгена, излучение. Сверхвысокая интенсивность лазерного излучения качественно меняет характер нелинейной поляризации вещества. Происходит не просто деформация электронных оболочек атома, а отрыв электронов (ионизация) с последующим возвращением электрона в ион с восстановлением атома (рекомбинация) и с испусканием фотона. Рассмотрим более подробно этот процесс.

В атоме внешний электрон удерживается электрическим полем ядра. Сила определяется законом Кулона, и электрон находится в потенциальной яме, форма которой определяется зависимостью силы (напряженности поля) от расстояния. При облучении атомов интенсивным лазерным излучением на внешний электрон действуют два электрических поля – кулоновское поле атомного ядра и внешнее поле световой волны. При сложении этих двух полей возникает иной потенциальный барьер. Чем больше внешнее поле, тем ниже и уже этот барьер. В отличие от кулоновского поля, этот барьер возникает и изменяет свою форму в соответствии с изменением электрического поля в световой волне.

Интересно проследить последовательные стадии поведения электрона за время периода световой волны в максимуме лазерного импульса.

При увеличении напряженности лазерного поля возникает барьер, высота и ширина которого уменьшаются. Наступает момент, когда электрон с некоторой вероятностью, зависящей от формы барьера, покидает атом и начинает движение под действием двух противоположных сил: ускоряющей силы внешнего поля и удерживающей силы кулоновского поля атомного ядра. Причем сила внешнего поля нарастает, а удерживающая сила ослабевает. Из-за малой продолжительности действия внешнего поля (менее полупериода световой волны) электрон не успевает значительно удалиться от «родительского» атома, превращенного в ион. При изменении направления внешнего поля, в следующий полупериод, на электрон уже станут действовать обе силы, возвращающие электрон к родительскому атому. Причем кулоновская сила и сила внешнего поля возрастают по мере приближения к атому. Это приводит к существенному увеличению кинетической энергии электрона, ускоренного этими силами. При соударении ускоренного электрона получается квант жесткого излучения, максимальная энергия которого равна кинетической энергии электрона (подобно тому, как это получается в рентгеновской трубке). Расчеты показывают, что максимальная

энергия кванта, испускаемая при возвратном соударении электрона с атомом, определяется формулой $h\nu_{\text{макс}} = 3,2W_{\text{кол}} + W_{\text{ион}}$, где $W_{\text{кол}}$ – средняя энергия колебательного движения, которую электрон набирает в электрическом поле световой волны ($W_{\text{кол}} \sim \bar{E}^2 \lambda^2$, где \bar{E} – максимальная напряженность лазерного поля, λ – длина волны), а $W_{\text{ион}}$ – энергия ионизации электрона в атоме.

В объеме, где интенсивность света достаточно велика (область фокуса), находится много атомов, и с каждым из них такой процесс будет происходить синхронно с изменением поля в световой волне. Таким образом, световая волна лазера фазирует испускание квантов излучения многими атомами. Кроме того, в лазерном импульсе содержатся, по крайней мере, несколько периодов. Поэтому вышеописанный процесс получается с изменяющимся максимумом лазерного поля. Это приводит к тому, что происходит когерентное испускание целого набора линий коротковолнового излучения в виде нечетных (условие симметрии при нелинейном взаимодействии с изотропной средой) гармоник излучения лазера, причем номер гармоники может приближаться к трем сотням (высшие гармоники).

В одном из экспериментов использовалось лазерное излучение со следующими параметрами: длина волны 800 нм, энергия импульса 20 мДж, длительность импульса 26 фс. Оно фокусировалось в струю гелия, вытекающую в вакуум. В результате получалось излучение в виде набора высших гармоник, причем минимальная длина волны излучения составляла 2,7 нм. Поскольку процесс испускания коротковолнового излучения происходит за доли периода лазерной волны, продолжительность испускания излучения может составлять менее 1 фс. Тем самым, открывается возможность получения излучения в виде импульсов аттосекундной длительности. Следует заметить, что вероятность возвращения электрона и столкновения с родительским атомом невелика, поэтому мала и эффективность генерации такого коротковолнового излучения. Обычно само коротковолновое излучение состоит из десятков-сотен квантов на импульс. Тем не менее, современная техника позволяет уверенно регистрировать такие импульсы и даже измерять их длительность корреляционными методами, используя контролируемые задержки лазерного импульса и испускаемого излучения. Например, в диапазоне 13,0–14,2 нм была измерена длительность 200 ас. Таким образом, лазеры мощных фемтосекундных импульсов позволяют получать импульсы электромагнитных волн уже в аттосекундном диапазоне длительности

импульса, правда с длиной волны в диапазоне на границе УФ и рентгеновского излучения.

Поскольку пиковая мощность лазерного излучения возрастает при сокращении длительности импульса, стремятся сократить ее до предела. Современные лазерные системы допускают мощные импульсы длительностью не более 1,5 периода волны. Это приводит к существенным особенностям. При обсуждении механизма генерации коротковолнового излучения мы рассматривали всего лишь один период волны с максимальной амплитудой. На самом деле импульс хоть и приближается к одному периоду, но его форма определяется несущей частотой и огибающей (рис.62), т.е. в волне не сразу достигается максимальная амплитуда электрического поля. При сравнительно большой длитель-

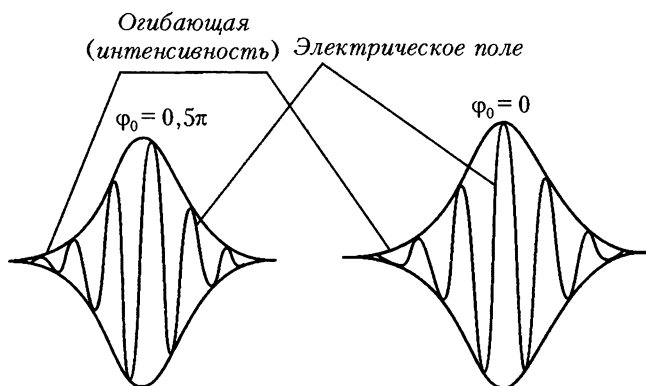


Рис.62. Формы импульсов с длительностью не более нескольких периодов световой волны с разными сдвигами фаз между огибающей и несущей частотой

ности импульса (большей десятка периодов) к тому моменту, когда амплитуда электрического поля в волне достигнет максимума, большинство атомов будет ионизовано, и для взаимодействия, описанного выше, просто не останется атомов. Поэтому необходима как можно меньшая длительность импульса. При этом становится важным сдвиг фаз между несущей частотой и огибающей. От него зависит быстрота увеличения амплитуды электрического поля и ее максимальное значение при одной и той же огибающей (длительности импульса). Для иллюстрации этого на рисунке 63 показаны формы импульсов с длительностью, равной периоду несущей частоты, построенные с помощью компьютера. Видно, что величина максимальной амплитуды

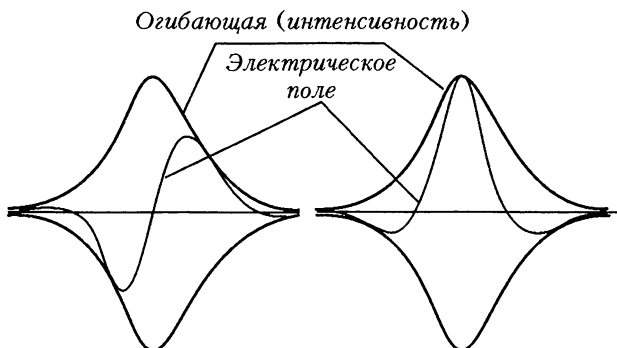


Рис.63. Компьютерное моделирование импульса длительностью в один период несущей частоты

поля существенно зависит от сдвига фаз. Оказалось, что этот сдвиг можно контролировать и изменять (детали этого будут обсуждены позже).

Методики с высоким временным разрешением

Лазеры ультракоротких импульсов позволили проводить исследования различных быстро протекающих процессов и явлений с исключительно высоким временным разрешением. Обычно такие исследования проводятся по схеме «возбуждение-зондирование». На образец направляется излучение в виде ультракороткого импульса – УКИ. За время его длительности происходит быстрое возбуждение вещества исследуемого образца. В нем создается определенная концентрация короткоживущих образований (радикалы молекул, новые модификации вещества, возбужденные состояния атомов, молекул и твердых тел и др.). После прекращения воздействия эти объекты исследования возвращаются в первоначальное равновесное состояние, иногда с появлением промежуточных образований, за характерное время релаксации. Определение времен появления новых образований и их релаксации и является целью измерений, поскольку знание этих времен позволяет судить о природе исследуемого процесса.

Если оптические свойства объекта исследования, подвергнутого воздействию излучением УКИ, отличаются от оптических свойств в его конечном состоянии, то по изменению этих свойств во времени можно судить о скорости образования нового продукта и его релаксации. Такими характерными оптическими свойствами могут быть, например, спектры поглощения, спектры

ры спонтанного излучения, двойное лучепреломление, нелинейная восприимчивость (ответственная за эффективность генерации гармоник). Пропуская через образец излучение в виде второго УКИ, т.е. зондируя его, можно зафиксировать эти характерные измененные оптические свойства, естественно, в интервале времени, равном длительности зондирующего импульса. Изменяя задержку (интервал времени) между возбуждающим и зондирующим импульсами, можно определить, как происходит во времени изменение оптических свойств возбужденного состояния. По существу, получается съемка моментов быстротекущего процесса. Только снимается не изображение, а физические изменения в исследуемом веществе. Временное разрешение этой методики определяется максимальной длительностью импульсов, которые используются для возбуждения и зондирования.

В том случае, когда по спектрам поглощения исследуется быстрая фотохимическая реакция, получается хорошо известная схема флэш-фотолиза. Она была осуществлена еще до появления лазеров. В качестве источников возбуждающего и зондирующего излучения использовались импульсные лампы, такие же, какие использовались для мгновенного фотографирования, отсюда и название методики: английское название этих ламп *flash lamp*. Длительность импульса таких ламп может составлять несколько микросекунд, поэтому временное разрешение ограничивалось этим временем. Появление лазеров УКИ дало возможность довести временное разрешение этой методики до пикосекунд и даже фемтосекунд.

Схема «возбуждение-зондирование» (рис.64), по которой проводятся такие исследования, осуществляется следующим образом. Пучок излучения в виде УКИ расщепляется на две части. Импульсы одной части используются для возбуждения

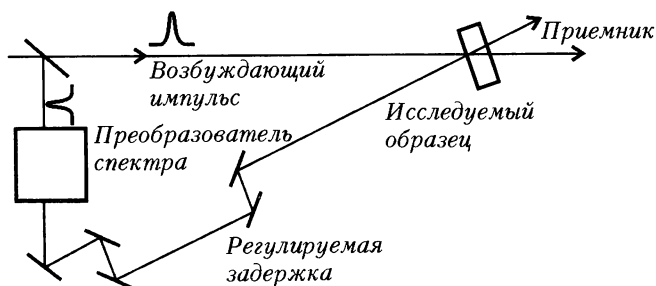


Рис.64. Схема «возбуждение-зондирование»

вещества в образце. Если требуется, длину волны можно изменить путем нелинейного преобразования. Другая часть проходит систему зеркал для обеспечения контролируемой задержки импульса. Спектр излучения этой части также можно изменить с помощью нелинейных преобразований. Обычно зондирование осуществляется по спектрам поглощения, т.е. используется абсорбционная спектроскопия в ИК, в видимом и в УФ областях спектра. Для снятия спектров используется источник с широким непрерывным спектром, излучение которого проходит через исследуемый образец. С помощью спектрометра получается спектр полос поглощения. Для получения высокого временного разрешения нужно излучение с широким спектром в виде УКИ. Поэтому используется излучение суперконтинуума, которое получается при фокусировании лазерного УКИ в слой прозрачного вещества. В нем, как было указано выше, излучение суперконтинуума возникает за счет ФСМ.

На основе этой методики возникло целое научное направление – пикосекундная и фемтосекундная спектроскопия. С ее помощью были исследованы многочисленные сверхбыстрые явления в газах, жидкостях, полупроводниках. Сверхвысокое временное разрешение дает принципиальную возможность детального изучения начальных процессов некоторых фотохимических реакций, которые протекают за времена десятков и сотен фемтосекунд. В частности, были изучены быстрые стадии процесса фотосинтеза (преобразование в листьях растений и некоторых бактерий воды и углекислого газа в вещества типа крахмала под действием солнечного излучения).

Благодаря высокой пиковой мощности лазерных УКИ можно с помощью такой техники исследовать сверхбыстрые явления не только по спектрам поглощения, но и по спектрам излучения, спектрам комбинационного рассеяния и по проявлению веществом нелинейных свойств (например, генерации гармоник). В последнее время проводятся исследования с использованием аттосекундных импульсов, в частности сверхбыстрые процессы на поверхностях твердых тел. Предполагается, что эти исследования могут существенно увеличить быстродействие электронных систем.

Использование методики «возбуждение-зондирование» дает возможность не только непосредственно проследить, как протекают некоторые фотохимические реакции, но и управлять некоторыми из таких реакций путем «вмешательства» в ход реакции на начальном этапе. Это можно сделать с помощью дополнительного возбуждения вещества на стадии протекания быстрой

химической реакции с использованием фемтосекундного импульса с определенными спектральными характеристиками.

Во время протекания химической реакции молекулярная система по пути от начальных реагентов до конечных продуктов проходит через некоторые промежуточные структуры, которые уже нельзя относить к начальным реагентам, но еще нельзя относить и к продуктам. Продолжительность этой промежуточной стадии больше 100 фс. Обычные эксперименты по кинетике химических реакций не давали полной информации об этой стадии, и теоретики пытаются описывать динамику в переходной стадии по данным о кинетике реагентов и продуктов. Однако часто это не удается сделать. Характерная длительность импульса фемтосекундного лазера намного меньше времени протекания даже самых быстрых химических реакций. За такой промежуток времени ядра в молекулах практически не изменяют своего положения. Поэтому можно шаг за шагом проследить весь ход фотохимической реакции: определить строение переходного комплекса в разные моменты времени, т.е. проследить динамику его образования из исходных веществ и распада на конечные продукты реакции. Знание динамики реакции дает принципиальную возможность управлять ею.

Фемтосекундная длительность импульса имеет еще одну важную особенность. Спектр энергетических состояний молекул включает колебательные уровни, причем они практически отличаются друг от друга на постоянную величину. Каждому уровню соответствует своя волновая функция. Ширина спектра излучения фемтосекундного лазера настолько велика, что при воздействии на молекулу сразу возбуждаются несколько колебательных уровней. В результате получается так называемый когерентный колебательный волновой пакет, который образуется при сложении волновых функций, каждая из которых имеет определенную амплитуду и фазу стационарных состояний. По существу, этот пакет получается в результате Фурье-преобразования. Как обсуждалось выше, ультракороткий лазерный импульс также получается в результате сложения многих волн, и он тоже является волновым пакетом. Фурье-преобразование, приводящее к образованию конкретного волнового пакета, можно осуществить либо подбирая нужные фазы при одинаковых амплитудах (так осуществляется синхронизация мод), либо подбирая нужные амплитуды (так поступают в математике, разлагая периодическую функцию в ряд Фурье). Аналогичным образом можно создать волновой пакет колебательных состояний молекулы, используя ультракороткий импульс лазерного излучения

определенной формы. Для этого нужно сложить волны уже не с одинаковыми фазами, а с фазами, нужными для образования требуемого пакета.

Практически это делается по следующей схеме. Фемтосекундный импульс направляется на дифракционную решетку, которая разлагает излучение в спектр. С помощью линзы получается широкий пучок, в котором частота излучения меняется по ширине пучка. В него вводится маска – прозрачная пластина, в которой по сечению изменяется оптическая толщина. Тем самым, по сечению пучка изменяется фаза волны. В результате получаются частоты с нужными фазами. Затем с помощью второй линзы и второй дифракционной решетки излучение снова сводится в пучок. В нем, однако, волны разной частоты уже не будут иметь одинаковые фазы, как в первоначальном импульсе. Напротив, они будут такими, какие нужны для формирования когерентного волнового пакета состояний молекулы. Очевидно, что лазерный импульс на выходе такой оптической системы будет иметь сложную форму с фемтосекундной структурой.

Молекулы в разных колебательных пакетах могут по разному пути проходить промежуточную стадию химической реакции. В результате появляется принципиальная возможность управлять выходом продуктов реакции, создавая с помощью излучения фемтосекундных лазеров те или иные пакеты. Это называют квантовым, или когерентным управлением химической реакции, а также фемтохимией. За работы в этой области американский ученый египетского происхождения А.Зевайл был удостоен Нобелевской премии по химии.

Спектральные особенности лазерного излучения

Сверхузкие линии. Исключительной особенностью как мазера, так и лазера является высокая монохроматичность излучения. С самого начала возникло стремление получить на их основе источник предельно монохроматического излучения, спектр которого представлял бы очень узкую спектральную линию. С другой стороны, было стремление получить лазерное излучение в виде коротких и мощных импульсов. Замечательным фактом является то, что достижения в этих областях можно характеризовать одним и тем же «знаком качества», а именно 15-й степенью числа 10. Так, 1 фс, к которой приблизилась длительность импульса, это 10^{-15} с. С другой стороны, достигнута ширина спектра, не превышающая 1 Гц, что означает примерно (10^{-15}) -ю часть от частоты излучения. Мощность в импульсе, как мы видели, достигает 1 ПВт, т.е. 10^{15} Вт.

Стремление получать лазерное излучение с высокой монохроматичностью крайне важно для повышения разрешающей способности спектроскопических исследований и, стало быть, повышения точности измерений. За последнее столетие спектроскопические исследования дали огромную информацию о строении атомов и молекул, основных «кирпичиков» нашей Вселенной. По мере того как увеличивалось разрешение спектроскопических методик, ученые получали возможность измерять и объяснять все более тонкие и сверхтонкие структуры спектров. Изучения спектров привели к созданию и развитию квантовой теории, открытию спина электрона, обнаружению и измерению лэмбовского сдвига, что способствовало развитию квантовой электродинамики.

Крайне узкие линии лазерного излучения способствовали беспрецедентному увеличению разрешающей способности и точности спектральных измерений. Подробно успехи в этой области мы рассмотрим позже. Здесь же отметим, что предельно узкая линия лазерного излучения позволяет создавать интерферометры для прецизионного измерения длины. В частности, на основе таких интерферометров создаются уникальные установки, которые используются для поиска гравитационных волн. Создана уникальная установка LIGO – Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory, которая обладает способностью зафиксировать изменение длины в сотую часть диаметра протона на длине футбольного поля!

Лазеры с плавной перестраиваемым монохроматическим излучением используются для особого воздействия на атомы в разреженном газе. При поглощении и испускании фотона атом испытывает изменение механического момента (эффект давления света при поглощении и отдачи при испускании фотона). При этом частота света несколько изменяется за счет эффекта Доплера. Несмотря на малую величину этого изменения, лазеры позволяют определять ее и путем точного изменения частоты воздействовать на атом, сообщая ему контролируемое движение. В результате можно добиться практически полной остановки отдельных атомов в ловушке, образованной пучками лазеров. Это означает, что температура (напомним, что она определяет беспорядочные скорости атомов и молекул) снижается почти до нуля. Этот эффект был предсказан и продемонстрирован экспериментально в 1979 году учеными из Института спектроскопии РАН В.С.Летоховым, В.Г.Миногиным и В.И.Балыкиным. На его основе был разработан эффективный способ замедления и уменьшения тепловых движений атомов и, тем самым, охлажде-

ния с помощью лазерного света. Используя перекрестие шести лазерных пучков, удается удерживать атомы в такой световой ловушке. Как известно, температура отсчитывается от абсолютного нуля (0 К), и ученые, занимающиеся физикой низких температур, стремятся как можно ближе приблизиться к абсолютному нулю. Метод охлаждения атомов в лазерных ловушках позволил в 1995 году снизить температуру до 2–3 мК. За разработку методов охлаждения атомов с помощью лазерного света С.Чу, К.Коэн-Таннуджи и У.Филипс получили в 1997 году Нобелевскую премию по физике. Столь низкие температуры приводят к новому состоянию вещества – так называемому конденсату Бозе–Эйнштейна. За получение этого конденсата и изучение его свойств Э.Корнелл, В.Кеттерле и К.Виман были в 2001 году удостоены Нобелевской премии по физике. В настоящее время удается получать температуру, превышающую абсолютный ноль всего лишь на 10^{-9} К! Таким образом, на вопрос, где самая низкая температура во Вселенной, следует отвечать, что не в глубинах космоса, а в лабораториях, где исследуют охлаждение вещества с помощью лазеров.

Спектроскопия во временной области. Использование источников терагерцового излучения, получаемого с помощью фемтосекундных лазеров и приемников, основанных на принципе временного стробирования, что обсуждалось выше, привело к разработке принципиально нового типа спектроскопии. В самом общем виде спектроскопия занимается изучением спектров, т. е. зависимостью интенсивности электромагнитных волн от длины волны (частоты). Применение принципа временного стробирования позволяет, как было показано, получать зависимости амплитуды электромагнитных волн от времени (отсюда название – спектроскопия во временной области). Изменение амплитуды в зависимости от времени дает возможность определять и фазу. Зная зависимость амплитуды от времени, можно с помощью преобразования Фурье получить и зависимость амплитуды от частоты. А поскольку интенсивность электромагнитной волны определяется квадратом амплитуды, то из такой зависимости легко получить и обычный спектр. Такая спектроскопическая методика называется Фурье-спектроскопией. Таким образом, информация об изменении амплитуды во времени дает полную информацию о спектре, т.е. об изменении интенсивности по частоте. Обратное утверждение, вообще говоря, неверно. Информация об изменении интенсивности от частоты не дает полной информации об изменении амплитуды во времени, поскольку интенсивность определяется среднеквад-

ратичным значением амплитуды (при его вычислении теряется информация о фазе). Иными словами, такая Фурье-спектроскопия во временной области может давать больше информации, чем обычная спектроскопия. Такую спектроскопию и удается осуществить в диапазоне терагерц и использовать ее, в частности, для изучения явления сверхпроводимости.

Оптическая когерентная томография. Высокая монохроматичность означает высокую степень временной когерентности. Но, как было указано выше, лазеры позволяют получать направленное излучение (высокая степень пространственной когерентности) с очень широким спектром (низкая степень временной когерентности). С использованием излучения с минимальной временной когерентностью связано важное применение – оптическая когерентная томография, которая позволяет получать изображения в сильно рассеивающих средах. Принцип ее аналогичен ультразвуковой интроскопии, широко применяемой в медицине (УЗИ-диагностика).

Суть методики заключается в том, что рассеянное объектом излучение интерферирует с опорным излучением. Интерференция получается лишь в пределах временной когерентности τ , которой соответствует длина когерентности $\Delta l = c\tau$ (c – скорость излучения в среде). Приемник регистрирует лишь то излучение, которое испытало интерференцию. Изменяя временную задержку между отраженным и опорным излучением, можно получать изображение слоя с толщиной, определяемой длиной когерентности, из разной глубины объекта. Отсюда название методики: томография (от греческого *томос* – слой). Чем меньше толщина слоя, тем выше пространственное разрешение. В процессе исследования объекта задержка непрерывно сканируется, и отраженные сигналы обрабатываются компьютером с выводом на дисплей. Интерференция позволяет выделить отраженный сигнал на сильном фоне рассеянного излучения. С помощью сканирования и обработки сигналов строятся изображения слоев объекта. Подчеркнем, что получается не реальное изображение, а изображение, получаемое из обработки сигналов. Современные компьютеры позволяют производить такую обработку достаточно быстро и получать изображение в реальном масштабе времени.

Благодаря использованию оптического излучения можно повысить пространственное разрешение до нескольких длин волн. Правда, сильное рассеяние света в биотканях не позволяет получать изображение на глубину, превышающую 2–3 мм, но даже при таком ограничении эта техника оказывается полезной для медицины.

Обычно в оптической когерентной томографии в качестве источника излучения используют полупроводниковые суперлюминесцентные диоды (это не лазеры, а источники усиленного спонтанного излучения). Ширина спектра (временная когерентность) ограничивает пространственное разрешение десятками микрометров. При использовании излучения суперконтинуума, генерируемого с помощью фемтосекундного лазера, удается улучшить разрешение до 1,5 мкм и увеличить чувствительность за счет увеличения яркости. В результате получаются изображения клеток биологических тканей с пространственным разрешением, близким к пределу оптической микроскопии, но из глубины сильно рассеивающей ткани. Был создан инструмент, позволяющий наблюдать клетки ткани непосредственно в процессе хирургической операции. Разрешение методики позволяет видеть ядра клеток и различать здоровые и злокачественные клетки, т.е. проводить биопсию непосредственно в процессе операции.

Сверхвысокая скорость передачи информации. Поскольку лазер является генератором электромагнитных волн очень высокой частоты ($10^{14} - 10^{15}$ Гц), очевидно, что полоса частот модуляции для передачи сигналов также велика. Простые оценки показывали, что можно одновременно передавать тысячи телевизионных каналов. Правда при этом умалчивались принципиальные проблемы модуляции, демодуляции и разделения каналов. В самом начале работ с лазерами была осуществлена демонстрация возможности связи по лучу He-Ne лазера. С этой связью была построена телефонная линия между башнями двух высотных зданий в Москве. Несмотря на успешную работу, это была лишь демонстрация, и эта линия по всем показателям уступала стандартной радиорелейной линии. Очевидным недостатком была сильная зависимость от погодных условий.

Развитие лазерной связи пошло по другому пути, не связанному с высокой направленностью лазерного пучка. Этот путь — системы волоконно-оптической связи. Благодаря использованию высококачественных одномодовых оптических волокон и миниатюрных полупроводниковых лазеров осуществляются линии волоконно-оптической связи со спектральным уплотнением каналов, которое называется мультиплексированием.

Уплотнение сигналов достигается путем использования каналов на разных длинах волн, по которым передаются короткие сигналы. Это позволяет параллельно передавать по одному волокну большое число каналов, каждый для своей оптической частоты (длины волны). Для этой цели используется набор

лазеров (обычно полупроводниковые миниатюрные лазеры), каждый из которых работает на своей частоте. Для того чтобы не создавать помех в соседних каналах, эти частоты разносятся на несколько гигагерц. В принципе, одно волокно способно пропустить тысячи каналов, что позволяет передавать информацию со скоростью около 1 Тбит/с. В настоящее время земной шар буквально опутан линиями волоконно-оптической связи, и они являются важнейшей частью Интернета.

Однако дальнейшее увеличение скорости передачи информации таким способом затруднено из-за необходимости большого количества лазеров-передатчиков. Это ограничение можно преодолеть, если использовать лазеры УКИ непрерывного действия. Как уже отмечалось, спектр такого лазера представляет собой гребенку частот, которые и являются каналами передачи информации. Таким образом, один такой лазер способен заменить многие лазеры-передатчики. Малая длительность импульсов позволяет увеличить тактовую частоту. Эту идею успешно реализовали японские инженеры, используя полупроводниковые лазеры, работающие в режиме синхронизации мод. В результате удалось продемонстрировать линию связи, способную передавать информацию со скоростью до 1 Пбит/с.

Сверхбыстрая электроника

Описанную выше методику оптоэлектронного стробирования, применяемую для регистрации терагерцового излучения, можно использовать и в разработках быстродействующей электроники. Стремление к миниатюризации и повышению быстродействия электронных схем приводит к интегральным схемам. При этом становится трудно исследовать прохождение коротких электрических сигналов по элементам схемы с помощью электронного осциллографа из-за искажений сигналов в контактах и проводах, подводящих к схеме. Лазеры фемтосекундных импульсов позволили успешно реализовать схему бесконтактного осциллографирования электрических сигналов с разрешением лучше 1 пс.

В ней используется описанный выше оптоэлектронный ключ, с помощью которого запускается исследуемая схема, и электрооптический пробник напряжений, основанный на эффекте Поккельса, также описанный выше. Принципиальная схема стробоскопического оптоэлектронного осциллографа такова. В качестве бесконтактного пробника используется очень маленький кристалл танталата лития. Пробник тесно, но не касаясь (без соприкосновения), подводится к точке схемы, в которой хотят

измерить форму электрического сигнала. Излучение импульсов фемтосекундного лазера проходит через этот кристалл сверху и отражается от его дна, на котором нанесено диэлектрическое отражающее покрытие. Изменяя задержку между запуском микросхемы и приходом фемтосекундного импульса на пробник, можно по точкам зарегистрировать форму электрического импульса в данной точке микросхемы. Так как запуск исследуемой микросхемы (через оптоэлектронный ключ) и регистрация сигнала с пробника осуществляются от одного первоначального лазерного УКИ, практически исключается «дрожание» сигнала относительно запуска. Это позволяет достаточно точно и с высокой чувствительностью зарегистрировать форму электрического сигнала.

Сверхвысокие интенсивности и сверхсильные электромагнитные поля

Фокусирование излучения усиленных фемтосекундных импульсов приводит к сверхвысокой интенсивности и к сверхсильным электромагнитным полям. Используя для фокусирования параболическое зеркало, можно получить своеобразные «световые пули» микронных размеров и, соответственно, новые режимы взаимодействия лазерного излучения с веществом. Очевидно, что при этом речь идет, главным образом, о взаимодействии с плазмой, поскольку напряженность электрического поля в световой волне превосходит ту, что удерживает электроны в атоме.

Особенности режима взаимодействия обусловлены следующими обстоятельствами. Прежде всего, это сама по себе длительность взаимодействия – менее 100 фс, которая короче любых гидродинамических движений плазмы. Второе – огромные электрические и магнитные поля. При интенсивностях 10^{21} Вт/см², достижимых в настоящее время, напряженность электрического поля возрастает до 10^{12} В/см, что более чем в 100 раз превышает атомное поле ($5 \cdot 10^9$ В/см – величина кулоновского поля в модели Бора атома водорода). Третье – гигантская плотность энергии, достигающая $3 \cdot 10^{10}$ Дж/см³, чему соответствует температура абсолютно черного тела в 100 миллионов градусов. Это – величины, характерные для ядерного взрыва. Наконец, скорости электрона в таком сильном поле могут приближаться к скорости света, что радикально меняет характер взаимодействия электромагнитной волны с электронами.

В классической оптике при взаимодействии света с веществом электроны при своих колебаниях в электрическом поле электро-

магнитной волны приобретают скорости, существенно меньшие по сравнению со скоростью света, и их движение подчиняется законам классической механики (масса не зависит от скорости). При высоких интенсивностях ситуация иная. Масса электрона m , движущегося со скоростью v , изменяется согласно формуле $m = m_0\gamma$, где m_0 – масса покоя электрона, а $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ – так называемый лоренцовый фактор.

Как известно, на заряд, движущийся в магнитном поле, действует сила Лоренца $\vec{F} = [v\vec{B}]$, где \vec{B} – индукция магнитного поля. В классической оптике эта сила практически не проявляется, так как скорости электронов в электрическом поле световой волны много меньше c . Но при высоких интенсивностях света эта сила начинает проявляться, и электрон уже совершает не только колебательное движение вдоль вектора электрического поля, но и приобретает движение вдоль распространения световой волны. Таким образом, возникает новый режим взаимодействия света с веществом, известный как релятивистская оптика. Этот режим приводит к некоторым важным применениям лазеров, генерирующих ультракороткие сверхмощные импульсы.

Ускорение электронов. Одним из способов использования релятивистской силы сверхинтенсивного лазерного излучения является ускорение электронов. Сверхсильные электрические поля световой волны не годятся для направленного ускорения электронов, поскольку в этом случае можно получить лишь колебательное движение поперек распространения волны. Однако в режиме релятивистской оптики, как мы видим, уже начинает играть роль сила магнитного поля, которая дает электрону огромный импульс в направлении светового пучка. На этом эффекте были продемонстрированы схемы принципиально новых ускорителей электронов.

В экспериментах используется струя газа в вакууме и в эту струю фокусируется мощное лазерное излучение в виде ультракоротких импульсов. Благодаря этому плазма образуется лишь в области фокуса. Тем самым, устраняется сильное поглощение. Известно, что поглощение электромагнитных волн сильно зависит от плотности плазмы, а именно, с определенной длиной волны связано значение плотности (критическая плотность), ниже которого поглощение достаточно мало. Использование струи позволяет получить плазму с плотностью ниже критической.

В плазме релятивистская световая волна толкает силой Лоренца электроны вперед, в то время как значительно более

тяжелые ионы не успевают за ними. Возникает разделение зарядов с соответствующим квазистатическим очень сильным электрическим полем. Это, в определенном смысле, можно рассматривать как оптическое выпрямление по аналогии с эффектом, который обсуждался в разделе, посвященном терагерцовым пучкам. При интенсивности 10^{18} Вт/см² это электрическое поле может достигать порядка 10^{10} Вт/см². При перемене знака поля волны электроны проскакивают положение равновесия. Таким образом возникает плазменная волна, которая следует за лазерным импульсом. Высокое электрическое поле в этой попутной, или «кильватерной», волне ускоряет электроны до высоких энергий в лазерном импульсе точно так же, как ускоряются дельфины, плывущие в фазе с водяной волной позади корабля (отсюда название – кильватерное ускорение). На таком принципе было продемонстрировано ускорение электронов до энергий 50 МэВ, причем оно получалось на длине около миллиметра.

Генерация жесткого рентгеновского и γ -излучений. Импульсы излучения с еще меньшей длиной волны (жесткое рентгеновское излучение), чем та, что получается при генерации высших гармоник, можно получить при взаимодействии фемтосекундных импульсов с ускоренными электронами. Свет может рассеиваться на электронах без изменения длины волны. Это – томпсоновское рассеяние. Поскольку фотоны обладают импульсом, при их рассеянии на движущихся электронах они могут приобрести дополнительный импульс от электрона с изменением (сокращением) длины волны. Это рассеяние называется комптоновским рассеянием. Таким образом, при взаимодействии света с пучками ускоренных электронов можно получить излучение с короткой длиной волны. Для измерения энергии электронов обычно используют единица эВ – энергия, которую электрон приобретает, под действием электрического потенциала в 1 В. Современные ускорители позволяют получать электроны с энергией до 50 ГэВ. Это так называемые ультрарелятивистские электроны, движущиеся со скоростью (v), близкой к скорости света (c). Согласно теории относительности, энергия электрона с массой покоя m_0 составляет $E = m_0 c^2 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$. Ультрарелятивистские электроны обладают энергией, много большей энергии покоя электрона $m_0 c^2 = 0,5$ МэВ.

При передаче импульса ультрарелятивистского электрона рассеянному фотону он приобретает энергию в десятки ГэВ, превращаясь в γ -кванты. В ускорителях получают сгустки электронов, или «банчи». Если на такой сгусток сфокусировать

лазерный пучок (рис.65) и обеспечить совпадение в пространстве и во времени, то фотоны, рассеянные электронами в направлении своего движения, превратятся в γ -кванты с энергией в десятки ГэВ. Число таких квантов зависит от числа

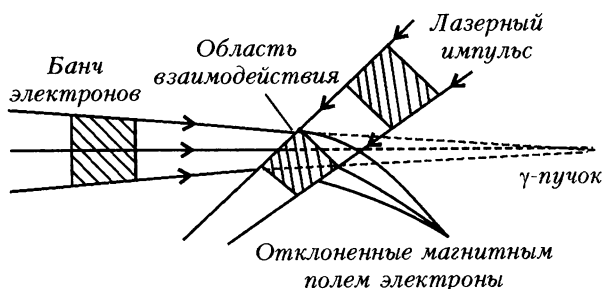


Рис.65. Схема получения направленного пучка γ -квантов

лазерных квантов, которые испытали взаимодействие с электронами, поэтому требуется УКИ с достаточно большой энергией (несколько мДж). Такой эксперимент был осуществлен американскими учеными на уникальном ускорителе электронов SLAC (Stanford Linear Accelerator Center), который позволяет получать электроны до энергии 50 ГэВ. Этот эксперимент продемонстрировал возможность получения направленных пучков γ -излучения с энергиями до 30 ГэВ.

Подчеркнем, что его осуществление стало возможным в результате генерации лазерных УКИ. Причем параметры лазера были отнюдь не рекордные ($3 \cdot 10^{11}$ Вт). Правда, труднейшей задачей было попасть сфокусированным лазерным пучком в «банч» ускоренных электронов. Это удалось сделать благодаря высокой стабильности работы лазерной установки, генерирующей УКИ. Разумеется, работа с более скромными ускорителями позволяет получать не γ -излучение, а жесткое рентгеновское излучение в виде направленного пучка.

Лазерный термоядерный синтез. Одним из примеров использования сверхмощного лазерного излучения является возможность нагрева плазмы до термоядерных температур. Уже в течение многих лет интенсивно проводятся работы, направленные на мирное использование энергии термоядерного синтеза. Известно, что при слиянии двух ядер тяжелого изотопа водорода — дейтерия (D) или ядра дейтерия с ядром еще более тяжелого изотопа — трития (T) выделяется значительная энергия. На этом основано термоядерное оружие (водородная бомба). Слиянию ядер препятствует электрическая сила отталкивания одноимен-

ных зарядов (кулоновская сила). Это отталкивание можно преодолеть, если ядра будут сталкиваться с достаточно большими скоростями. Для этого нужно нагреть плазму, содержащую дейтерий или смесь дейтерия с тритием. Расчеты показывают, что требуется температура в десятки или сотни миллионов градусов. Такие температуры достигаются при взрыве атомной бомбы. Добавление к атомной бомбе дейтерия и трития приводит к термоядерной, водородной бомбе.

Для мирного использования термоядерной энергии предлагаются различные способы создания плазмы с соответствующими параметрами (температурой, плотностью и временем существования) в управляемых условиях. В частности, советские физики И.Е.Тамм и А.Д.Сахаров предложили использовать для этого магнитные поля. Развитие этой идеи привело к созданию токамаков – установок, в которых осуществляется электрический разряд в камере, напоминающей бублик (тор), охватывающий железный замкнутый сердечник, как в трансформаторе. В плазме, создаваемой при разряде с определенными параметрами, может возникнуть и удерживаться состояние с температурой и плотностью, достаточными для протекания термоядерной реакции с положительным выходом, т.е. с выделением энергии, превышающей электрическую энергию, вкладываемую в разряд.

С появлением мощных лазеров Н.Г.Басов и О.Н.Крохин в 1964 году предложили использовать их излучение для быстрого, импульсного нагрева ограниченного объема термоядерной плазмы. Их расчеты показали, что при фокусировании на поверхность твердого тела, содержащего нужные изотопы водорода, достаточно короткого и мощного импульса лазерного излучения образуется плазма, которая, несмотря на свободный разлет, может иметь температуру и плотность, нужные для протекания термоядерной реакции. В то время параметры лазерного излучения существенно уступали необходимым значениям. Потребовались значительные усилия и время, прежде чем в лаборатории Н.Г.Басова в 1968 году был создан сверхмощный лазер пикосекундных импульсов с энергией в десятки джоулей. В качестве активной среды в нем использовалось неодимовое стекло в виде стержней длиной 60 см и диаметром 45 мм. Накачка осуществлялась с помощью импульсных ламп. Пучок лазерного излучения фокусировался на поверхность твердого вещества – дейтерида лития (LiD). В образующейся плазме, содержащей ионы дейтерия, получались условия для термоядерной реакции с испусканием быстрых нейтронов. Их регистрация явилась дока-

зательством осуществимости термоядерной реакции под действием сверхмощного импульсного лазерного излучения.

Во многих лабораториях мира начались работы по лазерному управляемому термоядерному синтезу (ЛУТС). Расчеты показали, что для получения термоядерной энергии, превосходящей лазерную энергию, требуется, чтобы лазерная энергия достигала десятков и даже сотен килоджоулей при длительности импульса несколько наносекунд. Для достижения этой цели в нашей стране, в США, в Японии и во Франции создаются гигантские установки. С их помощью предполагается продемонстрировать возможность «зажигания» ограниченного объема плазмы с выделением энергии, нужной для практического использования. Так, в Российском федеральном ядерном центре (Саров) была создана установка *Искра-5*, в 12 пучках которой получалась энергия несколько килоджоулей.

Апофеозом усилий в этой области является лазерная установка, создаваемая в США. Она имеет размеры с футбольное поле. В качестве лазерных элементов используются пластины неодимового стекла размером $46 \times 81 \times 3,4$ см. Общее число таких пластин достигает 3072. Для их накачки используются 7600 импульсных ламп длиной 180 см. Предполагается, что полная выходная энергия лазерного излучения составит 2,1 МДж, а термоядерной энергии выделится около 10 МДж. Стоимость установки – миллиарды долларов. По существу, эксперимент на этой установке будет «миниатюрным» (контролируемым) взрывом водородной бомбы.

Успехи в области сверхмощных лазерных установок УКИ привели к концепции использования вместо наносекундных импульсов пикосекундных импульсов. Считается, что это позволит уменьшить размеры лазерной установки и ее стоимость. Одной из мотиваций создания установок УКИ с выходной мощностью петаваттного уровня является экспериментальная проверка этой концепции.

Прецизионная метрология оптических частот и оптические сверхточные часы

Важнейшим применением лазеров является метрология. С помощью лазеров производятся прецизионные измерения длины и времени, создаются сверхточные оптические часы. Точные измерения являются необходимой основой для применения математики в научных исследованиях. Еще в XIX веке У.Томсон (лорд Кельвин) утверждал: «Если вы можете измерить и выразить в числах то, о чем говорите, то об этом

предмете вы кое-что знаете; если же вы не можете сделать этого, то ваши познания скудны и неудовлетворительны». Измерение времени имеет особое значение, поскольку это фундаментальная физическая величина и философская категория. На самом фундаментальном уровне физики до сих пор не знают, что такое время, хотя и способны измерять его величину более точно, чем любую другую физическую характеристику. Можно сказать, что вся физика в своих принципиальных основах строится на представлениях о времени.

Время и его измерение также имеют огромное значение для человеческого общества. Невозможно себе представить жизнь без часов, согласования различных событий во времени, расписаний и возможности измерять промежутки времени. Стремление измерять время с все большей точностью способствовало техническому и научному развитию нашей цивилизации. Точные измерения времени являются основой фундаментальной науки. Диапазон интервалов времени, с которыми имеет дело фундаментальная наука, огромен. Он простирается от так называемого планковского времени (10^{-43} с – наименьшая величина, с которой имеет дело квантовая космология) до времени существования нашей Вселенной (несколько десятков миллиардов лет, т.е. $10^{17} - 10^{18}$ с, согласно концепции Большого взрыва). Из этого огромного диапазона реальным измерениям поддается лишь малая часть, причем точность измерений как текущего времени, так и коротких интервалов времени самым непосредственным образом связана с успехами в области лазеров. На рисунке 66 представлена шкала времени с указанием событий различной длительности.

Проблема точного измерения времени включает два аспекта: создание точных часов, позволяющих сопоставлять измеряемый интервал времени с числом периодов прецизионного колебательного процесса (стандарта частоты), и методов измерений все более коротких интервалов. Грубо говоря, требуются точные часы и секундомер. Замечательно, что лазеры позволили добиться впечатляющих успехов в обеих областях проблемы измерения времени. Выше обсуждалось, как с помощью фемтосекундных лазеров можно измерять короткие интервалы времени и изучать сверхбыстрые процессы. Теперь рассмотрим проблему сверхточных часов.

Для точного измерения времени нужно производить считывание числа периодов какого-либо периодического процесса. Чем стабильнее этот периодический процесс, тем точнее можно измерить время. Точность также определяется тем числом периодов, которые укладываются в измеряемый интервал времени. Отсюда

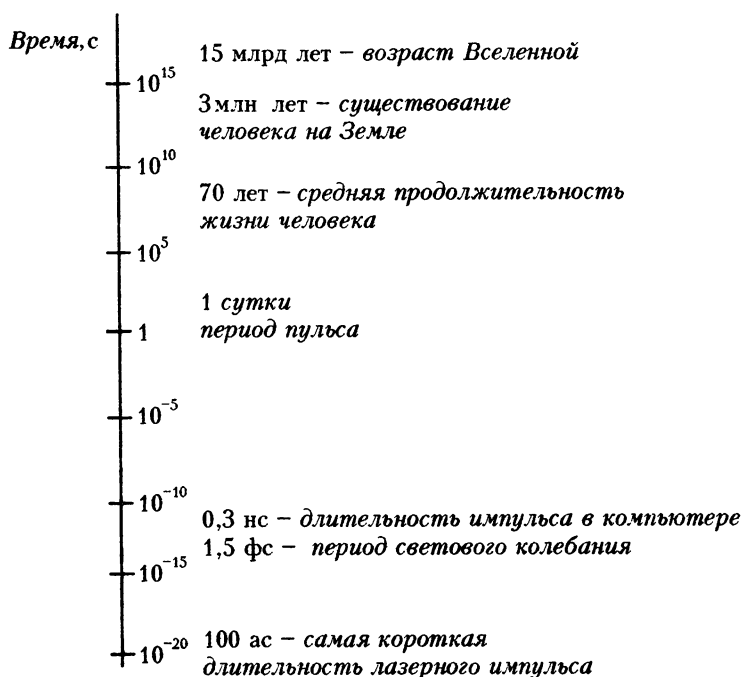


Рис.66. Шкала времен

следует стремление повышать частоту колебаний высокостабильного источника колебаний (осциллятора).

На протяжении всей истории вращение Земли (смена дня и ночи) было естественным мерилем времени. Хотя стабильность вращения Земли велика, большой период неудобен для точных измерений. Поэтому его желательно сопоставить с периодическим процессом с большей частотой и уже этот процесс использовать для измерений. Галилей установил, что период колебаний маятника определяется его длиной, поэтому частоту колебаний можно регулировать и фиксировать. Маятник определенной длины стал составной частью механических часов. Частота маятника сопоставляется с эталоном частоты, которым является вращение Земли, путем астрономических наблюдений звезд (определение момента прохождения изображения звезды в окуляре специального телескопа – пассажного инструмента). В качестве системы привязки сравнительно высокой частоты колебаний маятника (герцы) к малой частоте вращения Земли (1 /сутки) используется система пар шестеренок, сидящих на

одной оси. Она, по существу, является делителем (или умножителем) частоты с привязкой фазы. Степень деления определяется отношением диаметров (числом зубцов) шестеренок, сидящих на одной оси. Это отношение не может быть больше 10–20 по техническим причинам, поэтому используется система многих шестерен. Согласование фаз осуществляется благодаря зацеплению зубцов, что исключает проскальзывание. Таким образом, классическая схема часов включает следующие основные части: высокостабильный осциллятор (эталон), стабильность которого определяет точность часов, механизм преобразования частоты, позволяющий сопоставить частоту эталона с другим, более удобным осциллятором, и устройством считывания числа колебаний (циферблат). На основе вращения Земли была выбрана единица времени – секунда, которая определялась как $1/86400$ часть периода вращения Земли. Астрономические часы допускали точность измерения времени на уровне $10^{-7} - 10^{-8}$.

Естественным было стремление выбрать в качестве эталона более удобный источник стабильных колебаний, частота которого определялась бы самой природой, а не человеком. Было известно, что свет может испускаться в виде узких спектральных линий. На основе того факта, что свет является электромагнитными колебаниями, распространяющимися со скоростью света, Максвелл еще в 1873 году высказал идею выбора нового эталона времени и длины: «Наиболее универсальная единица времени могла бы быть реализована на основе периода колебаний специально выбранного света, чья длина волны является единицей длины».

По существу, предлагался единый оптический эталон времени и длины. Спектральные линии излучения могут быть чрезвычайно узкими, а соответствующие им длины волн можно было измерять с высокой точностью с помощью интерференционных методик. Недаром интерференционный прибор высокого спектрального разрешения, предназначенный для точного определения длины волны, получил название эталона Фабри–Перо. Он предназначался для использования в качестве эталона длины, призванного заменить метровый платино-иридиевый стержень. Особенно большой вклад в метрологию, основанную на определении длин волн спектральных линий, внес Майкельсон. Именно с этой целью он создал свой знаменитый интерферометр. Результаты исследований Майкельсона способствовали тому, что в качестве эталона длины была выбрана длина волны излучения атома кадмия.

Однако на пути использования световой волны в качестве эталона времени стояла принципиальная трудность – необходимо было знать не длину волны, а частоту света. Но в оптике (до последнего времени!) отсутствовали методы прямого измерения частоты электромагнитных волн. Хотя длина волны однозначно связана с частотой через скорость света (фундаментальную физическую константу), саму скорость света необходимо знать с достаточно высокой точностью. Измерение скорости света является само по себе фундаментальной проблемой. Майкельсон провел замечательные исследования в этой области, однако точность измерений была недостаточна для выбора света в качестве эталона времени.

Успехи пришли из области радиофизики и электроники. В отличие от оптики, в радиодиапазоне электромагнитные волны получаются с помощью высокостабильных генераторов, и приборы типа электронных осциллографов и частотомеров позволяют непосредственно измерять частоту путем считывания периодов колебаний. Важнейшим шагом в повышении точности измерения времени явилось появление высокостабильных кварцевых генераторов с частотами в области десятков килогерц. Важно указать, что кварцевый осциллятор не является естественным эталоном – его частота определяется размерами кварцевого элемента. Методами электроники можно сравнительно просто умножать и делить частоты электронных генераторов. Успехи в области радиофизики и электроники позволили превзойти точность астрономических часов и довести точность измерения времени до $10^{-8} - 10^{-10}$.

Столь высокая точность позволила обнаружить неравномерность вращения Земли, в частности были установлены сезонные изменения скорости вращения. Для метрологов стала очевидной несостоятельность выбора вращения Земли в качестве эталона времени. Поэтому было принято новое, примерно на порядок более точное, определение величины секунды через период обращения Земли вокруг Солнца. Это так называемая эфемеридная секунда, которая определяется как $1/315569259747$ часть года.

Успехи в области спектроскопии (продвижение в радиодиапазон с использованием методик электроники, что привело к радиоспектроскопии) и квантовой теории показали, что существуют узкие спектральные линии атомов и молекул и в диапазоне радиоволн, и их частоты (до 100 ГГц) можно непосредственно измерять методами электроники. Таким образом, появилась принципиальная возможность вернуться к идее использования

спектральной линии в качестве эталона частоты. В результате обстоятельных и целенаправленных исследований Международным эталоном секунды был выбран интервал времени, определяемый частотой, которая соответствует переходу между уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия. Согласно этому определению, секунда есть длительность 9192631770 периодов колебаний между уровнями сверхтонкой структуры основного состояния изотопа ^{133}Cs . Квантовая электроника предоставила новые высокостабильные генераторы электромагнитных волн – мазеры, и водородный мазер до сих пор с успехом применяется для прецизионного измерения времени.

Итак, основная тенденция прецизионного измерения частот и создания часов на этой основе заключается в выборе высокостабильного осциллятора как эталона частоты и сравнения с ним цезиевого эталона секунды путем деления или умножения частот механизмом часов. При этом крайне желательно повышение частоты эталона, позволяющее получать нужную точность за меньшие интервалы времени измерения.

С появлением лазеров – источников света с высокой монохроматичностью излучения – начались исследования по повышению стабильности их частоты. На основе лазеров были созданы источники электромагнитных волн оптического диапазона с высокой стабильностью частоты. Исследования показали, что при резонансном взаимодействии лазерного излучения с газами в виде атомов или молекул можно получать чрезвычайно узкие резонансные линии поглощения. Огромную роль в этих исследованиях сыграл наш замечательный ученый В.П.Чеботаев, под руководством которого в Новосибирске были получены важные результаты при исследовании He-Ne лазера, содержащего внутри резонатора поглощающую ячейку с метаном. На основе этих исследований были созданы стандарты частоты с рекордно узким спектром 0,07 Гц (относительная ширина $7 \cdot 10^{-16}$) на высокой частоте оптического диапазона порядка 10^{14} Гц ($\lambda = 3,39$ мкм).

Для описания степени нестабильности стандарта частоты, основанного на атомных переходах, используется соотношение: $\sigma(\tau) \sim (\Delta\nu/\nu_0)\sqrt{N}$, где $\Delta\nu$ и ν_0 – ширина линии и центр частоты атомного перехода соответственно, N – число атомов, взаимодействующих с электромагнитным полем, а τ – продолжительность измерения. Видно, что точность сильно связана с величиной $\Delta\nu/\nu_0$. Переходы в оптической области ($\nu_0 \sim 10^{14} - 10^{15}$ Гц) имеют частоты примерно на пять порядков выше, чем в микроволновой области ($\nu_0 \sim 10^{10}$ Гц). Более

того, успехи в области лазеров позволили получать очень узкие ширины линий, вплоть до субгерцевых и даже миллигерцевых. Эта комбинация высокой частоты и узости линии открывает возможность использовать для построения часов переходы в оптической области. Для таких оптических часов можно ожидать точность в 100 – 1000 раз лучшую по сравнению с микроволновыми часами, т.е. величину от 10^{-17} до 10^{-18} .

Однако использование оптического стандарта частоты для прецизионного измерения времени требует решения принципиальной проблемы – измерение значения высокой оптической частоты путем сопоставления ее с цезиевым эталоном секунды. Напомним, что в радиодиапазоне можно регистрировать напряженность электрического поля и ее зависимость от времени, т.е. существуют методы прямого измерения частоты электромагнитных волн. В оптике, напротив, регистрируется не напряженность электрического поля, а интенсивность, т.е. величина, усредненная по периоду. Интерференционные методы позволяют определять длину волны, но не частоту. Правда, фотоэлектронные методики позволяют измерять разность оптических частот, если ее значение попадает в радиодиапазон. При попадании на фотокатод двух оптических волн из-за биений между ними возникает фототок с частотой, равной разности между оптическими частотами. Методами электроники сигналы фототока можно усилить и измерять эту частоту.

Для прямого измерения оптической частоты нужен механизм, подобный системе шестеренок в механических часах, т.е. нужна цепочка преобразователей частоты, переводящая оптическую частоту в область гигагерц, где ее можно сопоставить с цезиевым эталоном. В принципе, такое преобразование можно осуществить методами нелинейной оптики, которые обеспечивают преобразование частот (генерация разностных и суммарных частот и генерация гармоник лазерного излучения). Однако следует иметь в виду, что эти методы позволяют преобразовывать частоты лишь в разы. А для сопоставления оптической частоты с частотой цезиевого эталона требуется, как можно видеть, преобразование примерно в 10^4 раз. Обращаясь к аналогии с механическими часами, можно сказать, что требуется большое число шестеренок. Поэтому пришлось использовать цепочку из множества преобразователей частоты. Важно отметить, что при таких преобразованиях необходим контроль фазы. В механической системе это достигается сцеплением зубьев шестеренок. В электромагнитной системе цепочка гармоник частот начинается от цезиевого стандарта (нижний конец цепи),

далее следуют гармоники, получаемые в кристаллических диодных смесителях и других нелинейных устройствах, включая длинноволновые лазеры и их гармоники, до оптической частоты (верхний конец цепи). Каждый элемент цепочки требовал контроля стабильности частоты и фазы и представлял собой довольно сложное устройство.

Такие цепочки являются исключительно сложными установками. Поэтому совсем немного таких уникальных систем было создано в нескольких хорошо оборудованных национальных метрологических центрах (США, СССР, Франция, Великобритания, ФРГ, Канада). Определенным недостатком таких цепей является то, что они предназначены для измерения лишь одной выбранной оптической частоты.

Появление лазера, генерирующего непрерывную последовательность фемтосекундных импульсов, дало неожиданный и очень эффективный способ решить проблему сопоставления оптической частоты с частотой цезиевого стандарта и, тем самым, измерения оптических частот. Фемтосекундные лазеры стали важнейшей частью интенсивных исследований по разработке систем прецизионных измерений оптических частот и создания на их основе сверхточных оптических часов.

Как уже было сказано, спектр излучения фемтосекундного лазера непрерывного действия представляет собой гребенку узких линий, частоты которых разделены интервалом $f_{\text{повт}}$, определяемым расстоянием между зеркалами резонатора ($f_{\text{повт}} = c/(2L)$, где c – скорость света, а L – оптическая длина резонатора). На рисунке 67 показана последовательность фемтосекундных импульсов во времени и соответствующий им спектр. Полная ширина спектра гребенки определяется длительностью одиночного импульса в непрерывной последовательности. При длительности, близкой к периоду лазерной волны, ширина спектра охватывает огромную область. Видно, что оптическую частоту отдельной линии гребенки можно определить простым равенством: $f_n = n f_{\text{повт}} + f_0$, где n – номер моды (может пробегать значения до 10^6).

Замечательно, что обе частоты $f_{\text{повт}}$ и f_0 лежат в радиодиапазоне и их можно непосредственно измерять методами электроники путем сопоставления с цезиевым эталоном секунды. Чтобы определить n , достаточно измерить длину волны и знать значение скорости света с точностью лучше чем $f_{\text{повт}}/f_n$, т.е. приблизительно до 7-го знака. Это вполне осуществимо стандартными методами оптической спектроскопии. Таким образом, зная $f_{\text{повт}}$ и f_0 , можно измерить оптическую частоту f_n с точностью,

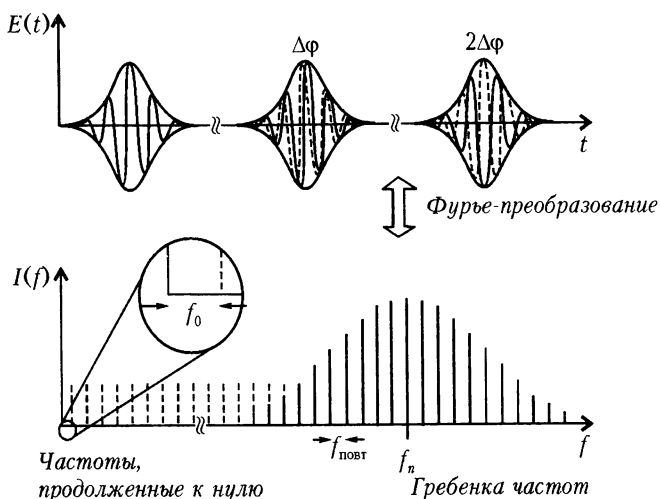


Рис.67. Последовательность фемтосекундных импульсов и спектр гребенки линий

определяемой цезиевым эталоном (15-й и даже 16-й знак). В результате получается «линейка оптических частот», деления которой могут быть определены с высокой точностью по цезиевому стандарту.

С помощью такой линейки можно определить оптическую частоту, попадающую в ширину линейки. Для этого измеряется сдвиг этой частоты с ближайшим «зубом» фемтосекундной гребенки. Однако имеется принципиальная трудность использования такой линейки. Измерение $f_{\text{повт}}$ не представляет особого труда, причем прецизионный контроль этой частоты осуществляется перемещением зеркала резонатора фемтосекундного лазера с помощью пьезоэлектрического толкателя, управляемого электроникой с обратной связью. Определение f_0 сложнее. Эта частота определяет сдвиг всей гребенки, как целого, относительно нуля частоты, и ее значение лежит между 0 и $f_{\text{повт}}$. Был придуман замечательный способ измерения и контроля этой частоты, основанный на принципах нелинейной оптики.

Посмотрим еще раз на рисунок 67. Видно, что импульсы в последовательности не вполне идентичны. Они имеют одинаковые огибающие и, следовательно, одинаковые формы и длительности. Но несущая частота имеет разный сдвиг по отношению к максимуму огибающей. На важность этого обстоятельства было указано раньше при описании метода получения аттосекундных

импульсов. Физической причиной такого сдвига является различие скоростей распространения между зеркалами резонатора огибающей импульса и несущей частоты. Для несущей частоты скорость распространения, т.е. фазовая скорость v_ϕ определяется как $v_\phi = c/n(\omega)$, где c – скорость света в вакууме, а n – показатель преломления для несущей частоты ω . На скорость распространения огибающей, т.е. на групповую скорость $v_{гр}$ влияет дисперсия ($dn/d\omega$), поскольку ширине огибающей соответствует вполне определенная ширина спектра. Из оптики известно, что фазовая и групповая скорости связаны формулой $v_{гр} = v_\phi / (1 + (\omega/n)(dn/d\omega))$. Поскольку в резонаторе фемтосекундного лазера находятся активная среда и призмы, их дисперсии будут влиять на величину групповой скорости и, следовательно, на сдвиг фазы между несущей частотой и максимумом огибающей. Как мы видели, величину дисперсии внутри резонатора можно изменять с целью достижения минимальной длительности импульса. Таким образом, изменяя дисперсию, можно регулировать также сдвиг фазы между несущей частотой и максимумом огибающей, а величина этого сдвига проявляется в спектре, причем положение линий на шкале частот можно контролировать.

Как видно на рисунке 67, этот сдвиг фазы увеличивается от импульса к импульсу, но полное изменение равно периоду несущей частоты. Имеет место «сползание» максимума огибающей относительно несущей частоты по мере прохождения среды, обладающей дисперсией. Весьма малым (но контролируемым!) изменением дисперсии внутри резонатора можно сделать так, что на выходе будут импульсы с одним и тем же сдвигом этой фазы. В этом случае уже получится последовательность совершенно идентичных импульсов с одной и той же фазой между огибающей и несущей частотой. Из Фурье-преобразования следует связь между этим сдвигом $\Delta\phi$ и сдвигом всей гребенки частот спектра f_0 относительно нуля шкалы частот: $2\pi f_0 = \Delta\phi f_{повт}$. Следовательно, путем изменения дисперсии внутри резонатора можно изменять и, стало быть, регулировать сдвиг всей гребенки частот, т.е. f_0 , что и нужно для пользования линейкой оптических частот.

Покажем, как это делается. Предположим, что спектр излучения фемтосекундного лазера (гребенка частот) настолько широк, что удвоенная частота линии, лежащей в низкочастотном (красном) крае спектра $f^{крас}$, меньше частоты $f^{син}$, лежащей в высокочастотном (синем) крае спектра, т.е. $2f^{крас} < f^{син}$. Это

условие выполняется, когда длительность импульса близка к одному периоду волны. Если длительность импульса больше, то ширину спектра гребенки можно увеличить до нужного значения, используя метод генерации суперконтинуума. Согласно указанной выше формуле для оптической частоты красного края гребенки, $f^{\text{крас}} = nf_{\text{повт}} + f_0$. Для частоты синего края возьмем значение $f^{\text{син}} = 2nf_{\text{повт}} + f_0$, которое соответствует реальной частоте «зубца» в синем крае гребенки. Теперь с помощью генерации второй гармоники преобразуем излучение красного края во вторую гармонику. Удвоенная частота «зубца» красного края будет равна $2f^{\text{крас}} = 2nf_{\text{повт}} + 2f_0$. Теперь пучки излучения с удвоенной частотой красного края и с частотой синего края направим на фотоприемник. На нем появится сигнал разности этих частот, т.е. $f_{\text{разн}} = 2f^{\text{крас}} - f^{\text{син}} = (2nf_{\text{повт}} + 2f_0) - (2nf_{\text{повт}} + f_0) = f_0$. Таким образом, в результате такой операции, основанной на нелинейной оптике, получается искомая частота.

Конкретно это делается с помощью схемы, по существу, являющейся схемой хорошо известного интерферометра Маха–Цендера. Но отличие в том, что в одно из его плеч вводится нелинейный кристалл для генерации второй гармоники и на выходе смешиваются пучки на основной частоте и частоте второй гармоники. Сигнал с фотоприемника подается на радиочастотный спектроанализатор. На нем регистрируются частоты $f_{\text{повт}}$ и f_0 , и сигналы этих частот можно использовать для регулировки с помощью электроники с обратной связью. Отметим, что именно эта методика контроля сдвига фазы несущей частоты и максимума огибающей использовалась в экспериментах по генерации аттосекундных импульсов.

Итак, с помощью фемтосекундного лазера и такого интерферометра можно получить «линейку» оптических частот, привязанную к нулю. Измерение оптической частоты, попадающей в ширину гребенки, сводится к подсчету числа делений («зубцов» гребенки), и отпадает необходимость в системах промежуточных преобразований частоты. В отличие от сложной и громоздкой цепочки синтеза частот получается компактная установка, которая легко размещается на лабораторном столе и позволяет измерять любую оптическую частоту, попадающую в ширину «линейки», путем измерения разности этой частоты с ближайшей линией «линейки».

Используя аналогию с механическими часами, можно сказать, что вместо набора множества шестеренок используется лишь одна с отношением числа зубцов порядка миллиона. Перемещая контролируемым образом зеркало резонатора фем-

тосекундного лазера, можно изменять промежуток между «зубцами шестеренки». Образно говоря, появились часы, «тикающие» фемтосекундными импульсами. Можно так расположить эти «зубцы», чтобы один из «зубцов» на длинноволновом крае гребенки совпадал с измеряемой оптической частотой, а «зубец» на коротковолновом крае – с ее второй гармоникой. Таким образом, частота следования «зубцов» (интервал между фемтосекундными импульсами) приводится в жесткое соответствие с измеряемой частотой. Затем электронная схема подсчитывает число «зубцов» между этими краями (несколько сот тысяч). Умножение этого числа на частотный интервал гребенки и дает искомую частоту. Получается схема компактных оптических часов, которые обещают быть в 1000 раз точнее существующих часов. Отметим, что за работы, в которых был осуществлен этот способ измерения оптических частот лазерного излучения, Дж.Холлу и Т.Хеншу в 2005 году была присуждена Нобелевская премия по физике. Считается, что на основе такой лазерной схемы могут быть созданы системы измерения времени (оптические часы) с точностью на уровне 10^{-17} . Представление о такой точности может дать следующий пример. Если бы такие сверхточные оптические часы были запущены в момент образования Вселенной, то сейчас расхождения в их показаниях не превысили бы десятка секунд.

Демонстрация таких сверхточных оптических часов была проведена с помощью фемтосекундных лазеров на сапфире. Однако эти лазеры имеют серьезные недостатки. Их стоимость высока, они недостаточно компактны (затруднена перевозка в другие лаборатории для сопоставления измерений), а их КПД невелик. Кроме того, проблематично поддерживать непрерывную генерацию в течение нескольких дней или даже недель, что является одним из основных требований, предъявляемых к таким устройствам, как оптические часы. Поэтому в ведущих лабораториях мира проводятся интенсивные целеустремленные исследования возможности использования вместо сапфировых лазеров фемтосекундных волоконных лазеров. Хотя волоконные лазеры демонстрируют несколько больший фазовый шум, по сравнению с лазером на сапфире, они обладают такими несомненными достоинствами, как компактность, сравнительно малая стоимость, доступность и простота в эксплуатации, малая чувствительность к внешним воздействиям, высокая эффективность.

В нашей стране такая работа проводится совместно в Физическом институте им. П.Н.Лебедева РАН, Научном центре

волоконной оптики РАН и ООО «Авеста», занимающейся разработкой и выпуском научной аппаратуры для исследований в области фемтосекундных лазеров. Была разработана, создана и исследована система малогабаритных оптических часов, использующая репер оптической частоты на основе He-Ne лазера с метановой ячейкой и волоконный фемтосекундный лазер для генерации гребенки. Исследования показали, что стабильность этой системы порядка 10^{-14} .

Возникает вопрос: а зачем нужны такие сверхточные оптические часы? Во-первых, следует сказать, что современные способы связи основаны на посылке сигналов с высокой частотой следования, причем для ускорения связи требуется точная синхронизация времени посылки и приема сообщений. Во-вторых, задачи навигации, запуск космических ракет и управление их полетом также требуют точного определения интервалов времени. Зная скорость света, с помощью точного измерения времени можно точно измерять расстояния. На этом основана глобальная система определения координат – ГЛОНАСС. Эта система использует ряд спутников, расстояния до которых определяются по времени распространения радиосигналов. Для оптимального функционирования этой системы нужна нестабильность бортовой шкалы времени порядка $10^{-14} - 10^{-15}$ и нестабильность первичного эталона на уровне $10^{-15} - 10^{-16}$. Благодаря высокой точности измерения времени, измерения точности координат достигают нескольких сантиметров. Именно такая система используется, в частности, в крылатых ракетах (точечное оружие). Также имеется возможность производить точные геодезические измерения, определять скорости дрейфа континентов и скорости таяния ледников и др. Использование оптических часов делает эту систему более компактной и удобной в эксплуатации.

Наконец, методы точного определения времени требуются и для научных исследований. Для иллюстрации можно привести впечатляющие результаты по уже достигнутому в последние годы прогрессу в точности измерений такой фундаментальной физической константы, как постоянная Ридберга, которая входит в формулу, определяющую значения частот в спектрах атомов. Использование лазерных методик, в том числе с фемтосекундными лазерами, позволило повысить точность измерений на 5 порядков.

Рассматриваются возможности проверок основных физических закономерностей. Еще в 30-х годах прошлого столетия Дирак выдвинул гипотезу, что фундаментальные физические константы, такие как скорость света, постоянная Планка, заряд

и масса электрона, строго говоря, не являются константами – их значения изменяются с ходом времени от начала Большого взрыва, образовавшего Вселенную. Разумеется, такое изменение (если оно имеет место) крайне медленное. Чтобы его определить, необходима исключительно высокая точность измерений. Проверка этой гипотезы очень интересна с точки зрения познания Природы. В последнее время появились проекты использования для этого сверхточных часов. Некоторые из этих проектов как раз и предусматривают возможность применения оптических часов.

Еще один пример связан с радиоастрономией, а именно с определением размеров особых объектов, удаленных на самые большие расстояния. Это так называемые квазары. Они излучают энергии такого же масштаба, как галактики, но предположительно имеют сравнительно малые размеры. В 1920 году Майкельсон показал, как можно измерять диаметры звезд с помощью интерферометра, схема которого показана на рисунке 68. С

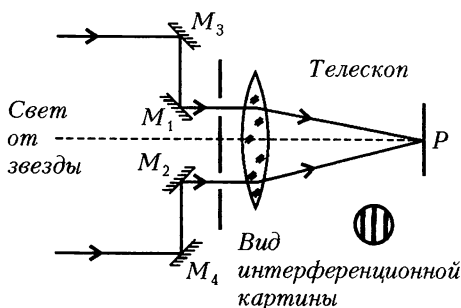


Рис 68. Схема звездного интерферометра Майкельсона: M_1, M_2, M_3, M_4 – зеркала интерферометра; определяется расстояние между зеркалами M_3 и M_4 , при котором исчезают полосы интерференционной картины

помощью этого интерферометра можно определить телесный угол, в котором излучение когерентно. Зная расстояние до источника, можно определить его размер. Угловое разрешение интерферометра определяется отношением λ/D , где λ – длина волна, а D – расстояние между зеркалами интерферометра. В своих исследованиях Майкельсон довел это расстояние до 18 м, что позволяло определять угловой размер звезды с точностью до величины $0,007''$. Эти измерения позволили определить размеры нескольких ярких звезд.

С появлением радиотелескопов аналогичная методика стала применяться для астрономических источников радиоволн. Су-

шественное увеличение длины волны по сравнению с длиной волны света компенсируется здесь возможностью значительного увеличения базы. Появилась схема радиоинтерферометра со сверхдлинной базой (РСДБ), в котором сигналы принимаются двумя радиотелескопами, расположенными на большом, но точно измеренном расстоянии. Если принятые сигналы синхронизованы с точностью до долей периода радиоволны, то их можно интерферометрически сложить (используя компьютерную обработку сигналов). Разумеется, для такой синхронизации нужны точные часы. Эта методика успешно применяется, причем величина базы достигает тысяч километров (радиотелескопы располагаются на разных континентах), а их координаты определяются с точностью до сантиметров с помощью точных геодезических измерений, которые как раз и осуществляются благодаря лазера. Таким образом, несмотря на значительно бóльшую длину волны, угловое разрешение превосходит возможности лучших оптических телескопов.

Появились проекты еще больше увеличить угловое разрешение, размещая один из радиотелескопов на космическом корабле или на Луне. Но для этого требуется точное определение его координат и синхронизация сигналов с наземным радиотелескопом. Это, в принципе, можно сделать, если на борту корабля будут достаточно точные часы, синхронизованные с часами на Земле. Вот с этой целью, в частности, и проводится работа по созданию таких компактных и сверхточных часов на основе лазеров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрение даже малого числа применений лазеров демонстрирует его уникальные свойства. В самом деле, пиковая мощность излучения может превышать 10^{15} Вт, длительность импульса можно сокращать вплоть до одного периода световой волны и даже меньше, монохроматичность (отношение ширины линии к частоте) может быть лучше чем 10^{-15} . Неудивительно, что столь впечатляющие параметры проявляются в научных и технических применениях. С помощью лазерного излучения можно нагреть плазму до термоядерных температур. А, с другой стороны, можно охладить вещество до температуры, лишь на миллионные доли градуса выше абсолютного нуля. Продемонстрирована возможность создания сверхточных часов.

Прогресс науки и техники оказывает огромное влияние на человеческое общество. Так, конец XVII века и начало XVIII века характеризовались успехами в области механики. Создание паровой машины и развитие термодинамики привели к «веку пара», затем наступил «век электричества», а XX век можно смело назвать «веком информации». Радио, телевидение, компьютеры радикально изменили мир и образ жизни людей. Многие писатели-фантасты описывали высадку человека на Луну, но никто из них не мог вообразить, что «прилунение» человека будут наблюдать около миллиарда людей!

Паряду с транзистором и быстродействующим компьютером лазер занимает важное место в развитии информатики. В настоящее время специалисты по средствам связи рассматривают проекты, которые должны обеспечить подсоединение каждого дома к глобальным системам волоконной связи. Приводится следующее соображение. Ширина полосы частот, которые могут передаваться по оптическим волокнам, может достигать сотен терагерц. Это означает принципиальную возможность организовать каналы информации, число которых сравнимо с числом жителей крупных стран.

Работы по исследованию лазеров и созданию новых типов лазеров имеют прямое отношение к этим и другим амбициозным проектам. У молодых людей, интересующихся наукой и техникой, имеется возможность принять непосредственное участие в такой интересной и увлекательной области.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
Глава 1. Источники света	21
Глава 2. Генераторы радиоволн	28
Глава 3. Мазер – предшественник лазера	36
Глава 4. Создание лазера	42
Глава 5. Особенности лазеров	49
Глава 6. Новые типы лазеров	59
Лазеры, основанные на новых активных средах	59
Лазеры, основанные на модификациях резонатора	70
Глава 7. Нелинейная оптика	79
Глава 8. Волоконная оптика	86
Глава 9. Лазеры ультракоротких импульсов	94
Глава 10. Измерение длительности ультракоротких импульсов	109
Глава 11. Усиление ультракоротких импульсов	112
Глава 12. Некоторые применения лазеров	119
Применения, основанные на высокой интенсивности направленного пучка	119
Лазерные излучения на других длинах волн	128
Методики с высоким временным разрешением	141
Спектральные особенности лазерного излучения	145
Сверхбыстрая электроника	150
Сверхвысокие интенсивности и сверхсильные электромагнитные поля	151
Прецизионная метрология оптических частот и оптические сверхточные часы	156
Заключение	171

Петр Георгиевич Крюков

Лазер – новый источник света

Библиотечка «Квант». Выпуск 110

Приложение к журналу «Квант» №2/2009

Редактор *В.А.Тихомирова*

Обложка *А.Е.Пацверия*

Макет и компьютерная верстка *Е.В.Морозова*

Компьютерная группа *Е.А.Митченко, Л.В.Калиничева*

ИБ № 98

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

Печать офсетная Объем 5,5 печ л Тираж 3000 экз.

Заказ № 550.

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

Тел.: (495)930-56-48, e-mail: admin@kvant.info

Отпечатано в ОАО Ордена Трудового Красного Знамени
«Чеховский полиграфический комбинат»

142300 г Чехов Московской области

Сайт www.chpk.ru E-mail: marketing@chpk.ru

Факс: 8(49672)6-25-36, факс: 8(499)270-73-00

Отдел продаж услуг многоканальный 8(499) 270-73-59

**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.Аришинов, 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.Пурчаль, 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.Бразгинский, 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.Филиппов. 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.Гросберг, 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
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
109. *А.В.Спивак*. Арифметика-2

Индекс 70465



Библиотечка КВАНТ

A CD-ROM is shown with a vibrant, multi-colored laser beam reflecting off its surface. The beam transitions through a spectrum of colors: red, orange, yellow, green, blue, and purple. The text "Лазер-" is overlaid on the left side of the beam.

Лазер-

НОВЫЙ
ИСТОЧНИК СВЕТА

ВЫПУСК

110