



Лазер – замечательное достижение XX века

П. КРЮКОВ

Введение

В XX веке успехи физики и наукоемких технологий привели к достижениям, радикально повлиявшим на жизнь человеческого общества. Это – создание атомной бомбы, овладение атомной энергией с помощью ядерных реакторов и изобретение транзистора. Сюда же можно добавить создание в 1960 году принципиально нового источника света – лазера, обладающего удивительными свойствами.

Лазер способен испускать свет с очень узким спектром (монохроматическое излучение) в виде направленного пучка. Высокая направленность пучка лазерного излучения, т.е. малое увеличение площади сечения пучка при увеличении дистанции, на которое он распространяется, означает, что энергию излучения можно передавать на значительные расстояния и концентрировать ее с помощью фокусирования подходящей оптической системой. Успехи в разработке лазеров разных типов позволили получить значительные энергии и мощности лазерного излучения.

Становятся реальностью и предание об Архимеде, сжигающем римский флот сфокусированными солнечными лучами, и фантастические описания Г.Уэллса и А.Толстого. Действительно, в настоящее время в США создается мощный химический лазер, размещаемый на самолете «Боинг-747». С помощью этой системы предполагается уничтожать баллистические ракеты на взлете на расстоянии около 100 миль. В обычной жизни лазеры также получают широкое распространение. Они применяются в медицине, в промышленности (прецизионная резка и сварка), в новейших устройствах электроники (DVD проигрыватели, компьютеры), в системах волоконно-оптической связи и в лазерном шоу.

Но, пожалуй, главные применения – это научные исследования. Высокие научные результаты отмечаются Нобелевскими премиями, и их присуждение является определенным показателем важности работы. В 1964 году Ч.Таунс, Н.Г.Басов и А.М.Прохоров были награждены Нобелевской премией по физике за вклад в создание лазера. С тех пор почти треть Нобелевских премий по физике присуждалась за работы, связанные с использованием лазеров.

Научное применение лазеров в значительной степени связано с тем, что излучение может быть сосредоточено в весьма узком диапазоне длин волн, иными словами, оно высоко монохроматично и представляет

собой чрезвычайно узкую спектральную линию. Это обеспечивает исключительно высокую точность спектральных измерений, что, в свою очередь, очень важно для изучения строения вещества.

С другой стороны, лазерное излучение может быть сосредоточено в весьма короткой вспышке – импульсе. Это позволяет получить высокую пиковую мощность излучения (энергия, деленная на интервал времени, в котором она сосредоточена).

За счет высокой направленности светового пучка можно сфокусировать излучение в пятне, размеры которого близки к длине волны лазерного излучения. В результате удается сосредоточить огромную мощность излучения в малом объеме вещества и получить очень высокие температуры – порядка миллионов градусов.

Таким образом, на короткий промежуток времени лазерного импульса можно реализовать в лабораторных условиях состояния вещества, близкие к тем, что имеют место при ядерном взрыве или вблизи астрофизических объектов (звезды, черные дыры).

Можно задать вопрос: где самое холодное место в мире? Возможный ответ – в глубинах космоса – будет неверен. Самые низкие температуры (отличающиеся на миллионные доли градуса от абсолютного нуля) получаются, как это не удивительно, тоже с помощью лазеров.

Дело в том, что лазерный свет способен сообщать движение атомам. Можно так подобрать взаимодействие лазерного света с атомом, что его движение замедлится и он остановится. Удается создать целую систему таких «остановленных» атомов. Поскольку температура определяется скоростями движения, такая система будет обладать сверхнизкой температурой. Вещество при столь низких температурах переходит в особое состояние – так называемый *бозе-эйнштейновский конденсат*. Отметим, что исследования в этой области тоже были удостоены Нобелевской премии.

В предлагаемой вниманию читателей статье, излагается краткая история создания лазера, обсуждаются принцип действия и особенности лазера, перечисляются некоторые типы лазеров с указанием их области применения. Особое внимание уделяется лазерам, способным генерировать импульсы ультракороткой длительности, и применениям, связанным с этой особенностью лазеров.

Принцип действия лазера

История создания лазера тесно связана с историей радио. С момента появления генераторов радиоволн было ясно, что они принципиально отличаются от источников света не только длиной волны. Дело в том, что излучаемый свет обычных источников света – таких как Солнце, газонаполненные лампы и лампы накаливания – обусловлен совокупностью независимых, т.е. несогласованных между собой, процессов испускания света каждым атомом (молекулой) излучающего тела. Напротив, радиоволны обусловлены единообразным, стройным движением электронов в виде электрических токов. Иными словами, излучение, испускаемое передатчиком радиоволн, является в высшей степени *когерентным*, что означает согласованность в пространстве и во времени амплитуды и фазы колебаний в волне. Высокая степень когерентности обусловлена тем, что для получения радиоволн используются генераторы, которые способны создавать непрерывные (на протяжении работы генератора) колебания в виде синусоиды. Очевидно, что все периоды синусоиды согласованы между собой. Принципиальная особенность лазера состоит в том, что он также является генератором, в котором испускание света отдельными атомами (молекулами) происходит, в отличие от обычных источников света, строго согласованно. Образно излучение обычного источника света можно представить себе как ревущую толпу на стадионе, а излучение лазера – как ту же толпу, но поющую в унисон.

Генератор электромагнитных волн включает колебательную систему с источником энергии для своего возбуждения, которая определяет период и частоту, и *положительную обратную связь*. Известно, что в любой колебательной системе, предоставленной самой себе, колебания затухают из-за неизбежных потерь. Для получения непрерывных колебаний необходимо скомпенсировать эти потери. Положительная обратная связь означает, что некоторая часть энергии колебаний выводится наружу, усиливается и вновь возвращается в колебательную систему в нужной фазе. Если эта возвращенная энергия равна сумме энергии, теряемой в колебательной системе, и энергии, выведенной наружу, то в колебательной системе будут поддерживаться непрерывные, незатухающие колебания. Итак, для работы генератора требуется усиление и положительная обратная связь.

Развитие физики XX века привело к осознанию факта, что атомы и молекулы являются системами колебаний с определенными частотами, характерными для каждого вида атомов и молекул, и способны поглощать или испускать электромагнитные волны с этими частотами. Согласно модели Бора, эти частоты соответствуют переходам между определенными энергетическими состояниями (уровнями) атома с испусканием или поглощением порции (кванта) излучения, причем частота и, соответственно, длина волны определяются разностью энергий этих состояний. Такие кванты излучения получили название *фотонов*. А.Эйнштейн описал взаимодействие фотона с атомом. Для

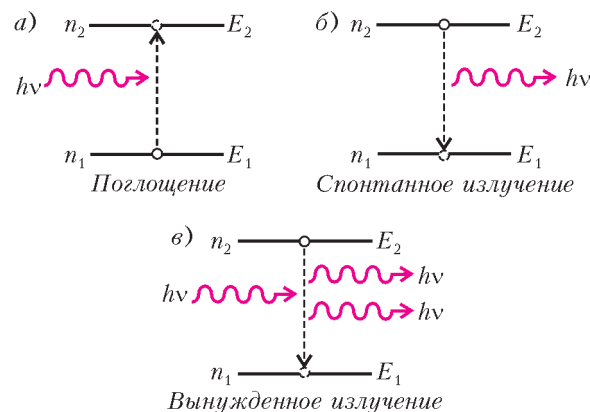


Рис. 1. Двухуровневая квантовая система

простоты рассматривались два уровня с энергиями E_1 , соответствующей основному состоянию, и E_2 , соответствующей возбужденному состоянию (рис.1). При взаимодействии с фотоном с энергией $h\nu = E_2 - E_1$, где h – постоянная Планка, а ν – частота света, атом переходит из основного состояния в возбужденное с поглощением фотона (см. рис. 1, а). Из возбужденного состояния атом может возвратиться в основное состояние с испусканием фотона. Такой процесс Эйнштейн назвал *спонтанным излучением* (см. рис. 1, б), поскольку он происходит сам по себе с определенной вероятностью. Но Эйнштейн предположил, что в основное состояние атом может перейти и под действием внешнего фотона. Этот процесс Эйнштейн назвал *вынужденным излучением* (см. рис. 1, в). Причем испускаемый фотон в точности идентичен тому, который его вызывает (частота, направление, поляризация). Таким образом, вместо одного фотона получаются два точно таких же. В случае многих атомов возникает принципиальная возможность «размножения» фотонов, т.е. усиления света, взаимодействующего с соответствующей системой атомов. Это – ключевой момент для реализации лазера.

Однако, фотоны вынужденного излучения также поглощаются атомами, находящимися в основном состоянии. Для работы генератора необходимо, чтобы усиление превышало потери (поглощение и уход фотонов за пределы излучаемой среды). Но в обычных условиях поглощение превосходит усиление. Причина в том, что число фотонов, испускаемых в результате вынужденного излучения, и число поглощаемых фотонов определяются числом атомов, находящихся на соответствующих уровнях, т.е. населенностью уровней. В условиях теплового равновесия зависимость населенностей от температуры описывается формулой Больцмана

$$n_2 = n_1 e^{-\frac{E_2 - E_1}{kT}},$$

где n_2 и n_1 – населенности верхнего и нижнего уровней с энергиями E_2 и E_1 соответственно, T – абсолютная температура, k – постоянная Больцмана. Из этой формулы видно, что при повышении температуры растет населенность верхнего уровня, хотя она тем меньше, чем больше его энергия, т.е. чем выше он расположен над основным уровнем. Однако

населенность верхнего уровня остается меньше населенности нижнего. Соответственно, при тепловом равновесии поглощение фотонов с энергией $h\nu = E_2 - E_1$ будет превалировать над вынужденным излучением. Отметим, что помимо атомов, указанные процессы могут также происходить в молекулах, ионах, полупроводниках.

Для того чтобы получить усиление за счет вынужденного излучения, необходимо, чтобы населенность верхнего уровня превосходила населенность нижнего. Требуется вывести систему из теплового равновесия путем некоторого внешнего воздействия так, чтобы населенность верхнего уровня оказалась выше населенности нижнего. Такое состояние называется *инверсной населенностью*, а вещество, в котором она получается, – *активной средой*.

Впервые инверсная населенность в молекулах аммиака и генерация электромагнитных волн с помощью вынужденного излучения были получены в радиодиапазоне частот Ч.Таунсом (США), Н.Г.Басовым и А.М.Прохоровым (СССР). Созданный ими прибор получил название *мазера*, или *молекулярного генератора*. Вскоре после этого Т.Майман (США) создал прибор, работающий в видимом диапазоне, – *лазер*.

Рассмотрим на примере первого лазера, использующего кристалл рубина, как можно осуществить инверсную населенность. При этом отметим, что в реальных веществах энергетические уровни обычно имеют некоторую ширину, т.е. им соответствует некоторый разброс энергии. Соответственно, переходы между такими широкими уровнями происходят не на фиксированной частоте ν , а с некоторым разбросом частоты $\Delta\nu$, т.е. в виде спектральных линий. Более того, многие уширенные уровни могут сливаться, образуя широкие зоны энергии. Это проявляется в широких полосах спектров излучения и поглощения.

Кристалл рубина представляет собой кристаллическую окись алюминия (Al_2O_3 корунд) с малой примесью ионов хрома (не более 5%), которые и придают рубину розовый цвет. Спектроскопические исследования показали, что эти ионы имеют систему энергетических состояний, упрощенная схема которой показана на рисунке 2. Рубин поглощает свет в очень широкой полосе сине-зеленой области спектра и испускает свет (люминесценция) в виде довольно узкой спектральной линии с максимумом на длине волны 694,3 нм. При этом эффективность процесса переда-

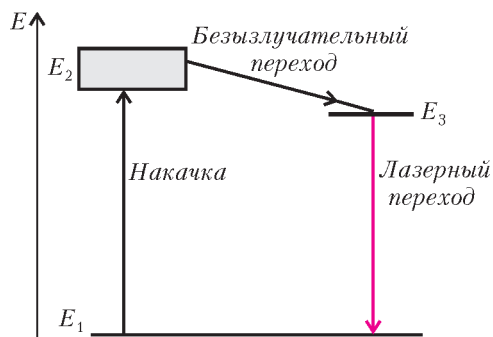


Рис. 2. Упрощенная схема уровней рубина

чи энергии поглощенного света свету люминесценции оказалась очень высокой – практически каждый фотон поглощенного света превращается в фотон люминесценции. Этот процесс происходит следующим образом (см. рис.2). После поглощения света происходит переход из основного состояния 1 в широкую область энергий возбуждения 2, из которой эта энергия быстро передается на довольно узкий уровень 3. Это так называемый безызлучательный переход, поскольку он не сопровождается испусканием света. Возбужденные ионы хрома могут находиться (жить) в состоянии 3 довольно долго, около 3 мс, прежде чем возвратятся в основное состояние с испусканием фотона люминесценции. Это так называемый метастабильный переход.

Таким образом, при освещении кристалла рубина сине-зеленым светом происходит обеднение основного уровня 1 с накоплением возбужденных ионов на уровне 3. Если интенсивность возбуждающего света достаточно высока, то населенность уровня 3 может оказаться большей, чем населенность уровня 1. Возникнет инверсная населенность, нужная для получения усиления. Эта схема получения инверсной населенности называется трехуровневой системой. Ее недостатком является необходимость перевода с основного уровня более половины частиц, что требует высокой интенсивности возбуждающего излучения (рубин освещался с помощью мощной импульсной лампы).

Более эффективной является четырехуровневая система создания инверсной населенности, изображенная на рисунке 3. Между основным и метастабильным уровнями находится дополнительный уровень 4,

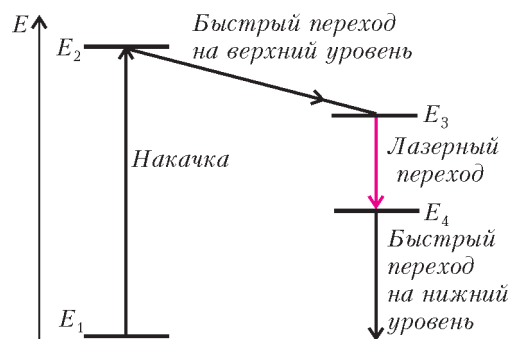


Рис. 3. Четырехуровневая система создания инверсной населенности

с которого происходит быстрый переход на основной уровень. Если этот дополнительный уровень расположен достаточно высоко над основным, то, согласно формуле Больцмана, его населенность будет невысока и для получения инверсной населенности по отношению к нему потребуются меньшая населенность метастабильного уровня. Это, в свою очередь, приведет к уменьшению мощности возбуждающего света (накачки). Современные лазеры работают, как правило, по такой четырехуровневой схеме накачки.

Итак, мы имеем инверсную населенность, необходимую для получения усиления за счет вынужденного излучения. Но для генерации требуется еще положительная обратная связь. Для ее осуществления необхо-

димому вернуть в активную среду излучение в нужной фазе. Это можно сделать с помощью зеркал. Пусть среда с инверсной населенностью (активная среда) имеет длину l , тогда при прохождении через нее света с интенсивностью I_0 интенсивность будет расти в геометрической прогрессии: $I = I_0 e^{\alpha l}$, где α – коэффициент, характеризующий рост интенсивности за счет усиления. Поместим теперь активную среду между двумя параллельными зеркалами с коэффициентами отражения R_1 и R_2 (рис. 4, а). Посмотрим,

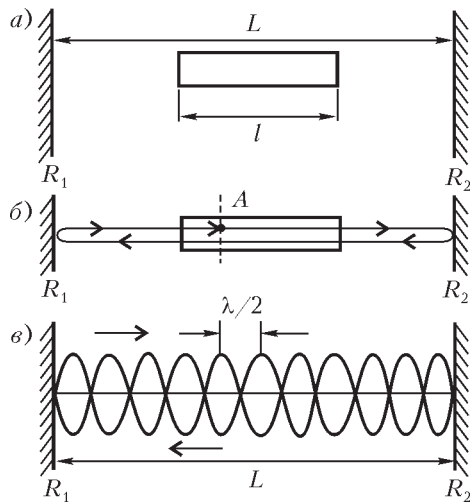


Рис. 4. Схема создания положительной обратной связи с помощью двух параллельных зеркал: а) расположение зеркал и активной среды; б) схема обхода светом пути между зеркалами; в) стоячие волны в резонаторе

как изменится интенсивность света I_0 после полного обхода пути между зеркалами (рис.4,б) из точки А. После двух отражений и двойного прохождения слоя активной среды интенсивность станет $I_0 R_1 R_2 e^{2\alpha l}$. Генерация получается при условии, что интенсивность возвращенного света не меньше начальной интенсивности, т.е. если $I_0 R_1 R_2 e^{2\alpha l} \geq I_0$, где знак равенства означает условие порога генерации. Обычно величина $\alpha l \ll 1$, следовательно, $e^{\alpha l} \approx 1 - \alpha$, тогда условие порога генерации принимает вид $R_1 R_2 (1 - 2\alpha l) = 1$.

Однако надо иметь в виду, что при последовательных обходах волны станут интерферировать. Результат интерференции зависит от разности фаз после отражений, которая определяется расстоянием между зеркалами. Для тех волн, длины которых целое число раз укладываются на длине между зеркалами, интерференция приведет к сложению амплитуд волн, т.е. к конструктивной интерференции (рис.4,в). Именно для этих волн сможет выполняться условие порога генерации. Напротив, волны с другой длиной будут ослабляться. Таким образом, система двух параллельных зеркал является *резонатором*, причем резонансные длины волн $\lambda_{\text{рез}}$ определяются расстоянием между зеркалами: $n\lambda_{\text{рез}}/2 = L$, где L – расстояние между зеркалами, а n – целое число. Соответствующие частоты $\nu_n = nc/(2L)$ называются *модами оптического резонатора*. Поскольку $\lambda \ll L$, существует множество мод, причем частотный интервал между соседни-

ми модами равен $\Delta\nu = c/(2L)$. Отметим, что использовать систему двух параллельных зеркал в качестве резонатора электромагнитных волн предложил и продемонстрировал А.М.Прохоров. В оптике система двух зеркал известна как интерферометр Фабри–Перо. Он используется в качестве прибора с высоким спектральным разрешением – за счет многолучевой интерференции лишь узкие линии проходят через него. Резонатор лазера часто называют резонатором Фабри–Перо.

Обычно в лазерах расстояние между зеркалами составляет около 1 м, и межмодовый интервал оказывается значительно меньше ширины линии усиления активной среды. Поэтому условие генерации выполняется для многих мод, частоты которых попадают в линию усиления, как показано на рисунке 5. Важно,

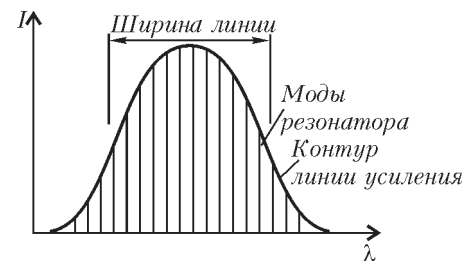


Рис. 5. Линия усиления активной среды и моды резонатора, которые умещаются в пределах ширины линии

что волны всех мод распространяются в одном направлении – перпендикулярном плоскости зеркал. Это объясняет высокую направленность пучка излучения лазера.

Итак, с помощью резонатора можно осуществить положительную обратную связь и получить генерацию на оптических частотах. Поскольку условие самовозбуждения может выполняться для многих мод, лазер дает излучение на многих эквидистантно расположенных, т.е. находящихся на одинаковых расстояниях друг от друга, частотах. Такой режим работы лазера называется *многомодовой генерацией*. Ширина линии спектра в одной моде чрезвычайно мала, потому что при многолучевой интерференции и усилении происходит обострение зависимости результирующей амплитуды от длины волны. Для того чтобы получить лазерное излучение высокой монохроматичности, надо заставить лазер генерировать излучение лишь на одной моде. Такой режим работы лазера называется *одномодовой генерацией*. С целью достижения этого режима в резонатор вводят специальное устройство – еще два зеркала с малыми коэффициентами отражения и расстоянием между ними, меньшим L . Получается дополнительный резонатор с большим интервалом между его модами. Их резонансы накладываются друг на друга, и генерация происходит лишь на совпадающих резонансах. Частотный интервал между ними может быть сравнимым с шириной линии усиления. Это устройство называют *селектором мод*. Оно позволяет получить генерацию лишь на одной моде с высокой монохроматичностью лазерного излучения.

Однако способность лазера испускать излучение на многих эквидистантных частотах позволяет получать

лазерное излучение в виде чрезвычайно коротких импульсов, а также создавать исключительно точные часы. Но об этом будет рассказано дальше.

Типы лазеров

После создания первых лазеров на рубине началась интенсивная и весьма плодотворная работа по созданию и исследованию новых типов лазеров. Укажем некоторые из них, получившие широкое распространение.

Лазеры на люминесцентных кристаллах, стеклах и растворах красителей. Наряду с рубином используются и другие кристаллы, например сапфир (кристаллическая окись алюминия с ионами титана). Отличительной особенностью этого лазера является исключительно широкая полоса усиления. Эта особенность крайне важна для генерации предельно коротких импульсов лазерного излучения.

Используются также стекла с примесью некоторых элементов в виде ионов, например некоторых редкоземельных элементов. Достоинством этих материалов является то, что они обладают высоким оптическим качеством (отсутствие всяких включений, часто присутствующих в кристаллах), из них можно изготавливать детали лазера практически любых размеров.

Также оказалось возможным использовать растворы некоторых люминесцирующих красителей. Элементом лазера в этом случае является не стержень с отполированными торцами, а кювета – цилиндрическая трубка с плоскопараллельными окошками, заполненная раствором красителя. Важной особенностью этих красителей является очень большая ширина полосы усиления (так же, как и у сапфира). Благодаря этому удалось создать новый тип лазера с плавной перестройкой длины волны излучения. В современных лазерах резонатор часто представляет собой не только два зеркала, но и довольно сложную оптическую систему между ними. Выше говорилось о селекторе мод. Так вот, если в резонатор помещается еще устройство, основанное на явлении *дисперсии* (призма или дифракционная решетка) и отклоняющее лучи в зависимости от длины волны, то параллельность зеркал обеспечивается лишь для узкой области длин волн, причем ее можно плавно менять наклоном одного из зеркал. Получается так называемый *селективный резонатор*. В результате лазер становится источником излучения с очень узкой спектральной линией, длину волны которой можно плавно регулировать. Такие лазеры играют важную роль в спектроскопии.

Полупроводниковые лазеры. Инверсную населенность можно также получать в зонах полупроводников с помощью электрического тока. В результате возникает вынужденное излучение на *излучательных переходах* полупроводника. Появились *полупроводниковые лазеры*, или, как их теперь называют, *лазерные диоды*. Эти лазеры непосредственно преобразуют электрический ток в лазерное излучение с очень высоким КПД, превышающим 50%. Кроме того, их отличают весьма малые размеры (порядка миллиметра).

Благодаря этим особенностям они нашли широкое применение (лазерные принтеры, CD и DVD системы, указки и др.). За работы по созданию лазеров этого типа российский физик Ж.И.Алферов в 2000 году был награжден Нобелевской премией. В настоящее время эти лазеры часто используются как источники накачки других твердотельных лазеров, в частности волоконных лазеров. В результате были созданы достаточно компактные и эффективные лазерные установки с мощностью лазерного излучения до десятков киловатт. Они начинают находить все большее применение в автомобильной и авиационной промышленности.

Волоконные лазеры. Важно отметить, что развитие современной оптики привело к появлению нового устройства, а именно *волоконных световодов (оптических волокон)*, основанных на явлении полного внутреннего отражения. На рисунке 6 поясняются

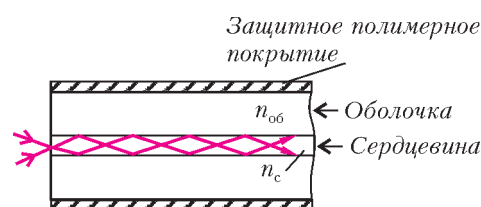


Рис. 6. Оптическое волокно

особенности оптического волокна. Оно представляет собой тонкую нить (сердцевина) из одного сорта стекла, окруженную стеклом другого сорта. Показатель преломления стекла сердцевинки несколько больше показателя преломления оболочки. В результате свет, распространяющийся в сердцевине, испытывает полное внутреннее отражение на границе сердцевина-оболочка и практически без потерь может проходить огромные расстояния до десятков и сотен километров. На этом основана волоконно-оптическая связь, линии которой уже покрыли весь земной шар.

Если в стекло сердцевинки вводятся люминесцирующие добавки (ионы редкоземельных элементов), то при соответствующем возбуждении источником накачки в сердцевине может получиться активная среда. Таким источником накачки обычно является излучение лазерного диода. Получается волоконный лазер, который имеет ряд очень важных преимуществ. Поскольку излучение распространяется по световоду, его изгиб не влияет на работу лазера. Не требуется точная настройка зеркал на параллельность, и лазер практически не чувствителен к внешним механическим воздействиям. Можно свернуть волокно в катушку, что делает лазер весьма компактным. По существу, активная среда волоконного лазера представляет собой цилиндр диаметром в несколько микрометров и длиной до нескольких метров. Это означает, что тепло, которое выделяется в активной среде при ее накачке, передается в материал внешней оболочки через большую поверхность и в значительный объем (диаметр оболочки в десятки раз больше диаметра сердцевинки). Таким образом, существенно облегчается теплоотвод. Волоконные лазеры, в отличие от

традиционных твердотельных лазеров, не требуют водяного охлаждения.

Газовые лазеры. В этих лазерах активная среда получается при электрическом разряде в газах низкого давления. Главная особенность этих лазеров – в узких линиях лазерного перехода, что способствует получению чрезвычайно высокой монохроматичности лазерного излучения. Удаётся получать линии лазерного излучения шириной лишь в несколько герц. Поскольку частота лазерного излучения составляет $\nu = 10^{14} - 10^{15}$ Гц, степень монохроматичности достигает величины $\Delta\nu/\nu \approx 10^{-14}$. Благодаря этой особенности газовые лазеры находят применение в прецизионной метрологии и системах контроля, в лазерных гироскопах и сверхточных оптических часах.

Особым типом лазеров являются лазеры ультракоротких импульсов (УКИ). Их описание заслуживает отдельного рассказа.

Лазеры ультракоротких импульсов

Замечательным достижением лазерной науки стала генерация излучения в виде импульсов ультракороткой длительности, близкой к фундаментальному пределу – периоду световой волны. Иными словами, удаётся сосредоточить свет в интервале времени порядка лишь нескольких фемтосекунд ($1 \text{ фс} = 10^{-15} \text{ с}$). Трудно представить себе краткость фемтосекунды – одна фемтосекунда относится к секунде, как одна секунда относится к 32 миллионам лет. Свет, скорость распространения которого, как известно, максимально возможная в природе, проходит за 1 фс расстояние в 0,3 мкм (заметим, что толщина человеческого волоса около 40 мкм).

Зачем же нужны столь короткие импульсы лазерного излучения? Одной из причин стремления сокращать длительность световых вспышек является их использование для изучения быстро протекающих явлений. Такая вспышка позволяет «заморозить» движение объекта в интервале, равном продолжительности вспышки, и произвести «мгновенное» фотографирование. В обычных условиях даже самые быстрые объекты не могут заметно сместиться за столь короткие времена. Но в микромире атомов, молекул и электронов в твердых телах существенную роль играют перемещения в масштабах микро- и нанометров. Поэтому для исследований движений в микромире нужно временное разрешение в диапазоне пико- и фемтосекунд. Лазеры УКИ как раз и дают такую возможность. Недаром изобретение лазеров фемтосекундных импульсов сравнили с изобретением микроскопа. В частности, использование таких лазеров позволило непосредственно «наблюдать» процессы образования и разрушения молекул. Эти процессы протекают за времена десятков и сотен фемтосекунд, и до появления лазеров УКИ сведения об этих процессах получались только по результатам косвенных экспериментов.

Исследования быстро протекающих явлений с помощью лазеров УКИ проводятся по следующей методике. Достаточно интенсивный лазерный импульс с

определенной длиной волны вызывает в исследуемом образце какие-то изменения в состоянии молекул. Этим изменениям соответствуют измененные спектры поглощения, которые можно зарегистрировать с помощью другого импульса на другой длине волны (в области спектра поглощения). Изменяя задержку между этими импульсами (возбуждающего и зондирующего), можно проследить, как происходит возвращение молекул в первоначальное состояние или в другое конечное состояние. Так были исследованы, в частности, реакции в растворах вроде перегруппировки молекул растворителя вокруг реагирующих молекул, переходы электрона или протона из одной части большой молекулы в другую.

Удалось изучить детали очень важных процессов взаимодействия света с биологическими объектами. Прежде всего, это фотосинтез – основа жизни на земле и работа светочувствительных клеток глаза. Благодаря ультракороткой длительности импульсов было установлено, как происходят самые первые этапы химических реакций, следующих за поглощением фотонов. Аналогично были изучены многие тонкие явления, исследовать которые иными способами затруднительно или попросту невозможно.

Более того, фемтосекундная длительность импульса излучения дает возможность воздействовать извне на быстротекающие процессы фотохимии и, тем самым, изменять ход этих химических реакций. Если второй импульс имеет достаточно высокую интенсивность и нужную длину волны, то его воздействие в определенный момент может привести к образованию других продуктов химической реакции. Иными словами, таким способом можно заставить химическую реакцию протекать по другому каналу. Эта и аналогичные операции получили название «фемтохимии». Отметим, что за работы в области исследований химических реакций с помощью фемтосекундных лазеров американский ученый египетского происхождения А.Зевейл в 1999 году получил Нобелевскую премию по химии.

Была также изучена динамика электронов в полупроводниковых материалах. Это дает возможность разрабатывать более совершенные оптоэлектронные устройства для быстрого управления сигналами, что требуется для компьютеров и телекоммуникаций.

Короткая длительность импульса лазерного излучения проявляется и в другой области. При сокращении временного интервала, в котором сосредоточена энергия, получается возрастание мощности, а при фокусировании излучения – интенсивности. Высокая интенсивность фундаментально изменяет оптику. Оптика является, по существу, учением о том, как электроны откликаются на свет. Все оптические свойства веществ являются следствием взаимодействия света с электронами в материале. В световой волне электрические и магнитные поля совершают колебания перпендикулярно друг другу и к направлению распространения. Сила со стороны электрического поля заставляет электрон колебаться с той же частотой, но не обязательно с фазой световой волны. 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. Их сложение и определяет то, как световая волна распространяется через материал и, тем самым, сообщает соответствующие ему оптические свойства (например, показатель преломления). В классической оптике амплитуды колебаний достаточно малы, и оптические свойства материалов практически не зависят от интенсивности света. Но при высоких интенсивностях, присущих лазерному свету, такая зависимость начинает проявляться – получается *нелинейная оптика*.

Сравнительно небольшая энергия лазерного излучения в несколько джоулей, «сосредоточенная» в нескольких фемтосекундах, дает импульсную мощность порядка петаватта ($1 \text{ ПВт} = 10^{15} \text{ Вт}$). В настоящее время созданы лазерные установки с такой мощностью. Их излучение можно сфокусировать и получить интенсивность около 10^{21} Вт/см^2 . Огромная величина интенсивности проявляется в уникальных свойствах излучения. Хорошо известно, что свет оказывает давление на отражающую или поглощающую поверхность. Величина этого давления определяется интенсивностью и обычно крайне мала. В начале XX века А.Н.Лебедев провел исключительно тонкие эксперименты, чтобы обнаружить это давление от самых ярких в то время обычных источников. Но при интенсивности 10^{21} Вт/см^2 давление света достигает 300 Гбар, что превосходит давление в центре Солнца! Такое давление наряду с другими эффектами взаимодействия света с веществом в принципе дают возможность ускорять вещество до $10^{22} g$. Разумеется, вещество при этом превращается в плазму, а само взаимодействие продолжается менее длительности импульса, т.е. нескольких фемтосекунд.

Таким образом, лазеры УКИ позволяют создавать экстремальные физические условия, подобные тем, что могут быть в недрах звезд или вблизи «черных дыр», а также при ядерных взрывах. Известно, что конкретной величине интенсивности света соответствуют определенные значения электрического и магнитного полей в электромагнитной волне. При интенсивности 10^{21} Вт/см^2 напряженность электрического поля в световой волне достигает 10^{12} В/см , что намного превосходит величину атомной напряженности поля, т.е. напряженности кулоновского поля на орбите электрона в атоме водорода, равной $5 \cdot 10^9 \text{ В/см}$. Это означает, что с атомов срываются и ускоряются внешние электроны. Этот процесс лежит в основе генерации импульсов уже аттосекундной длительности ($1 \text{ ас} = 10^{-18} \text{ с}$) с длинами волн в рентгеновском диапазоне (несколько нанометров).

При интенсивностях света свыше 10^{18} Вт/см^2 отклик электронов на свет кардинально изменяется. Скорости электронов

приближаются к скорости света, и магнитное поле начинает играть существенную роль (действует сила Лоренца). Становятся значительными релятивистские эффекты, например увеличение массы в зависимости от скорости. Оно влияет и на фазу, и на амплитуду колебаний. Электрон уже переизлучает не только на частоте света, но и на многих гармониках этой частоты. Под действием силы магнитного поля на электрон происходит такое искривление его траектории, что он получает значительный импульс в направлении светового пучка. Режим взаимодействия столь интенсивного света с веществом называется *релятивистской оптикой*. Ее следствиями является возможность генерации высших гармоник лазерного излучения вплоть до мягкого рентгена и возможность ускорения электронов до энергий в десятки мегаэлектронвольт.

Принцип действия лазера ультракоротких импульсов

Как же удастся получать столь короткие и мощные импульсы лазерного излучения? Оказывается, предельно короткую длительность импульса света, приближающуюся к периоду световой волны, можно получить благодаря волновой природе света. Известно, что сложение двух волн с близкими частотами приводит к явлению, которое называется биением колебаний (рис.7). Период биений определяется разностью частот. В оптике световые волны характеризуются не амплитудой, а *интенсивностью*, которая определяется квадратом амплитуды, усредненным по периоду волны. В случае световых волн их сложение приводит к периодическому изменению интенсивности. При сложении трех и более волн с одинаковой разностью частот между соседними волнами результат уже будет зависеть от соотношения фаз. Если амплитуды всех волн совпадают, сложение приведет к образованию ярко выраженного максимума. На рисунке 8 показан результат сложения пяти волн с частотами $f_0, 2f_0, 3f_0, 4f_0, 5f_0$ и фазами, обеспечивающими совпадение их амплитуд.

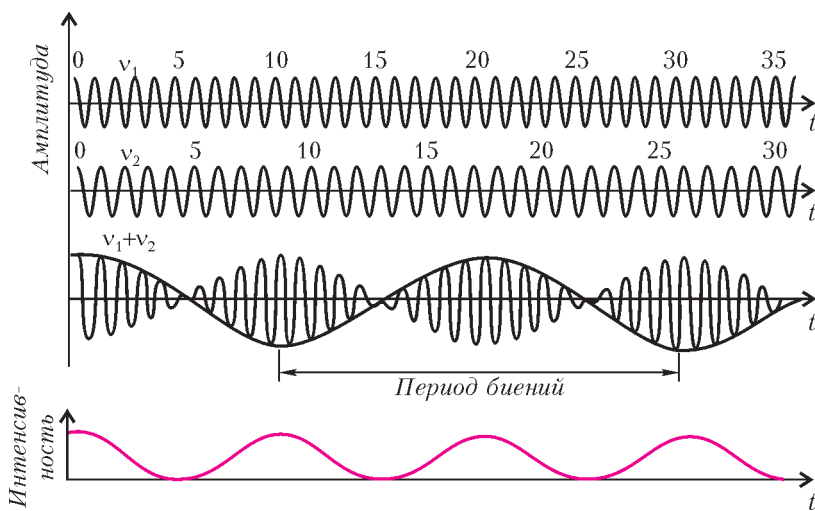


Рис. 7. Биения двух волн

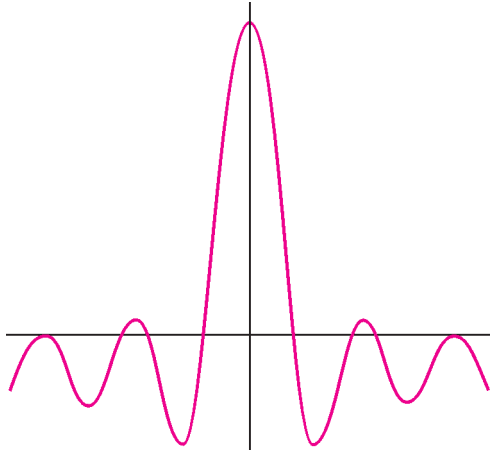


Рис. 8. Результат сложения пяти волн

Из математики известно, что периодическую функцию произвольной формы можно представить в виде ряда Фурье, т.е. суммой синусоид с эквидистантными частотами. 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 (синтез) и получить периодическую последовательность импульсов, причем их форма, а значит, и длительность будут определяться числом сложенных волн. Иными словами, можно провести синтез периодической последовательности импульсов путем сложения многих непрерывных волн.

Как было сказано выше, резонатор лазера обладает набором мод с равноудаленными частотами. Генерация происходит на модах, попадающих в полосу усиления активной среды, и лазер способен излучать много волн на этих частотах. Это обстоятельство является ключевым для получения импульсов ультракороткой длительности. Лазер УКИ по существу является синтезатором, в котором получается достаточно много волн с нужными частотами, фазами и амплитудами. Из формул преобразования Фурье следует, что для получения импульса длительностью τ требуется, чтобы разность между максимальной и минимальной частотами (ширина спектра) $\Delta\nu$ отвечала соотношению $\tau \cdot \Delta\nu \approx 1$. Это означает, например, что для получения импульса длительностью 10 фс требуется ширина спектра излучения порядка 100 нм. В настоящее время имеются активные среды с огромными ширинами полосы усиления. Так, кристалл сапфира имеет полосу усиления от 650 нм до 1000 нм, что в принципе позволяет получать длительность импульса короче 4 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. При длине резонатора около 1 м в полосу усиления сапфира попадают около миллиона мод. Таким образом, лазер, работающий с активной средой с достаточно большой шириной полосы усиления, способен испус-

кать большое число волн с эквидистантными частотами, сложение которых может дать импульс с длительностью, определяемым соотношением $\tau \cdot \Delta\nu \approx 1$.

Давайте рассмотрим излучение, которое получается в результате сложения большого числа волн. Это удобно сделать с помощью компьютера. Пусть каждая волна описывается выражением $A(t) = A_0 \sin(\omega t + \varphi)$, где A_0 – амплитуда, ω – частота, φ – фаза (точнее – начальная фаза). Сложим 100 волн с равными амплитудами и с частотами, отличающимися на определенный интервал $\Delta\omega$, получим $A(t) = \sum A_0 \sin((\omega + n\Delta\omega) + \varphi_n)$ (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 квадрату амплитуды волны, результат сложения возведем в квадрат. Таким образом, мы получим изменение интенсивности во времени. На рисунке 9,а приведен пример такого сложения. Он, по существу, моделирует многомодовое излучение при условии, что в резонаторе отсутствует какое-либо устройство, регулирующее фазы мод (режим свободной генерации). Мы видим, что изменение интенсивности со временем представляет собой набор случайных выбросов интенсивности от нуля до некоторой максимальной величины, причем это изменение повторяется с периодом $T = 2\pi/\Delta\omega$. Это так называемые *флуктуационные импульсы* многомодового лазерного излучения. Отметим, что их длительность определяется шириной спектра, охватывающего все моды, т.е. может быть очень малой.

Теперь подобным образом сложим те же волны, но с вполне определенными фазами, например равными нулю (рис.9,б). Вместо хаотического изменения интенсивности во времени теперь получается периоди-

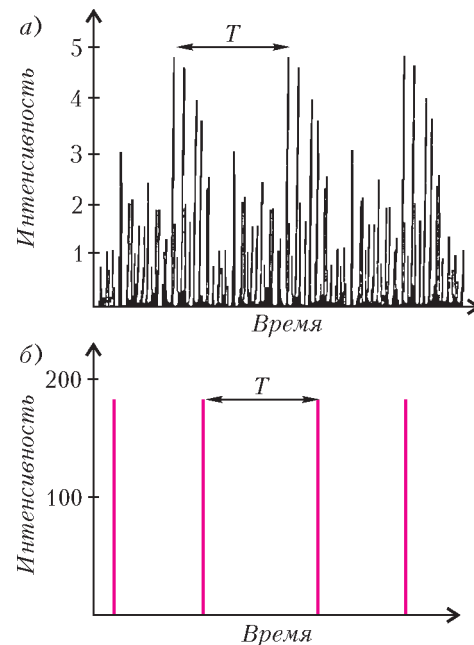


Рис. 9. Примеры сложения ста волн с равными амплитудами и частотами, отличающимися на постоянный интервал: а) фазы распределены случайным образом; б) фазы полностью согласованы

ческая последовательность одиночных на периоде импульсов, длительность которых определяется шириной спектра.

Значит, чтобы получить генерацию УКИ в результате сложения многих мод, необходимо, чтобы их фазы были согласованы. Это удается сделать в режиме работы лазера, который называется *синхронизацией мод*. 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 9,а и 9,б имеют разные масштабы по оси ординат. При согласованных фазах интенсивность получающегося одиночного импульса в огромное число раз превосходит интенсивность флуктуационных импульсов.

Теперь снова обратимся к схеме взаимодействия излучения с фотонами (см. рис.1). Из нее следует, что при поглощении света происходит обеднение нижнего уровня. Значит, поглощение станет уменьшаться по мере увеличения интенсивности света (числа фотонов). В случае обычных источников света их интенсивность слишком мала, чтобы такой эффект проявлялся. Для лазерного излучения изменение коэффициента пропускания в зависимости от интенсивности – обычный эффект нелинейной оптики. Вещества, способные изменять свой коэффициент поглощения в зависимости от интенсивности, называются *просветляющимися поглотителями*. Вот с их помощью и удается осуществить согласование фаз, которое называют *синхронизацией мод*, и получить генерацию УКИ.

Если слой такого поглотителя введен в резонатор лазера, то усиление в нем будет равно усилению в активной среде минус поглощение в просветляющемся поглотителе. При выполнении условия самовозбуждения (полный коэффициент усиления больше 1) начнется генерация на многих модах с образованием флуктуационных импульсов. Поскольку поглощение уменьшается с ростом интенсивности, наиболее интенсивные флуктуационные импульсы будут усиливаться сильнее менее интенсивных, и этот процесс будет развиваться по экспоненте. На рисунке 10 показан процесс такого развития, полученный путем компьютерного моделирования. Излучение, состоящее из флуктуационных импульсов, последовательно пропускается через активную среду. Видно, как происходит формирование одиночного на периоде следования импульса, что и свидетельствует о синхронизации мод. По существу, лазер «предпочитает» концентрировать энергию в таком импульсе, и тем самым достигается *самосинхронизация мод*.

Свойствами просветляющихся поглотителей обладают растворы некоторых красителей, которые и были использованы в лазерах УКИ. Но у них имеются

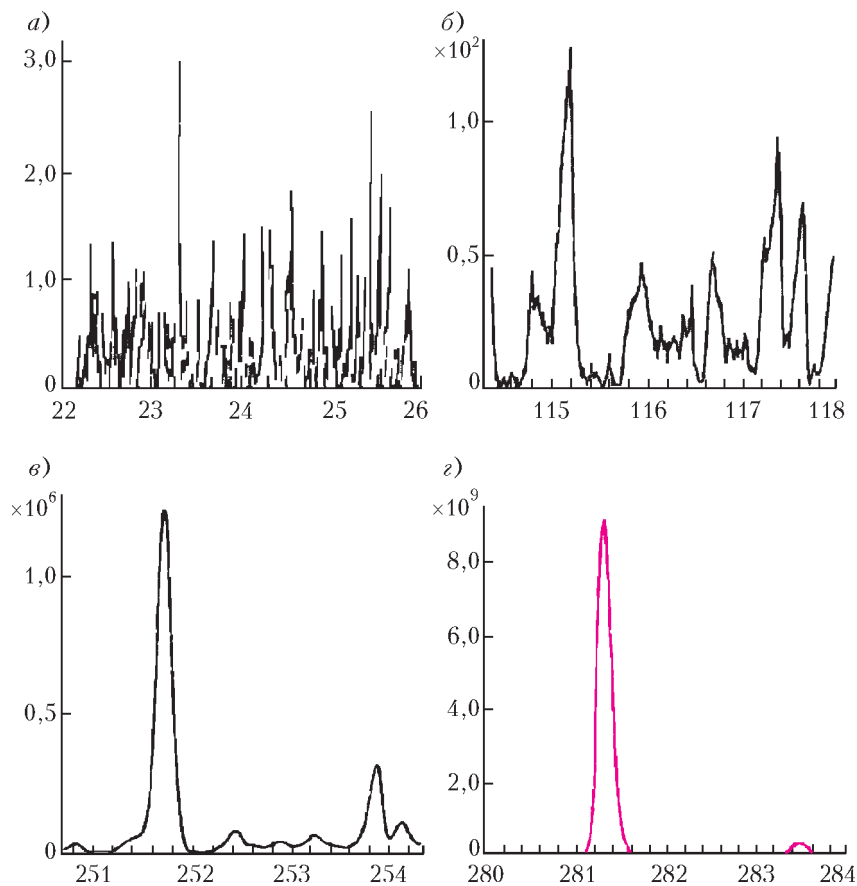


Рис. 10. Компьютерное моделирование процесса формирования УКИ в лазере с просветляющимся поглотителем

определенные недостатки. А именно, после воздействия интенсивным импульсом это состояние остается в течение некоторого времени после прохождения импульса (это время требуется для того, чтобы снова восстановилась первоначальная населенность основного уровня). Это означает, что после прохождения интенсивного импульса за ним может «проскочить» менее интенсивный, и стройная картина выделения одиночного УКИ нарушится. Для преодоления этого недостатка был изобретен искусственный просветляющийся поглотитель, основанный на другом явлении нелинейной оптики – эффекте *самофокусировки*. Он основан на зависимости показателя преломления прозрачного вещества от интенсивности проходящего через него света: $n = n_0 + n_2 I$, где n_0 – показатель преломления для слабых интенсивностей, а n_2 – коэффициент для определенного вещества. Этот эффект проявляется лишь при больших интенсивностях, характерных для излучения лазеров.

Пусть через слой вещества распространяется, как показано на рисунке 11,а, пучок лазерного излучения, интенсивность которого максимальна в центре и спадает до нуля на краях. Тогда, если $n_2 > 0$, получится искривление волнового фронта, и лучи станут отклоняться к оси пучка. Иными словами, при достаточной интенсивности плоскопараллельный слой прозрачного вещества превратится в собирающую линзу, причем ее оптическая сила будет зависеть от макси-

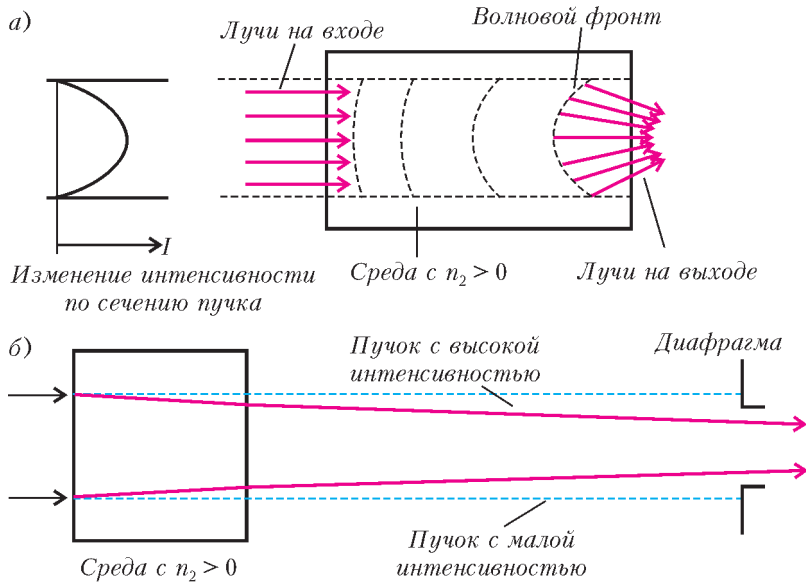


Рис. 11. а) Эффект самофокусировки; б) самофокусировка в сочетании с диафрагмой

мальной интенсивности в пучке. Пусть теперь за этим слоем располагается диафрагма (рис.11,б). Легко видеть, что при высокой интенсивности в пучке свет целиком пройдет через диафрагму, а при низкой интенсивности будет частично задержан ею. Таким образом, эффект самофокусировки в сочетании с диафрагмой действует подобно просветляющемуся поглотителю.

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. При прохождении света через вещество скорость определяется как *фазовая скорость*: $v_{\text{фаз}} = c/n$. Поскольку показатель преломления n за-

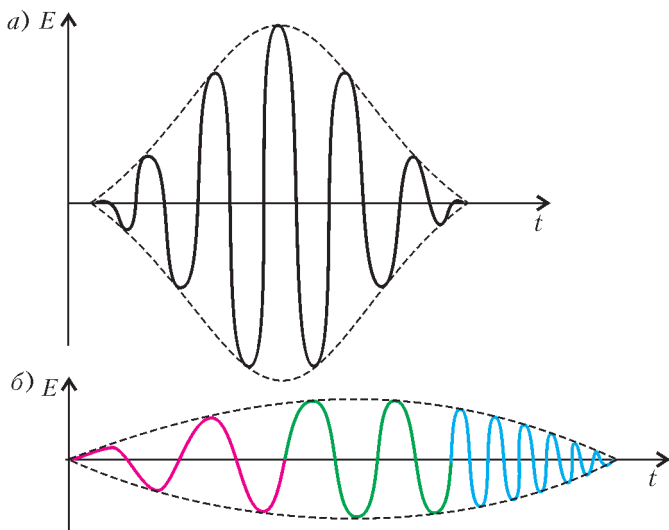


Рис. 12. Эффект дисперсии: а) начальная форма импульса; б) импульс после прохождения слоя вещества, обладающего дисперсией

висит от частоты, волны разных мод будут распространяться с разными скоростями, и согласование фаз нарушится. Как уже указывалось, длительность импульса связана с шириной спектра: $\tau \cdot \Delta\nu \approx 1$. Пусть теперь такой импульс широким спектром распространяется в среде, обладающей дисперсией. За счет различия в скоростях распространения форма импульса изменяется. Различные частоты как бы «идут не в ногу». Те волны, для которых показатель преломления больше, начинают 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 импульса – для которых она ниже. Поэтому в пределах увеличенной длительности получается линейное изменение частоты от времени, т.е. частотная модуляция. Рисунок 12 иллюстрирует такое изменение формы импульса, причем оно будет тем больше, чем больше длина пути в диспергирующей среде.

Таким образом, при многократных проходах импульса через активную среду в резонаторе будет получаться увеличение длительности импульса. Для компенсации этого следовало бы пропустить такой удлиненный 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 УКИ 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. На рисунке 13 показано, как пара призм может скомпенсировать дисперсию активной среды. Подбором расстояния между призмами, а также перемещением одной из них вдоль биссектрисы

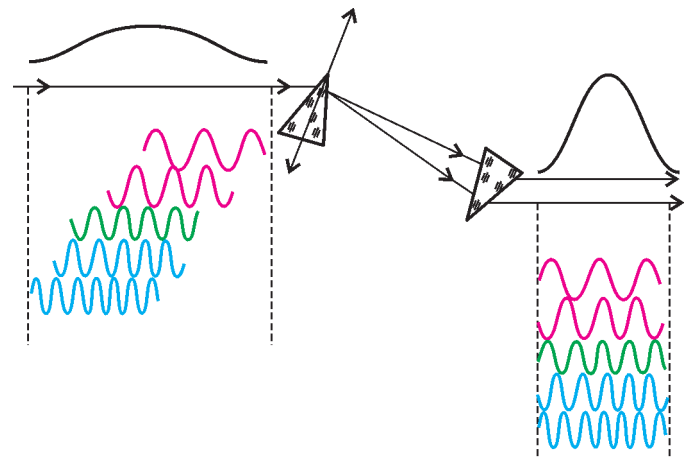


Рис. 13. Система пары призм для компенсации дисперсии

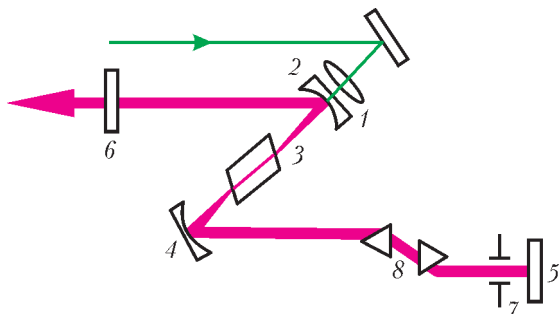


Рис. 14. Схема лазера УКИ

угла отклонения можно подобрать нужное для компенсации значение дисперсии.

В результате лазер, генерирующий фемтосекундные импульсы за счет синхронизации мод, принимает вид, показанный на рисунке 14. Пучок зеленого света лазера накачки, работающего в непрерывном режиме, фокусируется линзой (1) через зеркало (2) в кристалл сапфира (3) для достижения нужного уровня

инверсной населенности и усиления. Резонатор образован четырьмя зеркалами – двумя плоскими (5 и 6) на концах резонатора и двумя вогнутыми (2 и 4), фокусирующими лазерный свет в кристалл сапфира. Для обеспечения эффекта самофокусировки в самом кристалле сапфира вводится диафрагма (7), а для компенсации дисперсии – пара призм (8).

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). Надо сказать, что нужный для работы лазера эффект получается лишь при ограниченной средней выходной мощности, которая обычно менее 1 Вт. Это означает, что энергия в одиночном импульсе не превосходит 10 нДж.

(Продолжение следует)

ИЗ ИСТОРИИ НАУКИ

Бугенвилль

А. ВАСИЛЬЕВ

ЛУИ АНТУАН ДЕ БУГЕНВИЛЛЬ (1729 – 1811) ПРОСЛАВИЛСЯ не математикой, хотя под влиянием Д'Аламбера он в 1752 году и написал трактат по интегральному исчислению, непревзойденный по ясности и глубине изложения. В этой работе были развиты идеи Лопиталя, сформулированные полувеком ранее. Здесь также были изложены новейшие представления дифференциального исчисления, что привело к признанию Бугенвилля не только Национальной академией наук Франции, но и Королевским обществом Англии. В 1756 году Бугенвилль опубликовал второй том своих математических изысканий, однако на этом его карьера математика завершилась.

Бугенвилль прожил необычайно яркую жизнь. В 1754 году он поступил на службу в армию и сражался за независимость французских колоний в Канаде. Через семь лет он перешел на флотскую службу и в 1764 году основал французскую колонию на Мальдивах.

В 1766 году правительство Франции поручило Бугенвиллю организацию первого французского кругосветного путешествия. Целью путешествия был поиск новых земель, однако у самого Бугенвилля не было какого-то определенного мнения о существовании неизвестного континента. С одной стороны, как он писал, трудно предположить такое обилие малых остро-

вов в южной части Тихого океана без наличия южного континента. С другой стороны, он полагал, что если бы такая земля существовала, то она уже была бы открыта. В ноябре 1766 года Бугенвилль отправился в путь и через некоторое время встретился в Рио-де-Жанейро со своим вспомогательным судном, на котором находился ботаник Коммерсон. Этот ботаник открыл растение с ярко-красными плотными листьями. В честь встречи с начальником экспедиции он назвал это растение бугенвиллеей. В южной части Тихого океана Бугенвилль открыл целый ряд географических объектов, включая пролив и остров, впоследствии названные его именем.

Кругосветное путешествие сделано Бугенвилля знаменитым, он стал первым французом, обогнувшим земной шар. По возвращении на родину он был назначен личным секретарем Людовика XV. С 1779 по 1782 год Бугенвилль участвовал в операциях французского флота против англичан в Северной Америке. Во время Великой французской революции он бежал из Парижа и обосновался на своей усадьбе в Нормандии. Несмотря на свою широко известную приверженность роялизму, Бугенвилль избежал репрессий, а с приходом к власти Наполеона был удостоен сенаторства и членства в ордене Почетного Легиона.