

Н. В. КАРЛОВ и А. М. ПРОХОРОВ

ЛАЗЕРЫ

Около двух тысяч двухсот лет назад римские войска взяли греческий город Сиракузы, расположенный в Сицилии. Этот факт был бы, наверное, известен только специалистам по истории становления Римской империи, если бы при взятии Сиракуз не погиб Архимед — один из величайших физиков Земли.

Много легенд связано с личностью Архимеда, его открытиями, с обстоятельствами их появления на свет

или их применением. Большая часть этих легенд имеет под собой реальную почву. Но одна, самая красивая, — легенда об уничтожении римского флота сконцентрированным солнечным светом, — к сожалению, — чистая фантастика.

Дело в том, что законы геометрической оптики для обычных источников света говорят о невозможности сконцентрировать световую энергию в виде лучевого шнура и сфокусировать

ее на расстоянии, большем, чем размеры фокусирующего прибора. Иное дело лазеры. После возникновения квантовой электроники и создания лазеров*) появилась возможность концентрации мощных световых потоков в виде лучевых шнуров.

Слово лазер является сокращенной записью английской фразы *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, которая переводится так: усиление света путем индуцированного испускания излучения. Попробуем разобраться, что означает эта фраза. Мы знаем, что свет — это электромагнитное излучение, распространяющееся в виде волны и несущее энергию. Световая волна — быстропеременная электромагнитная волна, распространяющаяся в вакууме со скоростью $3 \cdot 10^{10}$ см/сек. Основными характеристиками волнового процесса являются: длина волны — расстояние между двумя гребнями бегущей волны и частота — величина, показывающая, сколько раз в секунду в какой-то фиксированной точке пространства возникает гребень волны. Длина световой волны λ и ее частота ν связаны со скоростью света c простым соотношением $\lambda\nu = c$.

Видимому свету соответствуют волны длиной от 0,4 мк до 0,8 мк (1 мк = 10^{-4} см) и частоты от $0,75 \cdot 10^{15}$ гц до $0,375 \cdot 10^{15}$ гц (частота 1 гц — одно колебание в секунду).

В световой волне периодические изменения в пространстве и во времени испытывают электрическое и магнитное поля, подобно тому как это происходит в радиоволне. Однако обычная световая волна, в отличие от радиоволны, не является монохроматической. О волне говорят как о монохроматической, когда периодическое изменение электрического и маг-



нитного поля волны происходит на одной строго постоянной частоте. В этом случае вся переносимая волной энергия сосредоточена на этой частоте. Такая электромагнитная волна подобна звуковой волне, создаваемой хорошим камертоном.

Частота (длина волны) светового излучения определяет цвет видимого света. Слово «монохроматическое» означает одноцветное. Поэтому если монохроматическая звуковая волна соответствует предельно чистому музыкальному тону, то монохроматическая световая волна соответствует предельно чистому цвету.

Длины волн излучений, исходящих от разных источников, могут, вообще говоря, совпадать. Если при точном совпадении частот гребень одной волны все время совпадает с гребнем другой, то происходит удвоение амплитуды результирующей волны. В этом случае говорят, что волны складываются в фазе. Фазовые соотношения между волнами характеризуют рас-

*) Квантовая электроника ведет свое начало с 1954 года, когда одновременно в СССР и в США были заложены основы этой науки. Первые лазеры появились в 1961 году. Нобелевская премия по физике 1964 года за создание квантовой электроники присуждена Н. Г. Басову, А. М. Прохорову (СССР) и Ч. Таунсу (США). — *Ред.*

положение гребней одной волны по отношению к гребням другой волны. Если это взаимное расположение остается все время неизменным, то волны называются когерентными. Слово «когерентность» буквально означает сцепленность, связность. Понятие когерентности играет большую роль и широко используется в физике.

Обычная световая волна не является монохроматической. Дело в том, что свет, который мы видим, — солнечный свет, свет люминесцентных ламп или ламп накаливания — излучается большим количеством отдельных независимых излучателей (атомов), каждый из которых испускает свет вне какой-либо связи с тем, испускают или не испускают свет его соседи. В результате такого хаотического испускания световые волны, из которых состоит наблюдаемое нами излучение, не когерентны друг другу, а результирующая световая волна не является монохроматической. Именно немонохроматичность и некогерентность обычного света препятствуют концентрации световой энергии в лучевой шнур (отсюда — невозможность построить «гиперболоид инженера Гарина»).

Мы знаем, что свет испускается атомами. Именно атомы являются теми отдельными независимыми излучателями, о которых мы только что говорили. На атомном уровне представление светового излучения в виде непрерывной световой волны несправедливо. Атом может поглощать или излучать свет только в виде определенных порций световой энергии — световых квантов. Величина энергии квантов $\epsilon = h\nu$, где $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ дж/гц — постоянная Планка, а ν — частота света.

Энергия квантов видимого света заключена в пределах от $2,5 \cdot 10^{-19}$ дж до $5 \cdot 10^{-19}$ дж. Хотя эта энергия очень мала, квантовая природа света существенно проявляется во взаимодействии света с веществом. Вместе с тем свет не утратил своей волновой природы, проявляющейся во всех тех

явлениях, где важны фазовые соотношения (сложение волн, формирование световых пучков и т. д.). Таким образом, свет обладает совокупностью волновых и корпускулярных, то есть присущих частицам, свойств.

Итак, микроизлучателями света являются атомы, дающие в обычных условиях поток квантов некогерентного излучения. Очевидно, что излучение испускается атомами, обладающими некоторой избыточной энергией, так называемыми возбужденными атомами. Но возбужденный атом неустойчив, он может самопроизвольно без каких-либо внешних причин испустить квант излучения. Акты самопроизвольного испускания происходят случайно. Такое самопроизвольное излучение носит нерегулярный, хаотический характер. Оно некогерентно. Но возможности излучения световой энергии не ограничиваются только самопроизвольными процессами. Необходимо помнить, что внутренняя энергия атомов может принимать только некоторые определенные значения. Как говорят, атом может находиться только на том или ином уровне энергии. Переходы атома с одного уровня на другой сопровождаются изменением его внутренней энергии. При переходе с нижнего уровня энергии на верхний атом поглощает энергию, при переходе с верхнего на нижний атом отдает энергию. Эти переходы, следовательно, сопровождаются либо поглощением, либо излучением света. Частота светового излучения, поглощаемого или излучаемого при переходе с уровня энергии E_1 на уровень E_2 , определяется формулой

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}.$$

Кроме самопроизвольных переходов атомов с верхнего уровня энергии на нижний, существует удивительное явление индуцированного излучения, о котором догадался А. Эйнштейн. Процесс индуцированного излучения от самопроизвольного отличается прежде всего тем, что происходит не сам по себе, а под воздействием внешнего

по отношению к атому излучения. При этом вторичные кванты неотличимы от первичных. Они точно повторяют частоту и направление распространения первичных квантов. Индуцированное излучение потому и называют индуцированным, что акты его испускания индуцируются (вызываются) внешним по отношению к атому излучением. В результате, в отличие от самопроизвольного излучения многих атомов, индуцированное излучение когерентно.

Таким образом, в оптике имеется явление, пригодное для получения когерентного излучения. Это — индуцированное излучение. Но для одного атома вероятность индуцированного излучения при переходах с верхних уровней энергии на нижние равна вероятности поглощения при переходах с нижних уровней на верхние. Для того чтобы индуцированное излучение превалировало над поглощением, надо на верхних уровнях иметь больше атомов, чем на нижних. А в условиях теплового равновесия дело обстоит как раз наоборот: на нижних уровнях энергии атомов больше, чем на верхних (рис. 1). При взаимодействии излучения с такой системой атомов произойдет следующее. Часть излучения поглотится, и часть атомов перейдет на верхний уровень энергии (рис. 2). Если же система атомов так предварительно подготовлена, что на верхнем уровне энергии атомов больше, чем на нижнем, то при взаимодействии излучения

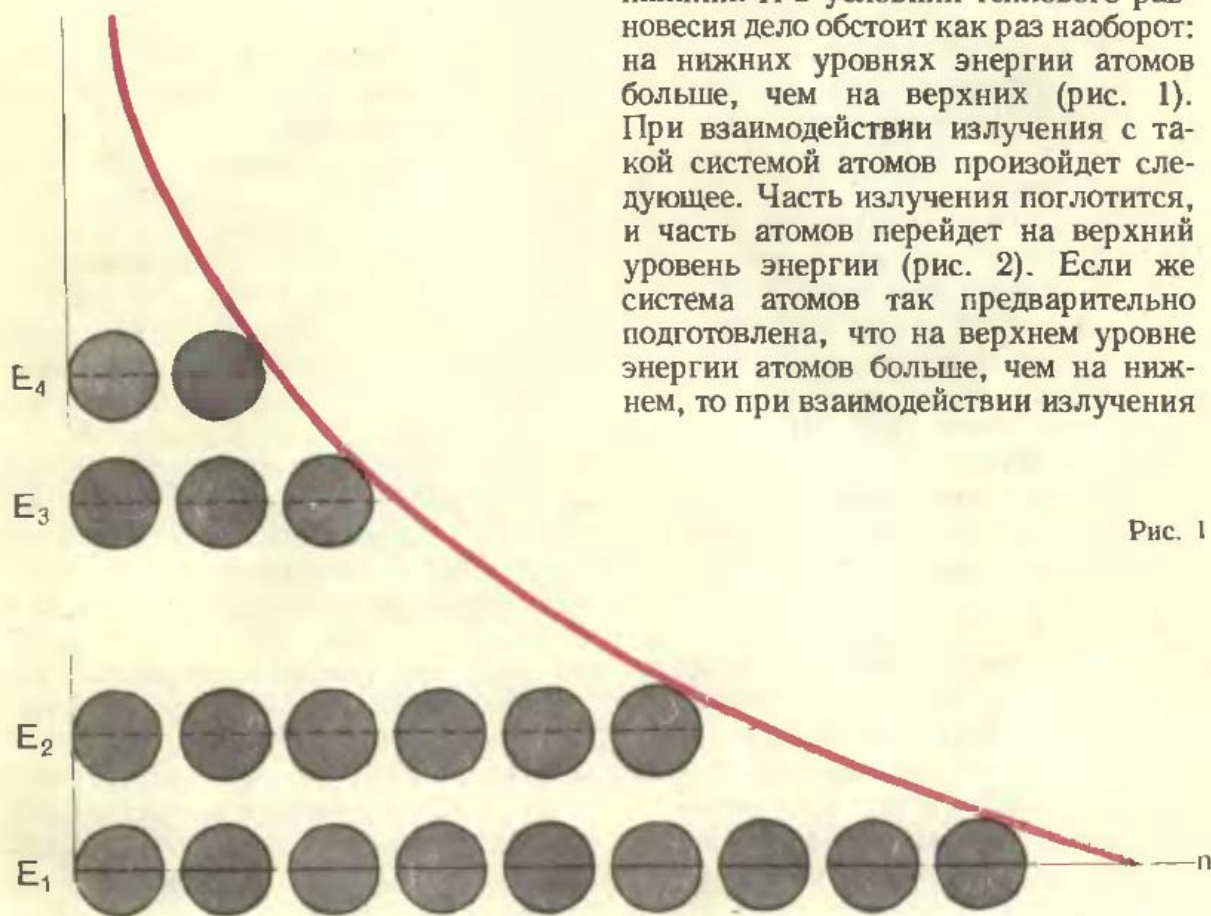


Рис. 1

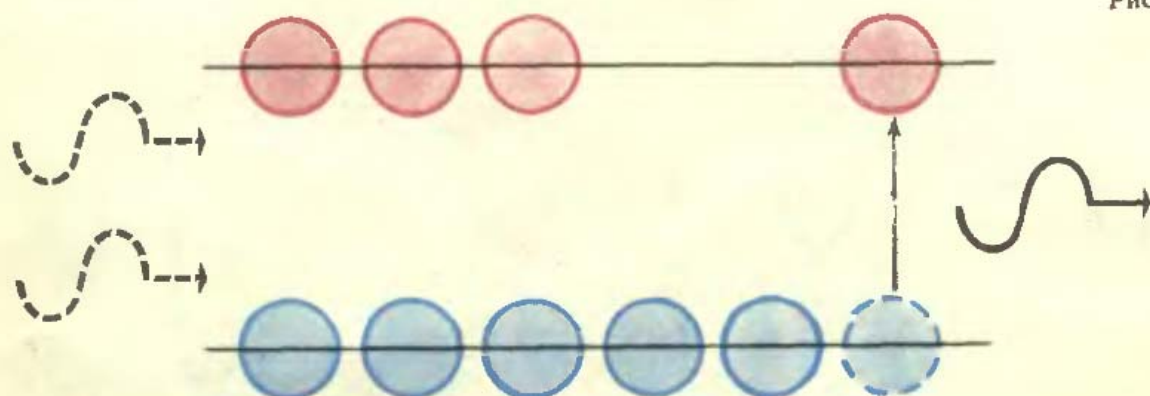


Рис. 2

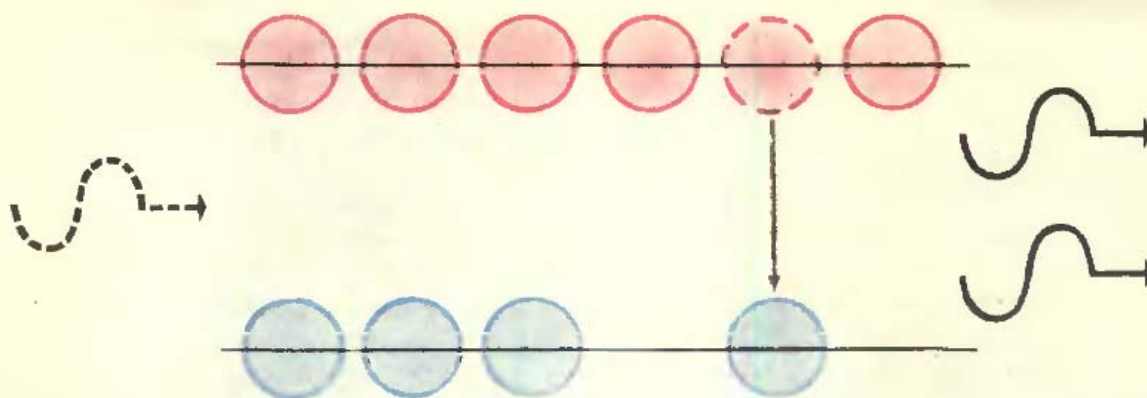


Рис. 3

с такой системой атомов в силу эффекта индуцированного испускания произойдет усиление исходного излучения, как это схематически показано на рисунке 3. В силу свойств индуцированного излучения вторичное излучение усиливает первичное, являясь точной его копией. Вместе они составляют одну волну, амплитуда которой нарастает пропорционально числу актов индуцированного испускания (рис. 4). Системы атомов, в которых хотя бы для двух уровней энергии существует такая ситуация, что верхний уровень энергии населен более нижнего, называются системами с инверсией населенностей. Слово инверсия означает перевернутость, изменение нормального порядка вещей на обратный.

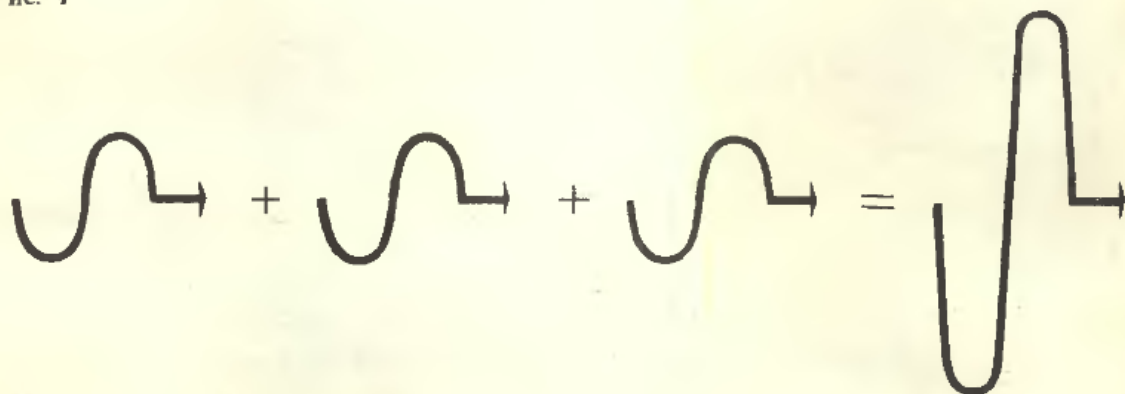
Так вот, основой квантовой электроники как науки в целом служит явление индуцированного излучения, и главным в лазерах является использование индуцированного излучения

в системах с инверсией населенностей для когерентного усиления и генерации световых волн.

Здесь следует подчеркнуть разницу между усилением и генерацией. Оптический усилитель служит для того, чтобы увеличивать напряженность электрического поля световой волны, поступающей на его вход. На выходе усилителя должна быть получена более интенсивная, но точная копия входного излучения. В этом смысле оптический усилитель полностью подобен своему предшественнику — радио-усилителю. Оптический же генератор должен быть источником оптического излучения, зарождающегося непосредственно в генераторе и выходящего из него во внешнее пространство.

Для работы оптического генератора необходима обратная связь. Она осуществляется следующим образом. Система атомов с инверсией населенностей располагается между двумя строго параллельными друг другу зеркалами.

Рис. 4



В какой-то точке между зеркалами самопроизвольно возникает излучение. Оно распространяется в сторону зеркал и по мере распространения усиливается. Дойдя до зеркал, световые волны отражаются и поворачивают назад. Если гребни отраженных волн совпадают с гребнями падающих волн, то волны усиливают друг друга. Для этого расстояние между зеркалами должно быть кратно целому числу полувольт. Обычно между зеркалами укладываются сотни тысяч полувольт. Излученная энергия накапливается в пространстве между зеркалами и воздействует на систему атомов, вызывая индуцированное излучение. Если мощность индуцированного излучения превышает мощность неизбежных потерь на нагрев зеркал, рассеяние, а также на полезное излучение во внешнее пространство, то возникает незатухающая световая волна. В силу свойств индуцированного излучения эта волна в высшей степени монохроматична. Все атомы работают синхронно. Так их заставляет работать обратная связь, осуществляемая излучением, накопленным между зеркалами.

Для применения лазеров очень важно, что при индуцированном излучении вторичные кванты повторяют не только частоту, но и направление распространения первичных квантов. В результате лазерное излучение обладает не только высокой степенью монохроматичности, но и идеальной направленностью. Таким образом, формирование светового шнура происходит автоматически.

Прежде чем перейти к описанию собственно лазеров, завершим изложение основ квантовой электроники следующей грубой аналогией. Представим себе трибуны большого стадиона, заполненные тысячами страстных болельщиков. Перед началом игры болельщики о чем-то говорят, что-то выкрикивают, но каждый независимо друг от друга. Создается сильный и ровный шум. Игра началась, все замерло. Тихо. А затем вдруг, начавшись где-то, нарастает и достигает

оглушительной силы единодушный крик «шай-бу, шай-бу». Все кричат в унисон, кричат синхронно, чем и достигается эффект, подобный лазерному.

В первом лазере был применен рубин — монокристалл окиси алюминия (Al_2O_3). В кристалле рубина часть атомов алюминия заменена атомами хрома. При концентрации около 0,05% примесь хрома придает рубину характерный розовато-красный цвет.

Инверсия населенностей в рубине достигается с использованием трех уровней энергии и вспомогательного излучения накачки. В методе трех уровней для увеличения числа атомов на верхнем энергетическом уровне или (что эквивалентно) для уменьшения их числа на нижнем уровне применяется мощное вспомогательное излучение, которое связывает один из рабочих уровней с третьим вспомогательным уровнем и перекачивает атомы снизу вверх.

В настоящее время рекордные энергии и мощности в импульсе дают лазеры на рубине и лазеры на стекле с примесью неодима. Поэтому они представляют наибольший интерес.

Основной элемент лазера на рубине — кристалл синтетического рубина высокой однородности. Кристалл обычно имеет форму цилиндра диаметром $0,4 \div 2$ см и длиной $3 \div 20$ см. Источником возбуждения является лампа-вспышка. Накачка происходит следующим образом. Атомы хрома, которые до вспышки находились на нижнем невозбужденном уровне, благодаря поглощению зеленого или синего цвета, содержащегося в излучении лампы-вспышки, переходят в возбужденное состояние (рис. 5). Время жизни атомов на верхнем возбужденном уровне мало (менее 10^{-7} сек). Они быстро переходят на нижний возбужденный уровень, отдавая избыточную энергию решетке кристалла, то есть нагревая кристалл. На новом возбужденном уровне время жизни уже сравнительно велико и составляет примерно 10^{-3} сек. Поэтому этот уровень называется метастабильным. С

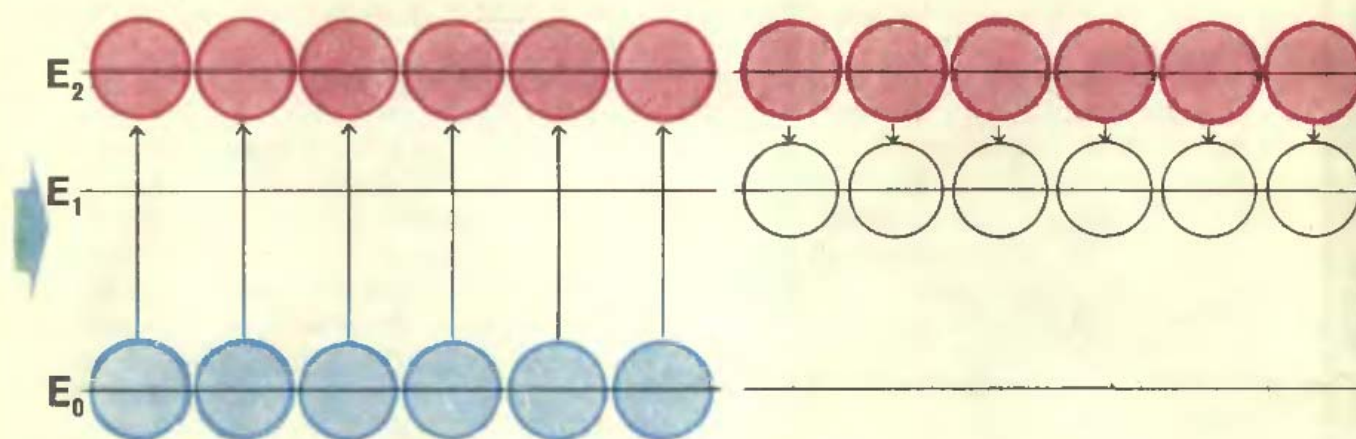


Рис. 5

него атомы переходят в основное невозбужденное состояние с испусканием кванта света в красной области спектра.

При достаточно мощной вспышке можно перебросить на метастабильный уровень достаточное количество частиц для создания сильной инверсии.

В качестве ламп накачки применяются мощные газоразрядные лампы. Вначале они делались в виде спирали, охватывающей кристалл. Сейчас, как правило, используются более мощные стержневые лампы, устанавливаемые параллельно кристаллу. Лампы работают в импульсном режиме. Длительность импульса вспышки составляет примерно тысячную долю секунды (1 мсек). Вспышка производится от батареи конденсаторов емкостью до 10 000 мкф, заряженных до нескольких тысяч вольт. При разряде через лампу конденсаторы в одном импульсе отдают энергию в десятки, а то и в сотни тысяч джоулей. Мощность накачки в импульсе может превышать десятки миллионов ватт.

Только часть энергии излучения лампы-вспышки, приходящаяся на зеленую и голубую части спектра, идет на возбуждение ионов хрома. Остальная часть переходит в тепло.

Использование импульсного режима обусловлено двумя обстоятельствами. Во-первых, трудно иметь источник света накачки большой мощности, работающий непрерывно. Во-

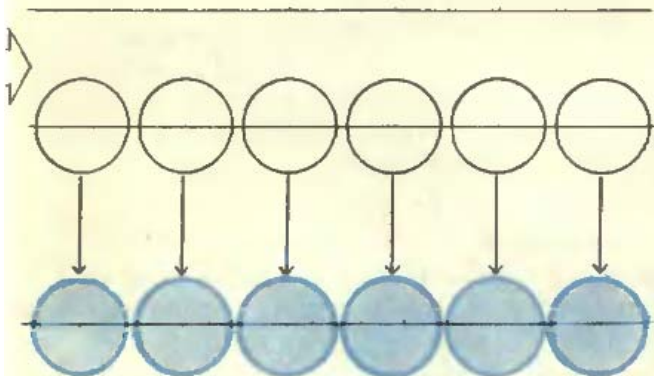
вторых, кристалл сильно нагревается при длительном возбуждении и теряет оптическую однородность.

Естественно, что при импульсной накачке генерация тоже носит импульсный характер. При этом полученная в кристалле инверсия может быть реализована двояко. Рассмотрим обе возможности.

Пусть зеркала-отражатели настроены в резонанс и жестко закреплены. Тогда, как только на метастабильном уровне накопится достаточное количество частиц, начнется генерация, которая будет продолжаться до тех пор, пока накачка будет эффективна. Обычно такая так называемая свободная генерация начинается через 100÷300 мсек после начала вспышки и продолжается 1 мсек.

В режиме свободной генерации большие кристаллы при мощной накачке дают в импульсе энергию до 1000 джоулей. Этому соответствует импульсная мощность до миллионов ватт.

Другой режим достигается путем включения зеркал резонатора в тот момент, когда инверсия достигла максимальной величины. Тогда все накопленные на метастабильном уровне частицы излучают практически сразу, и генератор выдает гигантский импульс излучения очень короткой длительности $10^{-8} \div 10^{-9}$ сек со сравнительно небольшой энергией (около трех джоулей). Но так как эта энергия излучается в очень короткое время,



то максимум мощности импульса достигает значений 300 миллионов — 3 миллиарда ватт.

Здесь встает вопрос о коэффициенте полезного действия лазера (к. п. д.). Из приведенных оценок видно, что в лазерное излучение преобразуется лишь малая доля энергии накачки. В режиме свободной генерации к. п. д. рубинового лазера менее 1%, в режиме гигантских импульсов и того меньше.

В чем же тогда выигрыш, который дает лазер?

Дело в том, что мы, проигрывая в количестве энергии излучения, неизмеримо выигрываем в его качестве. Это новое качество — монохроматичность и направленность — обусловлено свойствами эффекта индуцированного излучения.

Длина волны излучения рубинового лазера равна $6943 \text{ \AA} = 6,943 \cdot 10^{-5} \text{ см}$. И в окрестности этой длины волны, в очень узком интервале с шириной порядка $0,1 \text{ \AA}$, заключена вся мощность лазера. Ширина же спектра излучения теплового источника видимого света составляет примерно 3000 \AA , то есть в 30 000 раз больше.

Один из самых мощных тепловых источников света — наше Солнце — с одного квадратного сантиметра поверхности в видимом свете излучает мощность $8 \cdot 10^3 \text{ вт/см}^2$. При этом на интервал длин волн в $0,1 \text{ \AA}$ при-

ходится $0,2 \text{ вт/см}^2$. А рубиновые лазеры дают в этом интервале $10^6 \div 10^9 \text{ вт/см}^2$!

Соответствующие электрические поля составляют $3 \cdot 10^4 \div 10^6 \text{ в/см}$. Солнце в том же интервале длин волн создает поле 12 в/см .

Новое качество лазерного излучения можно проиллюстрировать следующим образом. Излучение Солнца в принципе не может нагреть какое-либо тело до температуры выше 6000° . Световое излучение газоразрядных ламп более ярких, чем Солнце, не способно нагреть тело до температуры выше $10\,000^\circ$. Но когда то же излучение газоразрядных ламп, пусть даже с большой потерей энергии, преобразовано в лазерное монохроматическое излучение со спектральной плотностью энергии в миллиарды раз больше исходной, то оно может нагреть тело до нескольких миллионов градусов.

Лазеры на кристаллах могут работать и в непрерывном режиме. Но большие мощности дают, конечно, импульсные лазеры.

Несколько особняком стоят газовые лазеры. В настоящее время лазеры на газах, возбуждаемых электрическим разрядом, работают в очень широком диапазоне частот — от ультрафиолетового излучения до далекого инфракрасного. Основной конструктивный элемент газового лазера — газоразрядная трубка, то есть трубка, в которой поддерживается электрический разряд в газе. Обычно газ разрежен до давлений, в $100 \div 1000$ раз меньших атмосферного. Материал трубок — стекло или кварц. Длина трубок в зависимости от назначения лежит в пределах от 5 см до 50 м . Газоразрядные трубки газовых лазеров в значительной мере подобны трубкам неоновой светящейся рекламы. Зеркала лазеров установлены либо непосредственно на торцах газоразрядных трубок, либо снаружи, но в любом случае строго перпендикулярно оси трубки.

В настоящее время наиболее распространенным является неон-гелиевый лазер непрерывного действия на

волну 6328 Å (красный свет). С его помощью получены световые колебания очень высокой стабильности и высокой монохроматичности. Хотя к. п. д. этого лазера крайне невелик ($\approx 0,01\%$), высокая степень монохроматичности и направленности его излучения, обусловленные, в частности, однородностью его газовой активной среды, сделали этот лазер незаменимым при всякого рода юстировочных и нивелировочных работах: при прокладке метро, выравнивании взлетно-посадочных полос больших аэродромов и т. п.

Большим достижением стало создание мощного лазера непрерывного действия, рабочим телом которого служит смесь углекислого газа, азота и гелия. Он дает инфракрасное излучение с длиной волны $\lambda = 10,6$ мк. Интерес к этому лазеру обусловлен прежде всего тем, что его к. п. д., достигая 30%, превосходит к. п. д. всех существующих в настоящее время лазеров, работающих при комнатной температуре. Уже сейчас с помощью этого лазера можно получить в непрерывном режиме мощность в 10 киловатт.

Монохроматичность, направленность и высокая мощность этого лазера делают его весьма перспективным для целого ряда технологических применений. На рис. 6 показано, как инфракрасный луч CO_2 -лазера прожигает отверстие в куске горной породы.

Рис. 6



Сейчас промышленность выпускает лазеры различных типов. Они используются как эффективный инструмент в научных исследованиях, для решения разного рода практических задач медицины (бескровный скальпель) и технологии (точная обработка тугоплавких материалов, раскрой текстильных материалов).

Лазерный луч измерил расстояние до Луны с большей точностью, чем это было сделано радиосредствами. После того как на Луне был установлен специальный отражатель, расстояние до нее было измерено с точностью до четырех метров.

Самое широкое применение лазеры нашли в физике. Они дают возможность проводить уникальные физические эксперименты. Например, с помощью лазеров, работающих в режиме гигантских импульсов, осуществлен пробой воздуха электрическим полем световой волны. Этот пробой происходит в фокусе линзы, собирающей энергию лазерного пучка в точку. Монохроматичность и высокая направленность лазерного излучения позволяют при фокусировании концентрировать лазерный свет в очень малом объеме (в принципе размер пятна в фокусе может быть доведен до длины волны). В образующуюся при пробое лазерную «искру» практически мгновенно «вкачивается» почти вся энергия импульса. Плазма «искры» сильно разогревается. Получена температура в несколько миллионов градусов. Установлено, что лазерная искра излучает рентгеновские лучи. Уже получены первые нейтроны, рожденные возникающей при таком нагреве термоядерной реакцией.

Работа с лазерами ведется в лабораториях всего мира. Много сделано, но много еще нерешенных проблем. Нет сомнения, что развитие квантовой электроники будет и дальше продолжаться высокими темпами.