

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра физики

И.И.Сергеев

Основы физики лазеров

Учебное пособие по курсу «Физика»

Для студентов БГУИР всех специальностей и форм обучения

Минск 2010

УДК 531+539.1(075.8)
ББК 22.2+22.36 я 73

Рецензент

Главный научный сотрудник Института физики НАН Республики Беларусь,
доктор физ.мат наук В.А.Савва

Сергеев, И.И.

Основы физики лазеров: учебное пособие по курсу «Физика» для студентов БГУИР всех специальностей и форм обучения/ И.И.Сергеев.- Минск: БГУИР, 2010.- 30 с : ил.

Учебное пособие содержит лекционный материал в расширенном изложении по теме «Физики лазеров», включенной в действующую типовую программу по физике для высших технических учебных заведений. В пособии подробно рассматриваются физические явления, лежащие в основе работы различных лазеров, их основные технические характеристики и применения в современной науке и технике. Учебное пособие предназначено для студентов БГУИР всех специальностей и форм обучения.

УДК 531+539.1(075.8)
ББК 22.2+22.36 я 73

© Сергеев И.И., 2010

© УО Белорусский
государственный
университет информатики
и радиоэлектроники

Лазер – это принципиально новый источник электромагнитного излучения оптического диапазона. Как известно, оптическое излучение обусловлено переходами валентных электронов атомов и молекул из возбужденных стационарных состояний в состояния с меньшей энергией. До создания первого лазера в 1960 г. все источники оптического излучения были тепловыми либо люминесцентными. В тепловых источниках возбуждение валентных электронов обусловлено нагреванием излучающего вещества, например - электрическим током, как в лампах накаливания. В люминесцентных источниках используются различные способы возбуждения валентных электронов: облучением ультрафиолетовым светом (в этом случае имеет место фотолюминесценция), бомбардировкой электронным пучком (катодолюминесценция), за счет протекания химических реакций (хемилюминесценция), и т.п. В лазерных источниках используется явление вынужденного (индуцированного) испускания; в соответствии с этим слово «лазер» представляет собой аббревиатуру английского словосочетания «light amplification by stimulated emission of radiation».

Вначале рассмотрим более подробно процессы испускания и поглощения света атомами вещества (далее под словом «свет» мы будем подразумевать электромагнитное излучение оптического диапазона). Следует отметить, что помимо слова «лазер» в научной литературе часто используется термин «оптический квантовый генератор» (ОКГ); соответственно процесс возникновения лазерного излучения иногда называется генерацией.

Спонтанное и вынужденное испускание света

При поглощении кванта света электрон атома переходит из невозбужденного (основного) в возбужденное состояние (далее мы будем говорить, что в возбужденное состояние переходит атом). Из квантовой механики следует, что атом будет находиться в этом состоянии неограниченно долго, до тех пор, пока не появятся внешние причины, вызывающие изменение его энергии. Вместе с тем опыт показывает, что атом возвращается в основное состояние с испусканием кванта света в результате самопроизвольного (спонтанного) перехода. Причины, вызывающие спонтанные переходы атомов, были вскрыты в рамках квантовой электродинамики и в нашем курсе не рассматриваются. Задолго до создания квантовой электродинамики, в 1918 г, А.Эйнштейн развил теорию поглощения и излучения света, базирующуюся на законах сохранения энергии и импульса при взаимодействии атомов как квантовых систем с электромагнитным полем. Согласно постулатам Бора, если атом в некоторый момент времени находится в стационарном состоянии с энергией W_n , то в результате спонтанного перехода в состояние с энергией W_m он излучает квант света с энергией $\hbar\omega_{nm}$. Количество таких переходов, совершаемых атомом в единицу времени, называется коэффициентом Эйнштейна для спонтанного испускания между энергетическими уровнями с

номерами n и m , и обозначается A_{nm} (иногда коэффициент A_{nm} называют вероятностью спонтанного перехода в единицу времени, или скоростью перехода). Если N_n - количество атомов в единице объема в состоянии с энергией W_n в момент времени t , то количество атомов, перешедших в единице объема за промежуток времени $(t, t + dt)$ в состояние с энергией W_m , пропорционально N_n и dt :

$$dN_n = A_{nm} N_n dt . \quad (1)$$

В лазерной физике используется следующая терминология: если атом в определенном состоянии обладает энергией W_n , принято говорить, что он находится на n -ом энергетическом уровне, или на уровне с энергией W_n ; количество атомов на определенном уровне называется его заселенностью.

Разделим равенство (1) на dt :

$$\frac{dN_n}{dt} = A_{nm} N_n . \quad (2)$$

Поскольку заселенность уровня с энергией W_n уменьшается во времени за счет спонтанных переходов, производная dN_n / dt должна быть отрицательна. Учитывая, что все величины в правой части равенства (2) по определению положительны, ее необходимо умножить на -1 :

$$\frac{dN_n}{dt} = -A_{nm} N_n .$$

Разделим в этом уравнении переменные и проинтегрируем его:

$$\frac{dN_n}{N_n} = -A_{nm} dt, \quad \int \frac{dN_n}{N_n} = -\int A_{nm} dt \Rightarrow \ln N_n = -A_{nm} t + \ln C ,$$

$$\ln \frac{N_n}{C} = -A_{nm} t \Rightarrow N_n = C e^{-A_{nm} t} . \quad (3)$$

Обозначив через N_{0n} заселенность n -ого уровня в момент $t = 0$, найдем константу интегрирования и подставим ее в (3):

$$C = N_{0n}, \quad N_n = N_{0n} e^{-A_{nm} t} . \quad (4)$$

Переход атома с уровня n на уровень m сопровождается испусканием фотона с энергией $\hbar\omega_{nm}$. Соответственно энергия, испускаемая в единице объема за промежуток времени dt , определяется следующим равенством:

$$dW = \hbar\omega_{nm} dN_n .$$

Сделав здесь замену (1), получим:

$$dW = \hbar\omega_{nm} A_{nm} N_n dt .$$

Далее найдем плотность мощности излучения (энергия, испускаемая в единицу времени в единице объема):

$$P = \frac{dW}{dt}, \quad P = \hbar\omega_{nm} A_{nm} N_n .$$

С учетом равенства (4) имеем:

$$P = \hbar\omega_{nm} A_{nm} N_{0n} e^{-A_{nm}t}, \quad P = P_0 e^{-A_{nm}t}, \quad (5)$$

где $P_0 = \hbar\omega_{nm} A_{nm} N_{0n}$ - плотность мощности в момент $t = 0$.

Средней продолжительностью жизни атома в возбужденном состоянии называется промежуток времени, в течение которого заселенность соответствующего уровня уменьшается в e раз. Полагая, что атомы переходят с n -ого уровня на основной только за счет спонтанного испускания, с учетом равенства (4) имеем:

$$\frac{N_{0n}}{e} = N_{0n} e^{-A_n \tau_n} \Rightarrow \frac{1}{e} = e^{-A_n \tau_n} \Rightarrow \tau_n = \frac{1}{A_n} \Rightarrow A_n = \frac{1}{\tau_n}$$

(здесь τ_n - средняя продолжительность жизни, A_n - коэффициент Эйнштейна для спонтанного перехода с n -ого уровня на основной). Отсюда следует, что численные значения A_n и τ_n взаимно обратны. Сделав в равенстве (5) замену $A_n = 1/\tau_n$, получим:

$$P = P_0 e^{-\frac{t}{\tau_n}}, \quad (6)$$

т.е. плотность мощности спонтанного испускания атомов уменьшается с течением времени по экспоненциальному закону.

Проверка этой закономерности была проведена Вином в экспериментах со свечением каналовых лучей (канальными лучами называется параллельный пучок катионов, распространяющийся в газоразрядной трубке за катодом, в котором имеется узкое отверстие). В трубке поддерживался достаточно высокий вакуум; поэтому неупругие соударения катионов практически отсутствовали, кванты света испускались только за счет спонтанных переходов.

Вин измерял интенсивность излучения катионов в начале и в конце пучка длиной x для различных спектральных линий. Поскольку время перемещения катиона вдоль отрезка длиной x равно x/v , интенсивность должна уменьшаться от I_0 в начале пучка до

$$I = I_0 e^{-\frac{x}{v\tau}} \quad (7)$$

в его конце (здесь v - скорость катиона, τ - среднее время жизни его возбужденного состояния). Величина τ вычислялась по формуле (7) по измеренным значениям I_0 , I , x и v . Для линии излучения водорода

($\lambda = 6562 \text{ \AA}$) было найдено, что $\tau = 1,5 \cdot 10^{-8} \text{ с}$, для линии паров ртути

($\lambda = 2537 \text{ \AA}$) - $\tau = 9,8 \cdot 10^{-8} \text{ с}$. Следовательно, среднее время жизни атома в возбужденном состоянии составляет примерно $10^{-9} \dots 10^{-8} \text{ с}$.

Согласно соотношению неопределенностей $\Delta W \cdot \Delta \tau \geq \hbar$, атому в возбужденном состоянии свойственна неопределенность энергии

$$\Delta W \geq \hbar / \tau . \quad (8)$$

Величина ΔW , которая называется естественной шириной энергетического уровня, в свою очередь определяет естественную спектральную ширину линии испускания:

$$\Delta \nu = \frac{\Delta W}{h} .$$

С учетом неравенства (8) имеем:

$$\Delta \nu \geq \frac{1}{2\pi\tau} . \quad (8A)$$

Для того чтобы оценить соответствующий промежуток длин волн, воспользуемся известным соотношением

$$\Delta \lambda = \frac{\lambda^2}{c} \cdot \Delta \nu .$$

Заменяя здесь $\Delta \nu$ согласно (8A), получим:

$$\Delta \nu = \frac{\lambda^2}{2\pi c \tau} .$$

Из этого равенства следует, для $\tau = 10^{-8} \text{ с}$ и видимого света ($\lambda = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$) естественная спектральная ширина составляет примерно 10^{-4} \AA .

Помимо естественной ширины, обусловленной спонтанными переходами атомов в основное состояние, существуют и другие причины уширения спектральных линий. Например, ударное уширение обусловлено сокращением времени жизни атомов в возбужденном состоянии вследствие соударений. Причиной доплеровского уширения является то, что возбужденные атомы движутся хаотично с различными скоростями в различных направлениях.

Если атом находится в электромагнитном поле, то между атомом и полем имеется взаимодействие, подчиняющееся законам сохранения энергии и импульса. В классической электродинамике доказывается, что диполь,

находящийся в поле электромагнитной волны, в зависимости от соотношения фаз между собственными колебаниями и колебаниями вектора \vec{E} , может либо поглощать энергию поля, либо отдавать ее в виде излучения, обусловленного вынужденными колебаниями. Эйнштейн показал, что аналогичным свойством обладает атом в электромагнитном поле. Иначе говоря, атом, находящийся в возбужденном состоянии, под действием электромагнитного поля может перейти в состояние с меньшей энергией с испусканием фотона. Такие переходы атомов называются вынужденными (индуцированными), а возникающее при этом излучение - вынужденным.

Количество вынужденных переходов атома с уровня n на уровень m , совершаемых за единицу времени (скорость перехода), пропорционально спектральной плотности энергии электромагнитного поля $\rho(\omega)$ на частоте перехода; соответствующий коэффициент пропорциональности обозначается B_{nm} и называется коэффициентом Эйнштейна для вынужденного излучения. Следовательно, скорость вынужденных переходов атома между уровнями n и m равна $B_{nm}\rho(\omega)$. Поскольку полная скорость спонтанных и вынужденных переходов равна $A_{nm} + B_{nm}\rho(\omega)$, то количество атомов, перешедших в единице объема за промежуток времени $t, t+dt$ с уровня n на уровень m , равно:

$$dN_n = (A_{nm} + B_{nm}\rho(\omega)) N_n dt$$

(здесь N_n - заселенность уровня n в момент t). Взаимодействие атомов, находящихся на уровне m с электромагнитным полем может привести к тому, что некоторая их часть, поглотив фотон с энергией $W_n - W_m$, перейдет на уровень n . Скорость таких переходов выражается произведением $B_{mn}\rho(\omega)$, их количество в единице объема за время dt равно

$$dN_m = B_{mn}\rho(\omega) N_m dt$$

(здесь B_{mn} - коэффициент Эйнштейна для поглощения, N_m - заселенность уровня m). Понятно, что в состоянии термодинамического равновесия между веществом и электромагнитным полем должно быть равенство полного количества переходов с испусканием и поглощением света на любой частоте. Это условие в более общей формулировке называется принципом детального равновесия: для двух произвольно выбранных энергетических уровней квантовой системы, находящейся в состоянии термодинамического равновесия с электромагнитным излучением, количество переходов с испусканием и поглощением должно быть одинаковым. Принцип детального равновесия можно сформулировать в виде равенства:

$$(A_{nm} + B_{nm}\rho(\omega)) N_n dt = B_{mn}\rho(\omega) N_m dt. \quad (9)$$

Именно такое равновесие имеет место в замкнутой полости, стенки которой поддерживаются при постоянной температуре.

Справедливость представлений, развитых Эйнштейном о процессах испускания и поглощения электромагнитного излучения, подтверждается тем, что из принципа детального равновесия (9) следует функция Планка, описывающая распределение энергии в спектре равновесного теплового излучения черного тела. Для того чтобы показать это, нужно учесть, что при термодинамическом равновесии заселенность уровней атомов вещества подчиняется распределению Больцмана:

$$N_m = N_0 e^{-W_m/kT}, \quad N_n = N_0 e^{-W_n/kT}$$

(здесь N_0 - общее количество атомов в единице объема). С учетом этого из (9) следует, что

$$\rho(\omega) = \frac{A_{nm} e^{-W_n/kT}}{B_{mn} e^{W_m/kT} - B_{nm} e^{-W_n/kT}} \quad (10)$$

Согласно закону Стефана-Больцмана, при $T \rightarrow \infty$ энергетическая светимость, а следовательно, и спектральная плотность энергии излучения черного тела также стремится к бесконечности. В этом случае из равенства (10) получается, что $B_{nm} = B_{mn}$. Тогда, если учесть, что $W_n - W_m = \hbar\omega_{nm}$, имеем:

$$\rho(\omega, T) = \frac{A_{nm}}{B_{nm}} \cdot \frac{1}{e^{\hbar\omega_{nm}/kT} - 1} \quad (11)$$

Для того чтобы найти отношение A_{nm}/B_{nm} , Эйнштейн воспользовался тем, что при малых частотах равенство (11) должно переходить в формулу Рэля-Джинса:

$$\rho(\omega, T) = \frac{\hbar\omega^3}{\pi^2 c^3} \cdot kT.$$

Если $\hbar\omega \ll kT$, то

$$e^{\hbar\omega/kT} \approx 1 + \frac{\hbar\omega}{kT} \quad (12)$$

Сделав в (11) замену (12) получим:

$$\rho(\omega, T) = \frac{A_{nm}}{B_{nm}} \cdot \frac{kT}{\hbar\omega}$$

Сравнивая последнее равенство с формулой Рэля-Джинса, имеем:

$$\frac{A_{nm}}{B_{nm}} \cdot \frac{kT}{\hbar\omega} = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} \cdot kT \Rightarrow \frac{A_{nm}}{B_{nm}} = \frac{\hbar\omega^3}{\pi^2 c^3} \quad (13)$$

Заменив в равенстве (11) отношение A_{nm}/B_{nm} согласно (13), получим формулу Планка:

$$\rho(\omega, T) = \frac{\hbar\omega^3}{\pi^2 c^3} \cdot \frac{1}{e^{\hbar\omega/kT} - 1}$$

10.2. Отрицательное поглощение (усиление) света

Как уже отмечалось, работа лазера основана на явлении вынужденного испускания. Эйнштейн показал, что новый фотон, возникший в результате вынужденного перехода атома рабочего вещества лазера в состояние с меньшей энергией, имеет точно такую же энергию и импульс, что и фотон, вызвавший этот переход (рабочее вещество лазера принято называть его активной средой). На волновом языке это означает, что вынужденное испускание приводит к увеличению амплитуды проходящей световой волны без изменения ее частоты, фазы и поляризации; следовательно, вынужденное и индуцирующее излучение строго когерентны.

Одновременно с вынужденным испусканием протекает процесс поглощения электромагнитного излучения, обусловленные переходами атомов из основного в возбужденные состояния. Следовательно, интенсивность светового пучка, проходящего через активную среду лазера, определяется тем, какой из двух перечисленных процессов преобладает. Если доминирует поглощение, интенсивность уменьшается, если же преобладает вынужденное испускание, интенсивность пучка увеличивается.

Поглощение света в веществе определяется законом Бугера-Ламберта:

$$I = I_0 e^{-\alpha x}$$

Здесь I_0 - интенсивность пучка на передней границе поглощающего слоя, I - интенсивность на глубине x , положительная величина α называется показателем поглощения. В 1951 г. российские физики Вудынский и Фабрикант высказали следующую идею: для усиления светового пучка поглощающее вещество необходимо привести в такое состояние, когда показатель поглощения имеет отрицательные значения. Из закона Бугера-Ламберта следует, что в этом случае интенсивность света будет увеличиваться за счет вынужденного испускания. Явление усиления светового пучка, наблюдаемое в активной среде лазера, иногда называют отрицательным поглощением.

В рамках квантовых представлений это выглядит следующим образом. Фотон, проходящий через активную среду, при встрече с возбужденным

атомом индуцирует его переход в состояние с меньшей энергией. В результате этого возникает еще один фотон, обладающий точно такой же энергией и импульсом. Эти два фотона, перемещаясь в активной среде, вызывают появление двух точно таких же фотонов, и т.д. Таким образом происходит лавинообразное нарастание количества фотонов, т.е. увеличение интенсивности светового пучка. Для более эффективного усиления активная среда помещается в оптический резонатор; он представляет собой два плоскопараллельных зеркала, одно из которых полупрозрачное. Любой фотон, возникший в результате спонтанного испускания, импульс которого направлен перпендикулярно зеркалам, является «затравкой» процесса усиления. Он порождает лавину фотонов, распространяющихся в том же направлении. Небольшая часть из них поглощается зеркалами, часть выходит наружу через полупрозрачное зеркало, а часть отражается и вызывает дальнейшее нарастание фотонной лавины. Таким образом в оптическом резонаторе реализуется положительная обратная связь, необходимая в любом генераторе электромагнитных колебаний. В современных лазерах в резонатор помещают электрооптический затвор, который позволяет потоку фотонов выйти через полупрозрачное зеркало лишь после того, как будет достигнута определенная интенсивность светового пучка.

Следует иметь в виду, что лавина фотонов будет нарастать только в том случае, когда увеличение интенсивности за один проход активной среды по крайней мере компенсирует потери энергии при отражении от зеркал резонатора. Без учета потерь усиление светового пучка за один проход можно представить в виде отношения

$$\frac{I}{I_0} = e^{\alpha l}.$$

Здесь I_0 - интенсивность на входе в активную среду, I - на выходе из нее, α - показатель отрицательного поглощения, l – протяженность активной среды. Отсюда следует, что усиление за два прохода составляет $e^{2\alpha l}$. Потери энергии светового пучка при отражении можно учесть путем использования коэффициента отражения зеркал (R), который равен отношению интенсивности пучка до и после отражения. Если коэффициент отражения обоих зеркал считать одинаковым, то усиление светового пучка за два прохода по резонатору (т.н. называемый коэффициент усиления) равен $R^2 e^{2\alpha l}$. Приравняв это выражение к единице, получаем условие, при выполнении которого усиление компенсирует потери:

$$R^2 e^{2\alpha l} = 1.$$

В результате логарифмирования этого равенства находим необходимый минимальный показатель отрицательного поглощения, при котором возможно усиление:

$$2\alpha l = 2 \ln \left(\frac{1}{R} \right) \Rightarrow \alpha = \frac{1}{l} \ln \left(\frac{1}{R} \right).$$

Понятно, что если увеличивать мощность накачки, интенсивность светового пучка, выходящего из резонатора, также будет увеличиваться.

Кроме условия $R^2 e^{2\alpha l} = 1$, которое можно назвать энергетическим, для усиления светового пучка необходимо выполнение фазового условия стационарной генерации. Оно продиктовано волновой природой света и состоит в том, что световая волна, пришедшая в определенную точку активной среды после любого количества отражений, должна иметь фазу, отличающуюся от фазы первичной (затравочной) волны в этой же точке на величину, кратную 2π . В свою очередь, это условие накладывает ограничение на соотношение между длиной волны и расстоянием между зеркалами резонатора:

$$2l = m\lambda, m \in N. \quad (14)$$

В случае выполнения этого условия, в результате суперпозиции первичной и всех вторичной волн амплитуда результирующей волны в рассматриваемой точке активной среды резко увеличится; при этом световые пучки, выходящие при каждом отражении от полупрозрачного зеркала, будут строго когерентны между собой. Сделав в (14) замену

$$\lambda = \frac{c}{n\nu}$$

(здесь c - скорость света в вакууме, n – показатель преломления активной среды), можно найти частоты световых волн, генерируемых в резонаторе:

$$2l = \frac{c}{n\nu} \cdot m \Rightarrow \nu = \frac{c}{2nl} \cdot m, m \in N.$$

Возможные значения ν должны удовлетворять известному условию Бора, связывающему частоту световой волны с разностью энергий уровней частиц активной среды.

На первый взгляд, необходимость одновременного выполнения фазового условия и условия частот Бора существенно усложняет практическую реализацию усиления световых пучков (это обусловлено очень жесткими требованиями к точности изготовления резонаторов). В действительности фазовое условие оказывается не столь строгим из-за уширения спектральных линий спонтанного испускания. Иначе говоря, выполнение условия (14) существенно упрощается за счет того, что частота спонтанного перехода имеет некоторый разброс значений в пределах спектральной ширины линии.

Для того чтобы сформулировать условия, при которых вещество

обладает отрицательным показателем поглощения, будем считать, что частицы этого вещества имеют только два энергетических уровня. В рамках теории Эйнштейна между ними возможны переходы с поглощением, спонтанным и вынужденным испусканием. Для упрощения рассуждений будем полагать, что скорость спонтанных переходов пренебрежимо мала. Понятно, что количество фотонов светового пучка, поглощенных в единице объема в единицу времени, пропорционально заселенности основного уровня:

$$N_{\text{погл}} = B_{12}\rho(\omega)N_1.$$

Здесь B_{12} - коэффициент Эйнштейна для поглощения, $\rho(\omega)$ - спектральная плотность излучения на частоте перехода, N_1 - заселенность основного уровня. Количество фотонов, испускаемых частицами в результате вынужденных переходов, пропорционально заселенности возбужденного уровня:

$$N_{\text{исп}} = B_{21}\rho(\omega)N_2$$

(здесь B_{21} - коэффициент Эйнштейна для вынужденного перехода). Понятно также, что показатель поглощения в законе Бугера-Ламберта пропорционален разности $N_{\text{погл}} - N_{\text{исп}}$:

$$\alpha = k'(B_{12}N_1 - B_{21}N_2)\rho(\omega)$$

(здесь k' - коэффициент пропорциональности). Поскольку $B_{12} = B_{21}$, из последнего равенства следует, что знак показателя поглощения определяется знаком разности $N_1 - N_2$. Если вещество находится в состоянии термодинамического равновесия, то

$$N_1 = N_0 e^{-W_1/kT}, \quad N_2 = N_0 e^{-W_2/kT} \quad (15)$$

(здесь W_1 и W_2 - энергия основного и возбужденного уровня). Так как $W_2 > W_1$, из равенств (15) следует, что $N_1 > N_2$, т.е. показатель поглощения положителен. Если же $N_1 < N_2$, то вещество имеет отрицательный показатель поглощения.

Состояние рабочей среды, в котором показатель поглощения имеет отрицательное значение, называется инверсным состоянием, а процесс перевода среды из обычного в инверсное состояние называется ее накачкой. Весьма распространена оптическая накачка, когда частицы переводятся с основного на возбужденный уровень в результате поглощения фотонов мощного светового потока. Такой способ накачки обычно используется в твердотельных и жидкостных лазерах, активная среда которых представляет собой кристаллы, активированные различными примесями, либо жидкости. Вместе с тем опыт показывает, что достижение инверсного состояния активной среды по т.н. двухуровневой схеме, когда используются только

два энергетических уровня ее частиц, крайне затруднительно. В первую очередь это обусловлено тем, что заселенность возбужденного уровня уменьшается за счет спонтанных переходов. На практике активная среда лазера переводится в инверсное состояние по трехуровневой либо по четырехуровневой схеме (в качестве примера ниже рассматривается формирование инверсной заселенности рабочих уровней активной среды лазера на рубине и гелий-неонового лазера). Если же активной средой является газ, то наряду с оптической часто используется т.н. электрическая накачка. В этом случае частицы активной среды переходят с основного на возбужденный уровень в результате неупругих столкновений с электронами в газовом разряде. В полупроводниковых лазерах, где активная среда представляет собой полупроводниковый кристалл, инверсное состояние достигается в результате прохождения тока через $p-n$ переход. При этом электроны из валентной зоны переходят в зону проводимости, после чего происходит обратный переход с испусканием фотонов. Энергия, необходимая для перехода электронов в зону проводимости, сообщается им электрическим полем источника тока, подключенного к $p-n$ переходу. Инверсное состояние полупроводниковой активной среды достигается и при оптической накачке, а также при бомбардировке пучком быстрых электронов. В этом случае переход электронов в зону проводимости происходит в результате поглощения квантов света, либо за счет неупругих соударений с электронами пучка.

10.3. История появления, классификация и основные характеристики лазеров

Идея усиления электромагнитных волн за счет вынужденного испускания впервые была реализована на практике для колебаний сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона. В мае 1952 г. на Всесоюзной конференции по радиоспектроскопии советские физики Н.Г.Басов и А.М.Прохоров выступили с докладом о принципиальной возможности создания усилителя миллиметровых волн. Поскольку в качестве активной среды предполагалось использовать газообразный аммиак, авторы доклада назвали такой усилитель молекулярным генератором. Практически одновременно с упомянутым докладом советских физиков, предложение об использовании вынужденного испускания для усиления электромагнитных колебаний СВЧ диапазона было сделано в Колумбийском университете США американским физиком Ч.Таунсом. В 1954 г. молекулярный генератор стал реальностью; он был создан одновременно и независимо в двух местах – в Москве в Физическом институте АН СССР и в Колумбийском университете. Позднее молекулярный генератор был назван мазером; это слово происходит от аббревиатуры английского словосочетания «*microwave amplification by stimulated emission of radiation*», что в переводе означает «усиление микроволн за счет вынужденного испускания». Спустя 10 лет, на церемонии

вручения Нобелевской премии, состоявшейся в 1964 г, А.М.Прохоров сказал: «Казалось бы, что после создания мазеров в радиодиапазоне вскоре будут созданы квантовые генераторы оптического диапазона. Однако этого не случилось, они были созданы только через 5-6 лет. Чем это объясняется? Здесь были две трудности. Первая из них заключалась в том, что тогда не были предложены резонаторы для оптического диапазона, и вторая – не были предложены конкретные системы и методы получения инверсной заселенности в оптическом диапазоне».

Лазер на рубине. Упомянутые А.М.Прохоровым шесть лет действительно были заполнены исследованиями, которые позволили в конечном счете создать лазер. Первый успех выпал на долю американского физика Т.Меймана. В 1960 г. в двух научных журналах появилось сообщение о том, что ему удалось получить генерацию оптического излучения на кристалле рубина. Рубин – это полуторная окись алюминия (Al_2O_3), в которой имеется примесь оксида хрома (Cr_2O_3). Оптические свойства рубина, в том числе и «рубиновый» цвет, обусловлены ионами хрома, замещающими в узлах кристаллической решетки ионы алюминия. При облучении кристалла рубина мощным световым потоком лампы накачки ионы хрома переходят с основного уровня C на уровни A (рис. 10.1). Далее возбужденные ионы довольно быстро переходят на долгоживущий (метастабильный) уровень B . Он представляет собой два близко расположенных подуровня; вынужденный переход с каждого из них на основной уровень сопровождается испусканием света с длиной волны 692 и 694 нм.

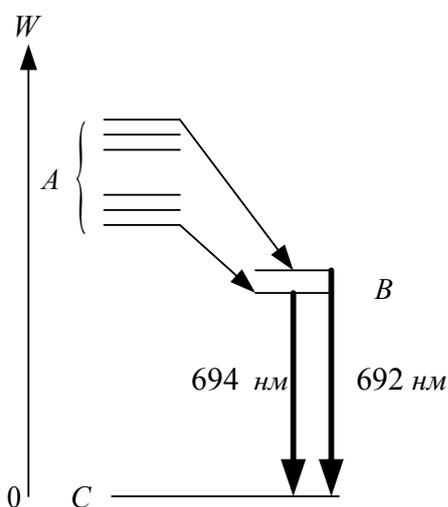


Рис. 10.1. Схема энергетических уровней рубинового лазера.

Лазер Т.Меймана выглядел довольно скромно. Его активный элемент представлял собой кристалл в форме кубика размером примерно $1 \times 1 \times 1$ см; две противоположные грани кристалла с тонкослойным серебряным покрытием играли роль резонатора. Импульсная лампа, изготовленная в

форме змеевика, охватывала активный элемент и использовалась в качестве источника оптической накачки. Лазерное излучение в виде световых импульсов красного цвета выходило через небольшое отверстие в одной из граней кристалла.

Гелий-неоновый лазер. В этом же 1960 г. американским физикам А. Джавану, В. Беннету и Д. Эрриоту удалось получить генерацию оптического излучения в газовой смеси гелия и неона в электрическом разряде. В результате неупругих соударений с электронами часть атомов Ne и He переходит с основного на возбужденные уровни W_2 и W_2' (рис. 10.2). Поскольку уровень W_2 является короткоживущим, атомы неона быстро покидают его, переходя в состояния с меньшей энергией, что препятствует формированию инверсной заселенности уровня W_2 . Так как энергия уровней W_2 неона и W_2' гелия практически одинакова, возбужденные атомы He в результате неупругих столкновений с невозбужденными атомами Ne передают им свою энергию; при этом атомы неона переходят на уровень W_2 . При достаточном количестве атомов гелия в газовой смеси можно достичь инверсной заселенности этого уровня относительно уровня W_3 ; этому же способствует опустошение уровня W_3 в результате неупругих соударений со стенками трубки. Понятно, что процесс опустошения будет происходить тем эффективнее, чем меньше диаметр трубки. Вместе с тем уменьшение диаметра приводит к уменьшению количества атомов неона и, соответственно, к снижению мощности лазерного излучения. Опыт показывает, что в оптимальном варианте диаметр трубки равен примерно 7 мм, парциальные давления неона и гелия составляют 1 и 10 мм ртутного столба. Поскольку уровни W_2 и W_3 обладают сложной

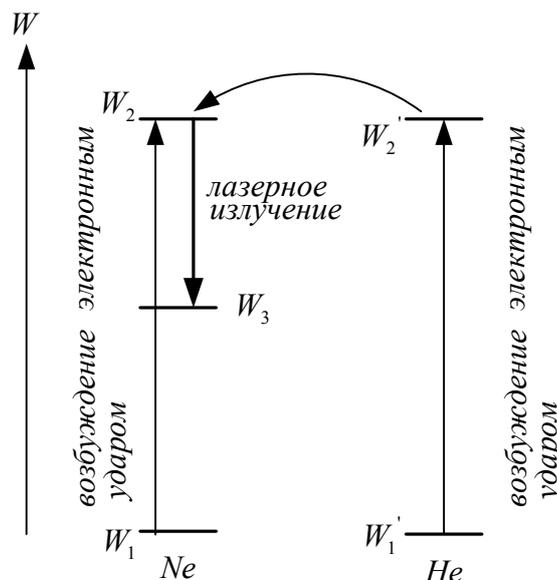


Рис. 10.2. Схема энергетических уровней гелий-неонового лазера.

структурой, т.е. состоят из множества подуровней (на рис. 10.2 они не

показаны), гелий-неоновый лазер может работать на 30 длинах волн в инфракрасной и видимой области спектра. Образцы гелий-неоновых лазеров, выпускаемые промышленностью, работают на длине волны 1,32, 1,15 и 0,633 мкм.

Полупроводниковые лазеры. В 1962-1963 гг. одновременно в СССР и США создаются первые полупроводниковые лазеры. В отличие от газовых и твердотельных лазеров, излучательные переходы в полупроводниковом материале происходят не между дискретными энергетическими состояниями отдельных атомов, но между энергетическими зонами. Поэтому переходы электронов из зоны проводимости в валентную зону с последующей рекомбинацией приводят к излучению, лежащему в относительно широком спектральном интервале, составляющем несколько десятков нанометров, что намного шире полосы излучения газовых или твердотельных лазеров. Полупроводниковые лазеры могут иметь очень малые размеры (минимальный объем кристалла может составлять примерно 10^{-6} см³). Для них характерны очень высокие значения к.п.д (до 60 %), простота конструкции. возможность перестройки длины волны в пределах полосы испускания и наличие большого числа полупроводниковых материалов, позволяющих получать лазерное излучение с длиной волны в интервале от 0,32 до 32 мкм.

Наибольшее распространение получили полупроводниковые лазеры с накачкой путем инжекции электронов через $p-n$ переход (инжекционные лазеры). Такой лазер представляет собой полупроводниковый диод, у которого две плоскопараллельные поверхности, перпендикулярные $p-n$ переходу, образуют оптический резонатор. Инверсия населённости достигается при большой плотности тока через диод (при обычных температурах минимальное значение плотности тока составляет примерно 1 кА/см^2 , а при пониженной температуре – около $0,1 \text{ кА/см}^2$). Если электронный ток через $p-n$ переход не обеспечивает инверсной заселенности, излучательные переходы электронов из зоны проводимости в валентную зону имеют спонтанный характер. В этом случае полупроводниковый диод представляет собой «нелазерный» источник света – светодиод. По сравнению с другими электрическими источниками некогерентного света (тепловыми либо газоразрядными) светодиоды имеют большой к.п.д. (до 50%); для них характерна высокая механическая прочность, вибростойкость и длительный срок службы. Весьма важным преимуществом светодиодов в сравнении с газоразрядными лампами является отсутствие ядовитых составляющих типа ртути и, следовательно, лёгкость утилизации.

Таким образом, с началом шестидесятих годов открылся новый, «лазерный» период оптики. Лазеры разных типов занимают прочное место в научных лабораториях, в промышленности, в медицине, в быту.

Принято различать лазеры двух видов – усилители и генераторы. В резонатор лазера, работающего в режиме усиления, водится

электромагнитное излучение с частотой, равной частоте вынужденных переходов частиц активной среды. При наличии инверсной заселенности рабочих уровней это излучение стимулирует процессы вынужденного испускания, в результате чего происходит лавинообразное нарастание количества фотонов, т.е. усиление входного излучения. Если же лазер работает в режиме генерации, входное излучение не используется; в этом случае вынужденные переходы инициируются спонтанным излучением, возникающим непосредственно в активной среде.

Другая классификация лазеров основана на различиях агрегатного состояния рабочей среды. В рамках такого подхода лазеры, у которых рабочее вещество представляет собой кристалл либо стекло, называются твердотельными. К ним относится лазер на рубине, лазеры на различных кристаллах и стеклах, легированных редкоземельными элементами, лазеры на кристаллах с центрами окраски, возникающими при воздействии на кристалл ионизирующего излучения, и т.п. Все лазеры, у которых активная среда представляет собой газ либо жидкость, называются соответственно газовыми или жидкостными. Если же активная среда изготавливается из полупроводникового кристалла, такие лазеры называются полупроводниковым.

Следующий подход к классификации связан со способом возбуждения активной среды. Различают лазеры оптической накачкой (выше уже отмечалось, что она используется в основном в твердотельных и жидкостных лазерах), с возбуждением путем инжекции электронов в зону проводимости электрическим током (полупроводниковые лазеры). В рамках этой классификации различают также лазеры с электрической накачкой в газовом разряде (гелий-неоновый лазер, CO_2 -лазер), газодинамические лазеры, в которых инверсная заселенность рабочих уровней частиц газа достигается в результате его адиабатического расширения (лазер на CO_2). Существуют также химические лазеры, в которых инверсная заселенность обеспечивается за счет протекания в активной среде химических реакций.

Еще один способ классификации лазеров основан на различиях режима их работы и выходной мощности. Лазер, испускающий излучение в виде импульсов, называется импульсным; если же излучение непрерывно, то речь идет о лазере с непрерывным излучением. Лазер, излучение которого сосредоточено в узком спектральном промежутке, называется узкополосным (одночастотным), если же в широком интервале – то говорят о широкополосном лазере.

В зависимости от конструкции открытого зеркального резонатора различают лазеры с постоянной и модулированной добротностью (один из способов модуляции состоит в том, что зеркало резонатора размещается на оси электродвигателя; при ее вращении добротность резонатора периодически изменяется от нулевого до максимального значения). Лазеры, у которых непрерывная либо средняя выходная мощность имеет величину порядка 10^6 Вт, называются высокомоощными. При выходной мощности в

промежутке $10^3 \dots 10^5$ Вт речь идет о лазерах средней мощности, если же выходная мощность составляет примерно 10^{-3} Вт, то говорят о лазерах малой мощности.

Важнейшие характеристики лазера: длина волны, энергия импульса и мощность излучения. В настоящее время диапазон длин волн охватывает широкий промежуток от ультрафиолетовой до дальней инфракрасной области спектра, причем наибольшим разнообразием характеризуется спектральный состав излучения газовых лазеров (см. таблицу). Энергия импульса достигает наибольшей величины у лазеров с активным элементом, изготовленным из кристаллов алюмоиттриевого граната с неодимом (порядка 10^3 Дж). Мощность излучения твердотельных лазеров, работающих преимущественно в импульсном режиме, в значительной степени зависит от длительности импульса. Например, если энергия импульса рубинового лазера равна 1 Дж, то при типичной длительности импульса 0,1 мс мощность излучения составляет 10 кВт. Если же длительность импульса уменьшается с

Лазер	Длина волны, мкм	Мощность, Вт
Кадмиевый	0,3250	несколько тысячных
Кадмиевый	0,4416	десятые доли
Аргоновый	0,4880	единицы
Аргоновый	0,5145	десятки
Криптоновый	0,5682	единицы
Гелий-неоновый	0,6328	десятые доли
Гелий-неоновый	1,1523	сотые доли
Ксеноновый	2,0261	сотые доли
Гелий-неоновый	3,3912	сотые доли
СО-лазер	5,6-5,9	сотни
СО ₂ -лазер	9,4-10,6	десятки тысяч
Лазер на молекулах HCN	337	тысячные доли

помощью оптического затвора до 1 мкс, мощность увеличивается до 1 МВт. Существующие в настоящее время устройства позволяют сократить длительность импульса примерно до нескольких фемтосекунд ($1\text{фс}=10^{-15}$ с); если энергия импульса составляет 1 кДж, то мощность лазерного излучения в этом случае равна 10^{18} Вт. Следует иметь в виду, что при воздействии на металл световым лучом с плотностью мощности примерно 10^5 Вт/см² начинается плавление металла. Если же плотность мощности составляет 10^7 Вт/см², то металл закипает, а при плотности мощности 10^9 Вт/см² происходит его испарение.

Замечательной особенностью лазерных пучков является их малая угловая расходимость. Это обусловлено сущностью процесса вынужденного испускания, лежащего в основе работы лазеров. Действительно, затравочный фотон должен двигаться точно вдоль оси резонатора. Фотоны, летящие под

углом, также создают лавину фотонов, однако после нескольких отражений такая лавина покинет активную среду и не будет принимать участие в формировании мощного пучка, выходящего через полупрозрачное зеркало. Нижний предел угловой расходимости (θ_{min}) определяется дифракцией на выходном зеркале:

$$\theta_{min} \cong \frac{\lambda}{D}$$

(здесь D - диаметр полупрозрачного зеркала). Наименьшая расходимость свойственна газовым лазерам - она равна нескольким угловым минутам.

Расходимость излучения твердотельных лазеров составляет примерно 1...3 угловых градуса, наибольшую расходимость имеет излучение полупроводниковых лазеров (10...15 угловых градусов).

Важной характеристикой лазеров является коэффициент полезного действия, который по определению равен отношению энергии светового пучка, излучаемого за 1 секунду, к электрической мощности, потребляемой блоком питания лазера. Коэффициент полезного действия твердотельных лазеров составляет примерно 1...3,5%, газовых – 1...15%, полупроводниковых – 40...60%.

10.4. Применения лазеров

Высокая монохроматичность и когерентность лазерного излучения обеспечивают успешное применение лазеров в научных исследованиях, и прежде всего - в спектроскопии высокого разрешения. С созданием лазеров произошел колоссальный прогресс в развитии нелинейной оптики, в исследовании и использовании таких явлений, как генерация гармоник, самофокусировка световых пучков, многофотонное поглощение. Особо следует отметить применение лазеров в голографии. Лазеры широко используются для инициирования химических реакций, для разделения изотопов, в системах измерения линейных и угловых скоростей, во всех приложениях, основанных на использовании интерференции, в системах связи и светолокации. Высокая плотность энергии и мощность лазерных пучков, возможность фокусировки лазерного излучения в пятно малых размеров используются в лазерных системах термоядерного синтеза, в таких технологических процессах, как лазерная резка, сварка, сверление, поверхностное закаливание и размерная обработка различных деталей. Эти же свойства и направленность лазерного излучения обеспечивают успешное применение лазеров в медицине и в военной технике.

Обработка материалов и сварка. Обработка и сварка материалов с помощью лазеров вылилась в последнее время в мощное направление, которое получило название лазерной обработки материалов. Вот что говорит об этом направлении академик Н. Г. Басов: “Лазерный луч – это уникальный

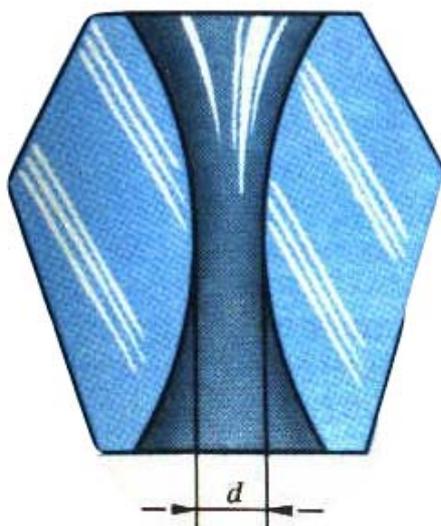
тепловой источник, способный нагреть облучаемый участок детали до высоких температур за столь малое время, в течение которого тепло не успевает рассредоточиться. Нагреваемый участок может быть при этом размягчен, рекристаллизован, расплавлен; наконец, его можно испарить. Дозируя тепловые нагрузки путем регулирования мощности и продолжительности лазерного облучения, можно обеспечить практически любой температурный режим и реализовать различные виды термообработки. Лазерный нагрев используется для поверхностей закалки и легирования металлов, для плавления при сварке, для плавления и испарения с выбросом паров при резке и сверлении”.

Лазерная технология имеет следующие преимущества в сравнении с традиционными способами обработки материалов:

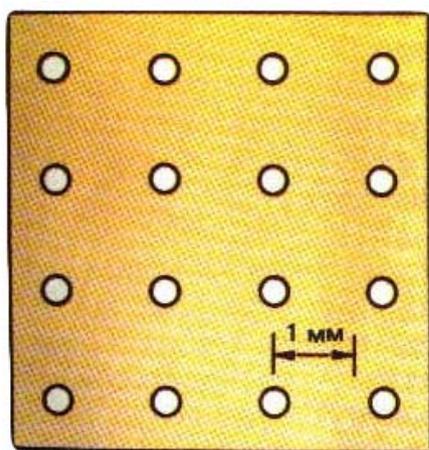
- большое разнообразие процессов обработки самых различных видов материалов (и даже таких, которые не поддаются механической обработке);
- высокая скорость выполнения операций по обработке (иногда в 1000 раз большая, чем при механической);
- высокое качество обработки (гладкость срезов, прочность сварных швов, чистота обработки и др.);
- возможность высокоточной прецизионной обработки (изготовление фильер в алмазе, необходимых для волочения проволоки, изготовление отверстий в рубиновых камнях, необходимых для изготовления часовых механизмов и др.);
- селективность воздействия на отдельные участки обрабатываемой поверхности и возможность дистанционной обработки (в том числе и поверхностей, расположенных за стеклянной перегородкой);
- сравнительная легкость автоматизации операций, способствующая существенному повышению производительности труда.

Первым технологическим применением лазера считается сверление отверстий в рубиновых и алмазных кристаллах. Речь идет о мелких кристаллах рубина, которые используются в часовых механизмах в качестве подшипников скольжения. При изготовлении таких подшипников требуется высверлить в рубине — материале весьма твердом и в то же время хрупком — отверстия диаметром всего 0,1-0,05 мм. Многие годы эта ювелирная операция выполнялась обычным механическим способом с использованием сверл, изготовленных из тонкой твердой проволоки диаметром 40-50 мкм. Такое сверло делало до 30 тысяч оборотов в минуту и одновременно совершало при этом около ста возвратно-поступательных перемещений. Для сверления одного камня требовалось до 10-15 мин. Начиная с 1964 г. малопроизводительное механическое сверление часовых камней стало повсеместно заменяться лазерным сверлением. Понятно, что термин «ла-

зерное сверление» не следует понимать буквально; лазерный луч не сверлит отверстие — он его пробивает, вызывая интенсивное испарение материала. В настоящее время лазерное сверление часовых камней является обычным делом. Для этой цели применяются, в частности, лазеры на стекле с неодимом. Отверстие в камне (при толщине заготовки 0,5-1 мм) пробивается серией из нескольких лазерных импульсов, имеющих энергию 0,5-1 Дж. Производительность работы лазерной установки в автоматическом режиме — один камень в секунду; это в тысячу раз выше производительности механического сверления.



Так выглядит в разрезе отверстие в алмазном фильтре. Лазерными импульсами пробивают черновой канал в алмазной заготовке. Затем, обрабатывая канал ультразвуком, шлифуя и полируя, придают ему нужный профиль.



Эти аккуратные отверстия диаметром 0,3 мм пробиты в пластинке из глиноземной керамики.

Для получения очень тонкой проволоки из меди, бронзы, вольфрама используется технология протягивания металла сквозь отверстие соответствующего диаметра. Поскольку в процессе протягивания проволоки диаметр отверстия должен сохраняться неизменным, лучше всего использовать отверстия в наиболее твердом веществе – алмазе. Применение алмазов с отверстием (алмазных фильтров) позволяет получать сверхтонкую проволоку, имеющую диаметр всего 10 мкм. Опыт показывает, что для

механического сверления одного отверстия в алмазной фильере требуется примерно десять часов; вместе с тем такое же отверстие легко пробивается серией из нескольких мощных лазерных импульсов.

Сегодня лазерное сверление широко применяется не только для особо твердых материалов, но и для материалов, отличающихся повышенной хрупкостью. Лазерное сверло оказалось не только мощным, но и весьма деликатным «инструментом». Например, лазер используется для сверления отверстий в подложках микросхем, изготавливаемых из глиноземной керамики. Керамика необычайно хрупка; в связи с этим механическое сверление производили, как правило, на «сыром» материале. При последующем обжиге подложек происходила некоторая деформация изделия, в том числе искажалось взаимное расположение высверленных отверстий. Проблема была решена с появлением «лазерных сверл»: используя их, можно работать с керамическими подложками, которые уже прошли обжиг. С помощью лазеров пробивают в керамике очень тонкие отверстия — диаметром всего 10 мкм; механическим сверлением такие отверстия получить нельзя.

Помимо «сверления» отверстий, лазерный луч используется для резки самых разных материалов: ткани, дерева, пластмассы, керамики, стекла, листового металла. При резке возгорающихся материалов место разреза обдувают струёй инертного газа; в результате получается гладкий, необожженный край среза. Для резки обычно используют непрерывные лазеры. Нужная мощность излучения зависит от материала и толщины заготовки. Например, для резки досок толщиной 5 см применялся CO_2 -лазер мощностью 200 Вт. Ширина разреза составляла всего 0,7 мм; опилок, естественно, не было. Для резки металлов нужны лазеры мощностью в несколько киловатт. Вместе с тем требуемую мощность можно снизить, применяя метод газолазерной резки: в этом случае одновременно с лазерным лучом на разрезаемую поверхность направляется сильная струя кислорода. При окислении металла в кислородной струе выделяется значительная энергия; в результате этого необходимая мощность снижается до 100-500 Вт. Кроме того, струя кислорода сдувает и уносит из зоны разрезания продукты сгорания металла.

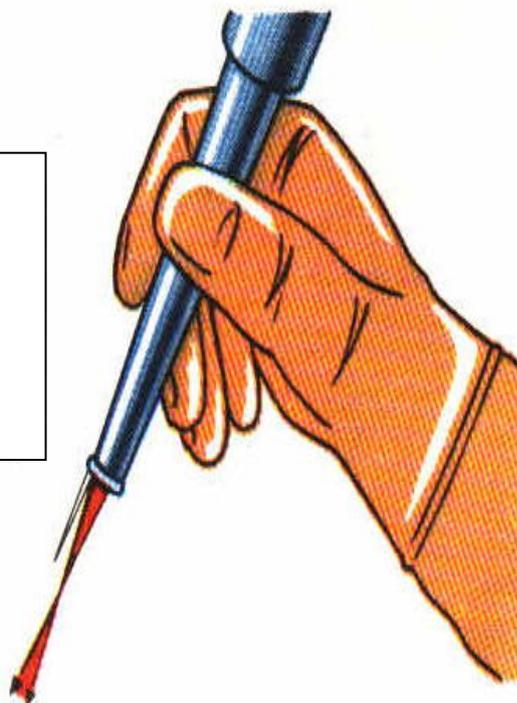
Типичная производственная установка для лазерного раскроя тканей включает CO_2 -лазер мощностью 100 Вт, систему фокусировки и перемещения лазерного луча, устройство для натяжения и перемещения ткани. В процессе раскроя луч перемещается по поверхности ткани со скоростью 1 м/с, диаметр сфокусированного светового пятна равен 0,2 мм, перемещением луча и самой ткани управляет компьютер. Раскрой выполняется быстро, и точно; при этом края разреза оказываются гладкими и прочными. Еще один пример — автоматизированная резка листов алюминия, стали, титана в авиационной промышленности. Так, CO_2 -лазер мощностью 3 кВт разрезает лист титана толщиной 5 мм со скоростью 5 см/с.

Применяя кислородную струю, получают примерно тот же результат при мощности излучения 100-300 Вт.

В развитии лазерной сварки выделяют два этапа. Вначале развивалась точечная сварка — с использованием импульсных лазеров на рубине и на стекле с неодимом. С появлением мощных CO_2 -лазеров и лазеров на гранате с неодимом, дающих непрерывное излучение или последовательность часто повторяющихся импульсов, стала развиваться шовная сварка. Примером точечной лазерной сварки может служить соединение никелевого контакта с зажимом из никелевого сплава на основании транзистора, приваривание тонких медных проводов друг к другу или к зажимам, взаимное соединение микроэлектронных компонентов. Шовная лазерная сварка непрерывным излучением мощностью около 100 Вт применяется для герметизации корпусов приборов, приваривания наконечников к лопастям газовых турбин и кромок из закаленной стали к полотнам металлорежущих пил и т. д. С помощью киловаттных лазеров производят автоматизированную шовную сварку кузовов автомобилей, корпусов судов, труб газопроводов и т. д.

Лазеры в медицине. Свойство лазерного луча пробивать и сваривать различные материалы широко используется в хирургии. В типичном лазерном скальпели используется CO_2 -лазер; его излучение по

Лазерный скальпель в руке хирурга. Хорошо видна маленькая указка на конце выходной трубки. Условно показан выходящий из трубки лазерный пучок (в действительности он невидим).



оптоволоконному световоду попадает в выходную трубку, которую держит в своей руке хирург. Он может свободно перемещать ее в пространстве, тем самым направляя лазерный луч в нужное место. На конце выходной трубки есть маленькая указка; она служит для наведения луча (излучение CO_2 -лазера

невидимо). Луч фокусируется в точке, которая находится на расстоянии 3-5 мм от конца указки. В фокусе лазерного луча концентрируется энергия, достаточная для того, чтобы быстро нагреть и испарить биологическую ткань. Перемещая «лазерный скальпель», хирург рассекает ткань. Глубина разреза зависит от скорости перемещения и от степени кровенаполнения ткани. В среднем она составляет 2-3 мм. Часто рассечение тканей выполняют не в один, а в несколько приемов, рассекая послойно. В отличие от обычного скальпеля, лазерный скальпель не только рассекает ткани, но может также сшивать края разреза; иными словами, может производить биологическую сварку.

Действительно, рассечение производят сфокусированным излучением (хирург должен держать выходную трубку на таком расстоянии от ткани, чтобы точка, в которой фокусируются лучи, оказалась на поверхности ткани). При мощности излучения 20 Вт и диаметре сфокусированного светового пятна 1 мм достигается плотность мощности $2,5 \text{ кВт/см}^2$. Излучение проникает в ткань на глубину около 50 мкм. Следовательно, объемная плотность мощности, идущая на нагрев ткани, достигает 500 кВт/см^3 . При этом происходит их быстрое разогревание и испарение. Если же луч расфокусировать (для этого достаточно немного отодвинуть конец выходной трубки от поверхности ткани) и тем самым снизить интенсивность примерно до 25 Вт/см^2 , то ткань испаряться не будет, но будет происходить поверхностная коагуляция, т.е. «биологическая сварка» разрезанной ткани.

Несомненным достоинством лазерного скальпеля является то, что он обеспечивает полную стерильность (с тканью взаимодействует только излучение). Луч лазера действует локально; испарение ткани происходит только в точке фокуса. Прилегающие участки ткани повреждаются при этом значительно меньше, чем при использовании обычного скальпеля. Как показала клиническая практика, рана от лазерного скальпеля относительно быстро заживает.

Практически одновременно с появлением лазеров были начаты исследования по использованию их для лечения отслойки сетчатки. Эти работы проводились в институте имени Г. Гельмгольца в Москве и в клинике имени В. П. Филатова в Одессе. Для проникновения к больному месту уже не надо производить разрез века и вытаскивать глазное яблоко; операция выполнялась с помощью специально разработанного прибора - офтальмокоагулятора ОК-1. Прибор состоит из основания, на котором размещены источники питания, органы управления и излучающая головка рубинового лазера. На одной оптической оси с лазером располагается система прицеливания, которая позволяет врачу через зрачок тщательно исследовать глазное дно, найти пораженное место и навести на него луч лазера. Энергия импульсов регулируется от 0,02 до 0,1 Дж, вся операция напоминает сварку точечным методом.

Исследования показали, что лазерное излучение оказывает лечебное воздействие на ткани злокачественных опухолей. В частности, лазеры уже

используется для лечения меланомы (рака кожи), при операциях на желудке и пищеводе. В настоящее время проводятся исследования по применению лазеров в нейрохирургии. Поскольку сама излучающая головка достаточно массивна, для подведения лазерного луча к оперируемому участку используют волоконную оптику. Обнаружено весьма эффективное биологическое воздействие красного излучения гелий-неонового лазера. Его стали использовать для лечения заболеваний слизистой оболочки рта, для сращивания костей после переломов, для лечения заболевания вен, приводящего к трофическим язвам, для лечения послеожоговых ран.

Военные применения лазеров.

Лазерный прицел. В большинстве военных применений лазер используется для облегчения наведения оружия на цель. Лазерный прицел – это маленький лазер, обычно работающий в видимом диапазоне. Он прикреплен к стволу пистолета или винтовки так, что его луч параллелен стволу. Благодаря очень малой угловой расходимости лазерного луча, даже на больших расстояниях прицел дает маленькое пятнышко. Стрелок наводит это пятно на цель и таким образом видит, куда направлен ствол оружия. В большинстве прицелов используют лазерный диод с излучением красного цвета («красный диод»). Некоторые используют инфракрасный диод, чтобы получить пятно, не видимое невооруженным глазом, но различимое прибором ночного видения. В 2007 году компания Lasertech, специализирующаяся на выпуске лазеров для военных целей, объявила о начале первого массового производства «зеленых» лазеров, доступных для стрелкового оружия. Предполагается, что луч «зеленого» лазера будет более заметным в условиях яркого солнечного света вследствие более высокой чувствительности сетчатки человеческого глаза к зеленой области спектра.

Системы обнаружения снайперов. Принцип действия таких систем основан на том, что лазерный луч, попадая на прицел оружия снайпера, частично отражается от линз и прочих оптических элементов прицела. Преимуществом таких систем является то, что они активны, т.е. обнаруживают снайперов до



Револьвер, оснащённый лазерным прицелом.

выстрела, а не после. С другой стороны, эти системы демаскируют себя, поскольку являются излучателями. Возможна постановка помех путем «сканирования» лазерным лучом местности, не позволяя вражеским снайперам вести прицельную стрельбу или даже наблюдение в оптические приборы.

Введение противника в заблуждение. Главное назначение таких систем – предотвратить нападение противника. Лазерный луч небольшой мощности направляется в сторону неприятеля (в основном, эта технология используется против авиации и танков). В результате этого противник полагает, что на него нацелено высокоточное оружие; он вынужден замаскироваться или отступить вместо нанесения собственного удара.

Дальномеры. Лазерный дальномер – это устройство, состоящее из импульсного лазера и детектора. Измеряя время, которое затрачивает свет на путь до отражателя и обратно, можно рассчитать расстояние до отражающего объекта. Знание расстояния до цели необходимо для точного наведения оружия, например – танковой пушки.

Лазерное наведение. Такие системы имеют в своем составе лазер небольшой мощности, «подсвечивающий» цель. Ракета или бомба, выпускаемая с самолета, автоматически изменяет траекторию полета, ориентируясь на отраженный от цели луч, что обеспечивает высокую точность попадания. Лазерный излучатель может находиться как на самолёте, так и на земле. В устройствах лазерного наведения обычно используют инфракрасные лазеры, поскольку их работу проще скрыть от противника.

Лазерное стрелковое оружие. Главное военное применение лазеров, которое возникает в сознании неспециалиста, обычно связывается с использованием их в конструкции лазерного стрелкового оружия, способного уничтожать пехоту, танки и даже самолёты. На практике такие идеи наталкиваются на серьёзное препятствие — при современном уровне технологий лазер, способный нанести повреждение человеку, окажется слишком тяжёлым (с учётом источника питания) для переноски в одиночку. Устройство, обладающее достаточной мощностью для выведения из строя танка либо самолета, будет крайне громоздким и чувствительным к вибрациям, что исключает его полевое применение. В первую очередь это объясняется весьма низким КПД лазера: для получения достаточного для поражения цели количества излучаемой энергии необходимо затратить в десятки (иногда сотни) раз больше энергии для накачки рабочего тела лазера. Например, для нанесения повреждения, аналогичного удару снаряда авиационной пушки тридцатого калибра, требуется лазерный импульс мощностью около 5 килоджоулей; импульс с энергией 1,6 килоджоуль будет

эквивалентен 9-мм пуле стрелкового оружия. С учетом к.п.д. источник питания лазера должен выдать мощность в десятки раз большую. Именно масса источников накачки лазера в значительной степени определяет габариты подобного оружия. Кроме того, из-за низкого к.п.д. лазера в конструкции оружия необходима система охлаждения для отвода тепла. Если же охлаждение будет неэффективно, скорострельность оружия резко снизится. Следует отметить, что проблема теплоотвода отчасти решена в лазерах с химической накачкой (например, в кислородно-йодном и дейтерий-фторном лазерах большой мощности), где отработанные химические компоненты выбрасываются из системы после испускания импульса, унося тепло. При этом, однако, для эффективной работы лазера требуется большой запас этих реагентов (некоторые из них агрессивны) и соответствующие ёмкости для хранения.

Таким образом, в настоящее время создание эффективного стрелкового лазерного вооружения для применения в полевых условиях проблематично. Остаётся возможность использования лазера для ослепления противника, для чего достаточен портативный лазер небольшой мощности. Несмотря на то, что в настоящее время использование таких устройств запрещено международными правилами ведения войн, лазеры малой мощности все же используются для ослепления снайперов противника и выявления скрытых огневых точек.

Лазерные имитаторы стрельбы и тренажеры. Помимо прямого воздействия лазерного излучения на объекты поражения, имеются сообщения о применении лазеров в имитаторах стрельбы и тренажерах. Благодаря малой расходимости луча, использование в таких системах лазеров позволяет значительно повысить реальность имитации попадания в цель. При этом обеспечивается «безопасность» стрельбы, а также возможность проводить тренировки в любое время суток. Лазерными имитаторами предполагается оснастить танковые подразделения, что позволит разыгрывать бои в условиях, максимально приближенных к боевым. Так как имитаторы стрельбы и тренажеры соответствуют по дальности стрельбы тем видам оружия, которые они имитируют (от сотен метров до нескольких километров), то в данном случае допустимо использовать маломощные твердотельные лазеры, газовые и полупроводниковые лазеры, простые по конструкции, надежные в эксплуатации, безопасные для «противника». Отмечается, что влияние тумана и дымки на прохождение лазерного излучения в атмосфере дает положительный эффект для тренировок. Опыт показывает, что если условия стрельбы ухудшаются, но наводчик видит цель в пределах возможностей своего оружия, то излучение лазера также достигает цели.

Тренажер включает два комплекта аппаратуры: первым оборудуется наводчик, вторым — объект поражения: танк, самолет, вертолет и т. п. Аппаратура наводчика содержит оптический прицел, через который он

наблюдает объект поражения и удерживает перекрестье прицела на цели, лазерный источник излучения и блок управления его работой, пульт регистрации попадания и приемник попаданий. На объекте поражения устанавливается блок имитатора попаданий. Он состоит из набора фотоприемников, размещенных на объекте в различных его точках (на башне, на защитном щитке водителя, на баке с топливом и т. д.), и командного устройства, включающего в работу световой, звуковой или дымовой имитатор, который указывает экипажу о поражении танка, а также наводчику — о попадании в объект поражения.

Быстродействие лазерных тренажеров дает возможность использовать их для имитации стрельбы любых средств поражения по целям, обладающих любой начальной скоростью. В такие имитаторы включаются устройства, обеспечивающие задержку «выстрела» в целях приведения его в соответствие с полетным временем снаряда или пули, а также при стрельбе по движущимся целям с упреждением. Проведенные испытания позволяют сделать вывод, что при использовании тренажеров качество подготовки стрелков и наводчиков повышается; при этом существенно сокращается стоимость учебных стрельб за счет экономии боеприпасов и за счет многократного использования мишеней.

Лазерные имитаторы стрельбы и тренажеры непрерывно совершенствуются. Если в первых сериях тренажеров в качестве источника излучения применялся рубиновый лазер, то впоследствии он был заменен лазером полупроводникового типа на арсениде галлия. Затем изменениям подверглась прицельная система. В нее были включены дополнительные линзы и зеркала, которые имитируют введение упреждения при стрельбе по движущимся целям и установку требуемого угла возвышения. Прицеливание производится по результатам измерения дальности с помощью лазерной дальномерной приставки, которая выдает величину коррекции направления луча с тем, чтобы установка прицела соответствовала истинному расстоянию до цели и баллистике имитируемого снаряда. Приемники лазерного излучения расположены по периметру башни танка. При попадании луча лазера, имитирующего выстрел орудия, на один из приемных фотодетекторов, включается блок радиостанции, который посылает стреляющему танку сигнал о поражении цели. Одновременно в танке-цели включается сигнальное устройство, информирующее экипаж о поражении их танка. Кроме того, баллон, смонтированный на башне танка, начинает дымить в течение 30 с. Иногда вместо одного баллона устанавливают ряд педард, что дает гораздо больший эффект

Большинство из перечисленных выше областей применения лазеров представляет собой самостоятельные и обширные разделы науки или техники и требует, естественно, самостоятельного рассмотрения. Цель приведенного здесь краткого и неполного перечня применений лазеров -

проиллюстрировать то громадное влияние, которое оказало появление лазеров на развитие науки и техники, на жизнь современного общества.

Заключение

Лазеры решительно и широким фронтом вторглись в жизнь. Они необычайно расширили наши возможности в различных областях - в технологии, медицине, метрологии, обработке и передачи информации, физических, химических и биологических исследованиях, в военном деле. Нарастающие темпы исследований в области лазерной физики и техники открывают возможности создания лазеров новых типов с улучшенными характеристиками, позволяющими еще больше расширить области их применения. В частности, увеличение мощности излучения твердотельных лазеров создает новые перспективы для реализации лазерного управляемого термоядерного синтеза – глобальной проблемы, решение которой обеспечит человечество практически неисчерпаемым источником энергии. Особое место в технологии обработки материалов отводится лазерам на CO_2 . Можно ожидать, что установки на их основе заменят оборудование, традиционно используемого в области тяжелого машиностроения. Простота управления лазерным лучом в сочетании с использованием современных средств программного управления позволит широко использовать лазерные установки в автоматизированных системах. Дальнейшее совершенствование одночастотных лазеров, в особенности лазеров с плавной перестройкой частоты (жидкостные лазеры) значительно расширит их применение в химической технологии, в частности – для разделения изотопов расщепляющихся материалов. Лазеры с высокостабилизированной частотой позволят в еще большей мере использовать голографические и интерференционные методы измерений, к которым в настоящее время проявляется все возрастающий интерес специалистов самых различных отраслей науки и техники.

Перечислить все применения лазеров, которые имеют место в настоящее время и ожидаются в перспективе, в настоящем пособии ограниченного объема практически невозможно. Однако можно выразить уверенность в том, что области применения лазерной техники будут множиться и расширяться.

Список использованной литературы

1. Применения лазеров. Под редакцией д-ра техн. Наук В.П. Тычинского, издательство "Мир", Москва 1974.
2. К.И., Прокопенко В.Т., Митрофанов А.С. Л. Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1978.
3. Лазеры и их применение. Тарасов Л.В. Учебное пособие для ПТУ. М.: Радио и связь, 1983.
4. Лазеры: действительность и надежды. Тарасов Л.В. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985.
5. Лазеры. Основы устройства и применения. Федоров Б.Ф. М.: ДОСААФ, 1988.
1. Летохов В.С., Чеботаев В.П. Принципы нелинейной лазерной спектроскопии. - М.: Наука. 1985.
2. Акулин В.М., Карлов Н.В. Интенсивные резонансные взаимодействия в квантовой электронике. М., Наука. Глав. ред. физ.-мат. лит. 1987.-312с.
3. Иванов В.А., Привалов В.Е. Применение лазеров в приборах точной механики. С-Пб. Политехника. 1993. -216с.
4. Бакланов Е.В., Покасов П.В. Оптические стандарты частоты и фемтосекундные лазеры. Квантовая электроника. 2003. Т.33. №5. С.383-400.
5. Шалагин А.Н. Эффект СИД. Соросовский Образовательный Журнал. 1996. №6
6. Дударев А.Л. Лучевая терапия, Л.: Медицина, 1982, 191 с.
7. Лазерная и магнитно-лазерная терапия в медицине, Тюмень, 1984, 144 с.
8. Современные методы лазерной терапии, Отв. Ред. Б.И. Хубутя, - Рязань.:1988 г.,126 с.
9. Терапевтическая эффективность низкоинтенсивного лазерного излучения., А.С. Крюк, В.А. Мостовников и др., - Минск.: Наука и техника, 1986 г., 231 с.
10. Лазерные методы лечения и ангиографические исследования в офтальмологии, Сб. науч. тр. Под ред. С.Н. Федорова, 1983 г., 284 с.
11. Лазеры в клинической медицине, Н. Д. Девятков, - М.: Медицина, 1981 г., 399 с.
12. Лазеры в хирургии. Под ред. О.К. Скобелкина. - М.: Медицина, 1989, 254 с.
13. Журнал "Медтехника", 1995 г. -№3; 1996 г. -№4

Сергеев Иван Иванович

ОСНОВЫ ФИЗИКИ ЛАЗЕРОВ

Учебное пособие

для студентов БГУИР всех специальностей

и форм обучения