

Лекция 12. Спонтанное и индуцированное излучение.

Коэффициенты «А» и «В» Эйнштейна. Активные среды с инверсной заселенностью энергетических уровней. Оптические квантовые генераторы. Особенности лазерного излучения. Основные типы лазеров, их применение.

Вынужденное излучение. Коэффициенты «А» и «В» Эйнштейна.

Атом может *самопроизвольно* перейти из одного состояния в другое, энергия которого меньше энергии предыдущего. Такой переход (и испускаемое при этом излучение) называется *спонтанным*.

Под действием *внешнего* излучения атом также может перейти из одного состояния в другое. Если энергия конечного состояния больше энергии начального, то атом поглощает энергию. Если энергия конечного состояния меньше энергии начального, то атом испускает энергию. Такой тип излучения называется *вынужденным* или *индуцированным излучением*. При этом внешнее излучение принято называть *вынуждающим излучением*.

Направление распространения вынужденного излучения, его частота, фаза, поляризация полностью совпадают, соответственно, с направлением, частотой, фазой и поляризацией вынуждающего излучения. Следовательно, вынужденное и вынуждающее излучения являются строго когерентными.

Рассмотрим у атома какие-то два уровня энергии E_n и E_m , $E_m > E_n$. Для упрощения исследования предположим, что переход с уровня E_n на уровень E_m может быть *только* при поглощении кванта энергии, а обратный переход, с испусканием кванта энергии, может быть как спонтанным, так и вынужденным. Обозначим вероятность вынужденного перехода (в единицу времени) с уровня E_n на уровень E_m как P_{nm} , а вероятность вынужденного обратного перехода - P_{mn} . При высокой температуре $T \rightarrow \infty$ доля спонтанных переходов будет незначительной, поэтому будут преобладать вынужденные переходы, следовательно, из условия термодинамического равновесия следует, что вероятности прямого и обратного переходов должны быть равными $P_{nm} = P_{mn}$.

Вероятность перехода с частотой ω под действием вынуждающего излучения должна быть пропорциональна спектральной объёмной плотности энергии этого излучения $P_{nm} = B_{nm} u_\omega$, $P_{mn} = B_{mn} u_\omega$. Коэффициенты пропорциональности B_{nm} и B_{mn} называются *коэффициентами* (коэффициенты «В») Эйнштейна. Из равенства $P_{nm} = P_{mn}$ следует $B_{nm} = B_{mn}$.

В состоянии термодинамического равновесия количество атомов, перешедших в единицу времени с одного уровня энергии на другой, должно быть равным количеству атомов, перешедших в обратном направлении $N_{nm} = N_{mn}$. Но так как переход с меньшего уровня энергии E_n на больший $E_m > E_n$ может быть только вынужденным, то $N_{nm} = N_{nm}^{ВЫНУЖД}$. Обратный переход (с большего уровня энергии на меньший) может быть как спонтанным, так и вынужденным

$$N_{mn} = N_{mn}^{СПОНТ} + N_{mn}^{ВЫНУЖД}.$$

Тогда в состоянии термодинамического равновесия выполняется равенство

$$N_{nm}^{ВЫНУЖД} = N_{mn}^{СПОНТ} + N_{mn}^{ВЫНУЖД}.$$

Вероятность спонтанного перехода (в единицу времени) с высокого уровня энергии на низкий обозначим как A_{mn} (это обозначение называется коэффициентом «А» Эйнштейна).

Количество атомов, находящихся в состоянии с энергией E_n обозначим через N_n , а в состоянии с энергией E_m - N_m .

Количество атомов, перешедших за единицу времени с одного уровня энергии на другой должно быть пропорциональным количеству атомов, находящихся на начальном уровне энергии $N_{nm}^{ВЫНУЖД} = P_{nm} N_n = B_{nm} u_\omega N_n$, $N_{mn}^{ВЫНУЖД} = P_{mn} N_m = B_{mn} u_\omega N_m$, $N_{mn}^{СПОНТ} = A_{mn} N_m$.

Подставляем эти выражения в условие термодинамического равновесия и получаем

$$B_{nm} u_{\omega} N_n = A_{mn} N_m + B_{mn} u_{\omega} N_m$$

откуда можно найти спектральную объёмную плотность равновесного излучения

$$u_{\omega} = \frac{A_{mn} N_m}{B_{mn} N_n - B_{mn} N_m} = \frac{A_{mn}}{B_{mn}} \frac{1}{N_n/N_m - 1}.$$

Для равновесной термодинамической системы можно применить классическое распределение Больцмана. Вероятность нахождения системы в одном из состояний со значением энергии E_n определяется выражением

$$p_n = \frac{\exp\left(-\frac{E_n}{kT}\right)}{\sum_i \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right)}$$

здесь суммирование проводится по полному набору дискретных значений $\{E_1, E_2, \dots, E_N\}$.

Пусть общее число атомов системы равно N , тогда число атомов, находящихся в состоянии с энергией E_n равно $N_n = p_n N$, а в состоянии с энергией E_m - соответственно $N_m = p_m N$. Откуда

$$\frac{N_n}{N_m} = \frac{p_n N}{p_m N} = \frac{\exp\left(-\frac{E_n}{kT}\right)}{\sum_i \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right)} \bigg/ \frac{\exp\left(-\frac{E_m}{kT}\right)}{\sum_i \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right)} = \exp\left(\frac{E_m - E_n}{kT}\right)$$

Но разность энергий равна энергии кванта излучения $E_m - E_n = \hbar\omega$. В итоге, $\frac{N_n}{N_m} = \exp\left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right)$.

Подставим это выражение в формулу для спектральной объёмной плотности энергии

$$u_{\omega} = \frac{A_{mn}}{B_{mn}} \frac{1}{N_n/N_m - 1} = \frac{A_{mn}}{B_{mn}} \frac{1}{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right) - 1}.$$

Эта формула должна совпадать с формулой Планка для спектральной объёмной плотности энергии

$$u_{\omega,T} = \frac{\hbar\omega^3}{\pi^2 c^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right) - 1}.$$

Поэтому $A_{mn} = \frac{\hbar\omega^3}{\pi^2 c^3} B_{mn}$. Откуда находим для вероятности спонтанного перехода

$$A_{mn} = \frac{\hbar\omega^3}{\pi^2 c^3} B_{mn} \frac{u_{\omega,T}}{u_{\omega,T}} = \frac{\hbar\omega^3}{\pi^2 c^3} \frac{P_{mn}}{\left(\frac{\hbar\omega^3}{\pi^2 c^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right) - 1}\right)} = P_{mn} \left(\exp\left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right) - 1\right).$$

Т.е., действительно, при больших значениях температуры $T \rightarrow \infty$ вероятность спонтанного перехода в единицу времени значительно меньше вероятности вынужденного перехода.

Замечание. Вероятность спонтанного перехода с верхнего уровня энергии на нижний обратно пропорциональна среднему времени жизни возбуждённого состояния.

Активные среды с инверсной заселенностью энергетических уровней.

Вещество, находящееся в состоянии термодинамического равновесия поглощает проходящее через него излучение. Обычно в веществе количество атомов в основном состоянии гораздо больше, чем атомов возбужденных. Поэтому электромагнитная волна, проходя по веще-

ству, расходует свою энергию на возбуждение атомов. Интенсивность излучения I при этом падает, подчиняясь закону Бугера:

$$I = I_0 e^{-kl}$$

l – геометрическая длина хода луча, I_0 – начальная интенсивность при $l = 0$, k – коэффициент поглощения.

В случае, когда количество атомов, находящихся в возбужденном состоянии превышает количество атомов в основном состоянии, возможна ситуация, при которой интенсивность излучения будет возрастать по мере прохождения излучения сквозь вещество.

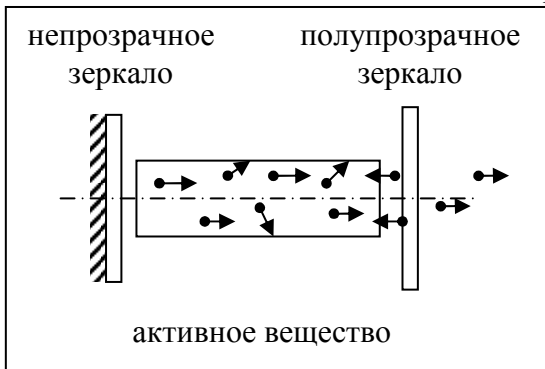
Вещество, в котором возбужденных атомов гораздо больше, чем атомов в основном состоянии, называется *активным*. Число атомов N_m на определенном уровне энергии E_m называется заселенностью этого уровня, а ситуация, когда $N_m > N_n$ при $E_m > E_n$ – *инверсной заселенностью* уровней.

Пусть по активному веществу проходит электромагнитная волна, частота которой соответствует переходу между уровнями энергии $\omega_{nm} = \frac{E_m - E_n}{\hbar}$ с инверсной заселённостью. Тогда за счет индуцированного излучения при вынужденных переходах $E_m \rightarrow E_n$ (которых будет значительно больше, чем актов поглощения $E_n \rightarrow E_m$) будет происходить ее усиление. «Наглядно» это означает, что каждый пролетевший сквозь вещество фотон вызывает появление точно такого же фотона. Вместе они порождают еще два фотона, эти четыре – восемь и так далее – в активном веществе возникает фотонная лавина. Такое явление приводит к экспоненциальному закону нарастания интенсивности излучения, который записывается аналогично закону Бугера, но с коэффициентом (квантового) усиления α вместо коэффициента поглощения k : $I = I_0 e^{\alpha l}$.

Замечание. Из отношения для населённости уровней $\frac{N_m}{N_n} = \exp\left(\frac{E_m - E_n}{kT}\right)$ формально следует,

что инверсная населённость уровней $N_m > N_n$ при $E_m > E_n$ возможна при $T < 0$. Поэтому инверсную населённость уровней иногда называют состоянием с «отрицательной» температурой.

На практике, однако, столь стремительного роста числа фотонов не происходит. В реальных веществах всегда есть множество факторов, вызывающих потерю энергии электромагнитной волны (рассеяние на неоднородностях среды, поглощение примесями и пр.). В итоге, можно добиться усиления волны хотя бы в десятки раз, только увеличив длину ее пробега в активной среде до нескольких метров, что осуществить нелегко. Но есть и другой



путь: поместить активное вещество между двумя параллельными зеркалами (в так называемый *оптический резонатор*). Волна, многократно отражаясь от них, пройдет достаточное для большого усиления расстояние, если, конечно, число возбужденных атомов будет оставаться большим, т.е. сохранится инверсная

заселенность.

Если одно из зеркал резонатора сделать полупрозрачным, то часть излучения выйдет наружу, а часть, после отражения будет возвращена в активную среду для генерации нового вынужденного излучения. (Так называемая *обратная связь*.)

В качестве «глухого» зеркала нередко используют призму полного внутреннего отражения, в качестве полупрозрачного – стопу стеклянных пластин.

После многократных отражений от зеркал останутся только те лучи, которые практически параллельны оси системы, остальные выйдут через боковые поверхности системы. (Как мы знаем, угол расхождения лучей в пучке $\delta\varphi \approx \frac{\lambda}{b}$ обратно пропорционален ширине пучка b . По-

этому, даже при очень точном расположении параллельных плоских зеркал расхождение лучей является неустраняемым.)

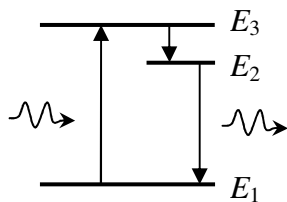
Замечание. Иногда применяют сферические зеркала большого радиуса.

После многократных отражений в системе появится большое количество волн, испущенных в разные моменты времени. Т.к. эти волны порождены вынужденным излучением, то они являются когерентными и между ними должна наблюдаться интерференция при отражении от зеркал. Если расстояние между зеркалами равно L , то условие усиления интенсивности для волн с длиной волны λ после N проходов (одной из них) между зеркалами имеет вид $LN = m\lambda$ (m – целое число). Ввиду наличия естественной спектральной ширины излучения, в составе индуцированного излучения будут волны с длинами в некотором интервале $(\lambda, \lambda + \delta\lambda)$. Поэтому «выставляя» определенное расстояние между зеркалами можно добиться того, чтобы усиливалась та длина волны, на которую приходится максимум интенсивности излучения.

Инверсную заселенность можно осуществлять и поддерживать при помощи отдельного источника энергии, который как бы «накачивает» ею активное вещество. Таким источником может быть мощная лампа, электрический разряд, химическая реакция и т.п. Процесс создания инверсной заселенности уровней называют «накачкой».

Кроме того нужно, чтобы атомы на одном из верхних энергетических уровней оставались достаточно долго (относительно среднего времени жизни возбужденного состояния) и чтобы там накопилось достаточное количество атомов вещества. А для этого необходимо иметь как минимум три уровня энергии рабочих частиц (атомов или ионов).

Трехуровневая схема генерации излучения работает следующим образом. Накачка переводит атомы с нижнего энергетического уровня E_1 на самый верхний E_3 . Оттуда они спускаются



на метастабильный уровень E_2 , где могут находиться достаточно долго без спонтанного испускания фотонов. И только под воздействием проходящей электромагнитной волны атом возвращается на основной уровень E_1 , испуская вынужденное излучение частотой

$$\omega = \frac{E_2 - E_1}{\hbar}, \text{ когерентное исходной волне.}$$

Устройства, в которых реализуется указанный принцип генерации вынужденного излучения получили общее название – *квантовые генераторы*.

Излучение, получаемое с помощью квантовых генераторов, обладает большой пространственной и временной когерентностью, высокой степенью монохроматичности, является поляризованным и узконаправленным потоком излучения (имеет малый угол расхождения пучка).

Оптические квантовые генераторы.

Особенности лазерного излучения. Основные типы лазеров, их применение.

Мазер (от английской аббревиатуры MASER - *microwave amplification by stimulated emission of radiation* - усиление микроволн с помощью вынужденного излучения) - квантовый генератор, излучающий в диапазоне радиоволн.

Лазер (от английской аббревиатуры LASER - *light amplification by stimulated emission of radiation* - усиление света посредством вынужденного излучения) - оптический квантовый генератор, излучающий в диапазоне видимого света.

Явление индуцированного излучения было предсказано Эйнштейном в 1916 году. Условия создания инверсной населенности и экспериментального обнаружения вынужденного излучения сформулировал немецкий физик Р. Ланденбург в 1928 г. и независимо от него советский физик В.А.Фабрикант в 1939 г. Вынужденное излучение в виде коротких радиоимпульсов впервые наблюдали американские физики Е.Парселл и Р.Паунд в 1950 г. Принципиальную возможность построения квантовых генераторов начали обсуждать уже в начале 1950-х независимо друг от друга в СССР Н.Г.Басов с А.М.Прохоровым, и в США Ч.Таунс с Дж.Вебером. А в 1954–1956 был разработан и сконструирован первый квантовый генератор радиодиапазона - ма-

зер ($\lambda = 1,25$ см), в 1960 – лазер на рубине и газовый лазер, и спустя два года – полупроводниковый лазер.

В 1964 г Прохорову, Басову и Таунсу была присуждена Нобелевская премия по физике «за фундаментальные работы в области квантовой электроники, которые привели к созданию осцилляторов и усилителей, основанных на принципе лазера - мазера». Изначально, после изобретения, считалось, что мазер - чисто человеческое творение, однако позже астрономы обнаружили, что некоторые из далёких галактик работают как исполинские мазеры. В огромных газовых облаках, размером в миллиарды километров, возникают условия для генерации, а источником накачки служит космическое излучение. Мазеры используются в технике (в частности, в космической связи), в физических исследованиях, а также как квантовые генераторы стандартной частоты

Несмотря на большое разнообразие типов активных сред и методов получения инверсной заселенности все лазеры имеют три основные части: активную среду, систему накачки и резонатор.

Активная среда – вещество, в котором создается инверсная заселенность, – может быть твердой (кристаллы рубина или алюмо-иттриевого граната, стекло с примесью неодима в виде стержней различного размера и формы), жидкой (растворы анилиновых красителей или растворы солей неодима в кюветах) и газообразной (смесь гелия с неоном, аргон, углекислый газ, водяной пар низкого давления в стеклянных трубках). Полупроводниковые материалы и холодная плазма, продукты химической реакции тоже дают лазерное излучение. В зависимости от типа активной среды лазеры называются рубиновыми, гелий-неоновыми, на красителях и т.п.

Накачка создает инверсную заселенность в активных средах, причем для каждой среды выбирается наиболее удобный и эффективный способ накачки. В твердотельных и жидкостных лазерах используют импульсные лампы или лазеры, газовые среды возбуждают электрическим разрядом, полупроводники – электрическим током.

Как уже отмечалось, излучение, получаемое с помощью лазеров, обладает большой пространственной и временной когерентностью, высокой степенью монохроматичности, является поляризованным и узконаправленным потоком излучения (имеет малый угол расхождения пучка). Как правило, расхождение пучка лучей достигает 10^{-5} рад. Это значит, что на Луне такой пучок, посланный с Земли, даст пятно диаметром около 3 км.

Лазеры являются самыми мощными источниками светового излучения. В узком интервале спектра (в течение промежутка времени, продолжительностью порядка 10^{-13} с) у некоторых типов лазеров достигается мощность излучения порядка 10^{17} Вт/см², в то время как мощность излучения Солнца равна только $7 \cdot 10^3$ Вт/см², причём суммарно по всему спектру. На узкий же интервал $\lambda \sim 10^{-6}$ см (это ширина спектральной линии лазера) приходится у Солнца всего лишь 0,2 Вт/см². Если задача заключается в преодолении порога в 10^{17} Вт/см², то прибегают к различным методам повышения мощности.

Рубиновый лазер.

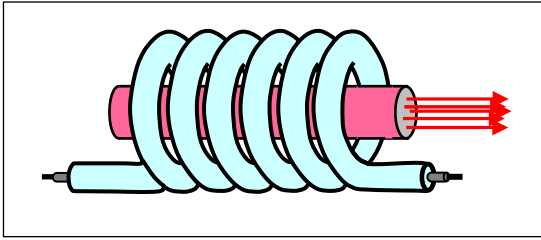
В декабре 1960 г. Т. Мейман (США) построил первый успешно работавший оптический квантовый генератор, в котором в качестве активного вещества был использован синтетический рубин.

Рубин является одним из широко используемых материалов для твердотельных лазеров, применяемых в голографии, главным образом из-за большой энергии выходного излучения и его длины волны.

Рубин представляет собой окись алюминия, в которой часть атомов алюминия замещена атомами хрома ($Al_2O_3 \cdot Cr_2O_3$). Активным веществом служат ионы хрома Cr^{3+} . От содержания хрома в кристалле зависит его окраска. Обычно используется бледно-розовый рубин, содержащий около 0,05% хрома (от веса рубина). Рубиновый кристалл выращивают в специальных печах, затем полученную заготовку отжигают и обрабатывают, придавая ей форму стержня. Длина стержня колеблется от 2 до 30 см, диаметр от 0,5 до 2 см. Плоские торцовые концы делают строго параллельными, шлифуют и полируют с высокой точностью. Иногда отражающие поверхности наносят не на отдельные отражающие пластины, а непосредственно на торцы руби-

нового стержня. Поверхности торцов серебруют, причем поверхность одного торца делают полностью отражающей, другого - отражающей частично. Обычно коэффициент пропускания света второго торца составляет около 10—25%, но может быть и другим.

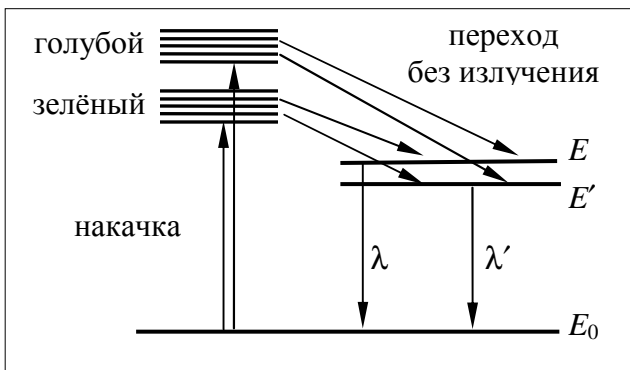
Кристалл рубина имеет две полосы поглощения: в зеленой и в голубой части спектра. Помимо этих полос имеются два узких энергетических уровня E и E' , при переходе с которых



на основной уровень E_0 атом излучает свет с длинами волн $\lambda=694,4$ нм и $\lambda'=692,8$ нм. Ширина этих линий $\sim 0,4$ нм, вероятность вынужденных переходов для линии 694,4 нм больше, чем для $\lambda'=692,8$ нм.

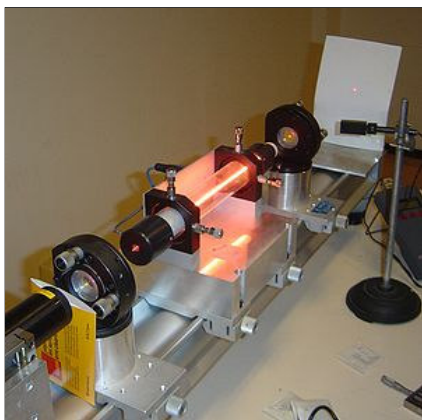
В рубиновом лазере используется оптическая накачка ксеноновой лампой, которая дает вспышки белого света большой интенсивности при прохождении через нее импульса тока. Для этого рубиновый стержень помещают в спиральную импульсную ксеноновую лампу, витки которой охватывают его со всех сторон. Вспышка лампы длится миллисекунды. За это время лампа потребляет энергию в несколько тысяч джоулей, большая часть которой уходит на нагревание прибора. Газ ксенон при этом разогревается до нескольких тысяч градусов. Непрерывная накачка невозможна, т.к. лампа не выдерживает длительного нагрева. Излучение лампы накачки поглощается ионами Cr^{3+} в области полос поглощения. Затем с этих уровней ионы Cr^{3+} очень быстро в результате безизлучательного перехода переходят на энергетические уровни E и E' . Излишек энергии передается кристаллической решетке в энергию ее колебаний (энергию фононов). Уровни E и E' - метастабильны (время жизни атома на уровне E' равно 4,3 мс). Таким образом, создается значительная инверсная населенность активной среды относительно уровня E_0 .

Для этого рубиновый стержень помещают в спиральную импульсную ксеноновую лампу, витки которой охватывают его со всех сторон. Вспышка лампы длится миллисекунды. За это время лампа потребляет энергию в несколько тысяч джоулей, большая часть которой уходит на нагревание прибора. Газ ксенон при этом разогревается до нескольких тысяч градусов. Непрерывная накачка невозможна, т.к. лампа не выдерживает длительного нагрева. Излучение лампы накачки поглощается ионами Cr^{3+} в области полос поглощения. Затем с этих уровней ионы Cr^{3+} очень быстро в результате безизлучательного перехода переходят на энергетические уровни E и E' . Излишек энергии передается кристаллической решетке в энергию ее колебаний (энергию фононов). Уровни E и E' - метастабильны (время жизни атома на уровне E' равно 4,3 мс). Таким образом, создается значительная инверсная населенность активной среды относительно уровня E_0 .



Затем с этих уровней ионы Cr^{3+} очень быстро в результате безизлучательного перехода переходят на энергетические уровни E и E' . Излишек энергии передается кристаллической решетке в энергию ее колебаний (энергию фононов). Уровни E и E' - метастабильны (время жизни атома на уровне E' равно 4,3 мс). Таким образом, создается значительная инверсная населенность активной среды относительно уровня E_0 .

Гелий-неоновый лазер



Гелий-неоновый лазер. Светящийся луч в центре - электрический разряд.

В гелий-неоновом $He-Ne$ лазере активной средой является газообразная смесь гелия и неона. Генерация осуществляется при переходах между энергетическими уровнями Ne , а He играет роль посредника, через который энергия накачки передается атомам Ne .

Атом Ne может генерировать в результате более 130 различных энергетических переходов. Однако наиболее интенсивными являются линии излучения 632,8 нм, 1,15 мкм, и 3,39 мкм. При пропускании тока через смесь $He-Ne$ атомы гелия в результате электронных ударов возбуждаются до состояний 2^3S и 2^2S , которые являются метастабильными, т.к. переход с них в основное состояние запрещен квантово-механическими правилами отбора. Когда возбужденный атом гелия сталкивается с невозбужденным атомом неона, то энергия переходит от He к Ne . Этот переход происходит весьма эффективно, т.к. уровни $2S$ и $2S$ атома Ne совпадают с соответствующими энергетическими

уровнями атома Ne . В следствие этого на уровнях $3S$ и $2S$ неона образуется инверсная населенность относительно уровней $3P$ и $2P$.

$He-Ne$ лазер работает в непрерывном режиме. На торцы лазерной трубки наклеены многослойные зеркала под углами Брюстера к оси. Это обеспечивает линейную поляризацию излучения. Давление $He-332Па$, $Ne-66Па$ в трубке, постоянное напряжение на электродах в трубке $4кВ$, коэффициенты отражения зеркал 0,999 и 0,990. Гелий-неоновые лазеры компактны, ти-

пичный размер резонатора - от 15 см до 0,5 м, их выходная мощность варьируется от 1 до 100 мВт.

Полоса пропускания, в которой сохраняется эффект усиления излучения рабочим телом лазера, довольно узка, и составляет около 1,5 ГГц, что объясняется наличием доплеровского смещения. Это свойство делает гелий-неоновые лазеры хорошими источниками излучения для использования в голографии, спектроскопии, а также в устройствах считывания штрих-кодов.

Виды лазеров.

Рабочее тело является основным определяющим фактором рабочей длины волны, а также остальных свойств лазера. Существует большое количество различных рабочих тел, на основе которых можно построить лазер.

В лазерах, в основном, используются следующие рабочие тела. *Твёрдые тела*, такие как кристаллы и стекло. *Газы*, например, углекислый газ, аргон, криптон или смеси, такие как в гелий-неоновых лазерах. *Полупроводники* - материалы, в которых переход электронов между энергетическими уровнями может сопровождаться излучением. *Жидкости*, как, например, в лазерах на красителях.

Источник накачки подаёт энергию в систему. В его качестве могут выступать: электрический разрядник, импульсная лампа, дуговая лампа, другой лазер, химическая реакция, взрывчатое вещество.

По виду рабочего тела лазеры делятся на типы.

Твердотельные лазеры на люминесцирующих твёрдых средах (диэлектрические кристаллы и стёкла). В качестве активаторов обычно используются ионы редкоземельных элементов или ионы группы железа Fe. Сплошной материал обычно легировается (*активируется*) добавкой небольшого количества ионов хрома, неодима, эрбия или титана. Типичные используемые кристаллы: алюмо-иттриевый гранат (YAG), литиево-иттриевый фторид (YLF), сапфир (оксид алюминия) и силикатное стекло. Самые распространённые варианты: Nd:YAG, титан-сапфир, хром-сапфир (известный также как рубин), легированный хромом стронций-литий-алюминиевый фторид (Cr:LiSAF), Er:YLF и Nd:glass (неодимовое стекло). Накачка - оптическая и от полупроводниковых лазеров, осуществляется по трёх- или четырёхуровневой схеме. Твердотельные лазеры обычно накачиваются импульсной лампой или другим лазером. Современные твердотельные лазеры способны работать в импульсном, непрерывном и квазинепрерывном режимах.

Полупроводниковые лазеры. Формально также являются твердотельными, но традиционно выделяются в отдельную группу, поскольку имеют иной механизм накачки - инжекция избыточных носителей заряда через *p-n* переход или гетеропереход, электрической пробой в сильном поле, бомбардировка быстрыми электронами, а квантовые переходы происходят между разрешёнными энергетическими зонами, а не между дискретными уровнями энергии. Полупроводниковые лазеры - наиболее употребительный в быту вид лазеров. Полупроводниковые лазеры очень компактны, накачиваются электрическим током, что позволяет использовать их в бытовых устройствах, таких как проигрыватели компакт-дисков. Кроме этого применяются в спектроскопии, в системах накачки других лазеров, а также в медицине.

Лазеры на красителях. Тип лазеров, использующий в качестве активной среды раствор флюоресцирующих с образованием широких спектров органических красителей. Состоят из органического растворителя, например метанола, этанола или этиленгликоля, в которых растворены химические красители, например кумарин или родамин. Конфигурация молекул красителя определяет рабочую длину волны. Лазерные переходы осуществляются между различными колебательными подуровнями первого возбуждённого и основного синглетных электронных состояний. Накачка оптическая, могут работать в непрерывном и импульсном режимах. Основной особенностью является возможность перестройки длины волны излучения в широком диапазоне. Применяются в спектроскопических исследованиях.

Газовые лазеры - лазеры, активной средой которых является смесь газов и паров. Отличаются высокой мощностью, монохроматичностью, а также узкой направленностью излучения. Работают в непрерывном и импульсном режимах. В зависимости от системы накачки газовые

лазеры разделяют на газоразрядные лазеры, газовые лазеры с оптическим возбуждением и возбуждением заряженными частицами (например, лазеры с ядерной накачкой), газодинамические и химические лазеры. По типу лазерных переходов различают газовые лазеры на атомных переходах, ионные лазеры, молекулярные лазеры на электронных, колебательных и вращательных переходах молекул и эксимерные лазеры.

Газодинамические лазеры - газовые лазеры с тепловой накачкой, инверсия населённостей в которых создаётся между возбуждёнными колебательно-вращательными уровнями гетероядерных молекул путём адиабатического расширения движущейся с высокой скоростью газовой смеси (чаще N_2+CO_2+He или $N_2+CO_2+H_2O$, рабочее вещество - CO_2).

Эксимерные лазеры - разновидность газовых лазеров, работающих на энергетических переходах эксимерных молекул (димерах благородных газов, а также их моноалогенидов), способных существовать лишь некоторое время в возбуждённом состоянии. Накачка осуществляется пропусканием через газовую смесь пучка электронов, под действием которых атомы переходят в возбуждённое состояние с образованием эксимеров, фактически представляющих собой среду с инверсией населённостей. Эксимерные лазеры отличаются высокими энергетическими характеристиками, малым разбросом длины волны генерации и возможности её плавной перестройки в широком диапазоне.

Химические лазеры - разновидность лазеров, источником энергии для которых служат химические реакции между компонентами рабочей среды (смеси газов). Лазерные переходы происходят между возбуждёнными колебательно-вращательными и основными уровнями составных молекул продуктов реакции. Для осуществления химических реакций в среде необходимо постоянное присутствие свободных радикалов, для чего используются различные способы воздействия на молекулы для их диссоциации. Отличаются широким спектром генерации в ближней ИК-области, большой мощностью непрерывного и импульсного излучения.

Лазеры на свободных электронах - лазеры, активной средой которых является поток свободных электронов, колеблющихся во внешнем электромагнитном поле (за счёт чего осуществляется излучение) и распространяющихся с релятивистской скоростью в направлении излучения. Основной особенностью является возможность плавной широкодиапазонной перестройки частоты генерации. Различают *убитроны* и *скаттроны*, накачка первых осуществляется в пространственно-периодическом статическом поле ондулятора, вторых - мощным полем электромагнитной волны. Существуют также мазеры на циклотронном резонансе и *строботроны*, основанные на тормозном излучении электронов, а также *флимастроны*, использующие эффект черенковского и переходного излучений.

Квантовые каскадные лазеры - полупроводниковые лазеры, которые излучают в среднем и дальнем инфракрасном диапазоне. В отличие от обычных полупроводниковых лазеров, которые излучают посредством вынужденных переходов между разрешенными электронными и дырочными уровнями, разделенными запрещённой зоной полупроводника, излучение квантовых каскадных лазеров возникает при переходе электронов между слоями гетероструктуры полупроводника и состоит из двух типов лучей, причем вторичный луч обладает весьма необычными свойствами и не требует больших затрат энергии.

Волоконный лазер - лазер, резонатор которого построен на базе оптического волокна, внутри которого полностью или частично генерируется излучение. При полностью волоконной реализации такой лазер называется *цельноволоконным*, при комбинированном использовании волоконных и других элементов в конструкции лазера он называется *волоконно-дискретным* или *гибридным*.

Возможны и другие виды лазеров, разработка которых находится на этапе исследований – *рентгеновские лазеры, гамма-лазеры* и др.