

Спонтанное и вынужденное излучение. Лазеры

Развивая идеи Планка, Эйнштейн в 1905 г. предположил, что дискретный характер присущ не только процессам испускания и поглощения, но и самому свету, представляющему собой поток световых квантов — фотонов с энергией $\hbar\omega = E_1 - E_0$.

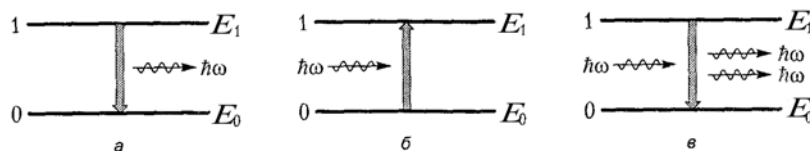


Рис. 5.

По теории Эйнштейна, возможны следующие типы радиационных переходов между энергетическими уровнями:

Спонтанное излучение (рис. 5, а). Атом исходно находится в возбужденном состоянии и в некоторый случайный момент времени самопроизвольно переходит в основное состояние, испуская фотон. Этот процесс характеризуется вероятностью перехода в единицу времени A_{10} .

Полощение (рис. 5, б). Атом находится в основном состоянии и, поглощая квант света, переходит в возбужденное состояние (из которого он через некоторое время вернется в основное состояние). Вероятность такого перехода пропорциональна плотности энергии электромагнитного поля I_0 на частоте перехода и некоторому коэффициенту B_{01} , зависящему от конкретного сорта атомов. При каждом акте поглощения **число фотонов уменьшается на единицу**.

Вынужденное излучение (рис. 5, в). Атом переходит из возбужденного состояния в основное, но не самопроизвольно, а под воздействием внешне электромагнитного поля. Вероятность вынужденного излучения равна B_{10} .

Число фотонов увеличивается на единицу в отличие от спонтанного процесса, при котором фотоны испускаются различными атомами независимо друг от друга, при вынужденном излучении новый фотон неотличим по своим свойствам от фотона, вызвавшего переход. Все фотоны, возникшие в результате вынужденного излучения, имеют одинаковую частоту, фазу, направление распространения и поляризацию. Таким образом, вынужденное излучение когерентно.

Лазер

Трудно найти пример открытия, которое оказало бы на науку и технику XX в. столь сильное влияние, как создание лазера. Сверхсильные световые поля и лазерный термоядерный синтез, сверхкороткие световые импульсы и сверхнизкие температуры, нелинейная оптика и лазерная спектроскопия, голография и оптическая связь, обработка материалов и оптический компьютер, лазерная медицина и контроль окружающей среды — вот лишь краткий перечень применений лазера, который находит все новые и новые сферы приложения.

С принципиальной физической точки зрения лазер демонстрирует новый тип излучения — **вынужденное излучение в квантовой системе**. Главная особенность этого излучения в том, что оно когерентно, т. е. имеет структуру, близкую к плоской монохроматической волне.

Для создания лазера необходимо наличие активной среды с инверсной населенностью, способной генерировать излучение, и резонатора для осуществления обратной связи и многократного прохождения света через активную (усиливающую) среду

В отличие от классической модели, квантовая модель предсказывает возможность экспоненциального усиления света в среде. Для этого необходимо, чтобы

населенность верхнего рабочего уровня превышала населенность нижнего уровня

$$N_2 > N_1,$$

1) **Инверсию населенностей в лазерах** создают разными способами. Чаще всего для этого используют облучение светом (“оптическая накачка”) электрический разряд, электрический ток, химические реакции.

2) Для того чтобы от режима усиления перейти к режиму генерации света, в лазере, как и в любом генераторе, используют обратную связь. Обратная связь в лазере осуществляется с помощью **оптического резонатора**, который в простейшем случае представляет собой пару параллельных зеркал (линейный резонатор), но может состоять из 3 и 4 зеркал (кольцевой резонатор).

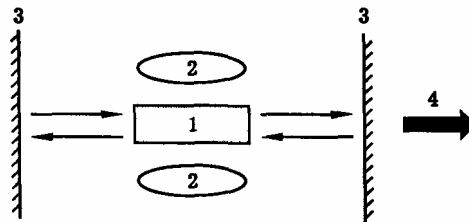


Рис. 6. Принципиальная схема лазера. 1 – активный элемент, 2 – система накачки, 3 – оптический резонатор, 4 – генерируемое излучение.

Лазер работает следующим образом. Сначала источник накачки (например, мощная лампа-вспышка), воздействуя на рабочее вещество (активный элемент) лазера, создает в нем инверсию населенностей. Затем инвертированная среда начинает спонтанно испускать кванты света. Под действием спонтанного излучения начинается **процесс вынужденного излучения света**. Благодаря инверсии населенностей этот процесс носит лавинообразный характер и приводит к экспоненциальному усилению света. Потoki света, идущие в боковых направлениях, быстро покидают активный элемент, не успевая набрать значительную энергию. В то же время световая волна, распространяющаяся вдоль оси резонатора, многократно проходит через активный элемент, непрерывно набирая энергию. Благодаря частичному пропусканию света одним из зеркал резонатора, излучение выводится наружу, образуя лазерный луч.

В полном виде концепцию лазера разработали Н. Г. Басов, А. М. Прохоров в России и Ч. Таунс, А. Шавлов в США. Первый лазер на кристалле рубина создал в 1960 г. американский исследователь Т. Мейман.

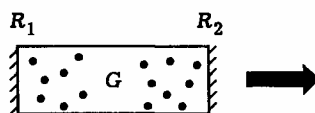


Рис. 7. К выводу условий самовозбуждения (генерации) лазера

Условия генерации лазера.

1. Энергетическое условие генерации.

Для самовозбуждения (генерации) лазера необходимо, чтобы усиление света за счет вынужденного излучения в инвертированной среде за один обход контура резонатора (из начальной точки в начальную) превышало величину потерь (в пороге генерации равнялось потерям).

$$G_0 e^{kl} = f \quad (36)$$

G_0 - параметр накачки, k - коэффициент усиления, l – длина активной среды за один полный обход светом контура резонатора (из начальной точки в начальную), f – потери за полный обход. Потери связаны только с выводом света из резонатора, т. е. с неполным отражением света зеркалами, а также с рассеянием на элементах резонатора.

2. **Фазовое условие генерации** состоит в том, что на длине резонатора за один полный обход должно укладываться целое число длин волн генерируемого излучения:

$$L = n\lambda, n = 1, 2, 3... \quad (37)$$

где L – длина резонатора за полный обход.

При выполнении этого условия фазовый набег световой волны при полном обходе контура резонатора кратен величине 2π , что обеспечивает оптимальные условия для усиления света.

3. Поляризационное условие генерации заключается в том, состояние поляризации излучения должно воспроизводиться за один полный обход светом контура резонатора.

Поляризация генерируемого излучения в лазере определяется совокупным влиянием анизотропии активной среды и анизотропии резонатора. Анизотропия среды задается квантовомеханическими свойствами атомов и молекул активного вещества. Анизотропия резонатора создается помещением внутрь него анизотропных элементов. Если анизотропия среды и резонатора одинаковая, например, круговая (линейная), то поляризация генерируемого излучения будет круговой (линейной). Если же анизотропия среды круговая, а резонатора линейная, то поляризация генерируемого излучения будет зависеть от соотношения величины анизотропии среды и резонатора. Если анизотропия среды намного больше анизотропии резонатора, то поляризация генерируемого поля будет определяться средой (в нашем примере – круговая). Если анизотропия резонатора намного больше анизотропии среды, что наиболее часто реализуется в лазерных приборах, то поляризация генерируемого поля будет определяться резонатором (в нашем примере – линейная). При сопоставимых по величине анизотропии среды и резонатора и сильно различающихся типах этой анизотропии (у среды – круговая, у резонатора – линейная) возможно нестационарное поведение поляризации, при котором ее состояние периодически изменяется от линейного к круговому, и обратно.

Рубиновый лазер. Рубин представляет собой кристалл окиси алюминия, в котором часть атомов алюминия заменена атомами хрома. Чем больше хрома, тем ярче окраска кристалла. Рубин имеет красный или розовый цвет. Это объясняется тем, что атомы хрома в кристалле поглощают широкую полосу зеленого и желтого света и пропускают только красный и голубой свет. В лазере Меймана был использован бледно-розовый кристалл рубина, содержащий 0,05% хрома. На рис. 8 показана схема энергетических уровней атома хрома в кристалле рубина.

На рис. 8 (справа) показан основной элемент конструкции лазера Меймана: кристалл рубина и ксеноновая лампа-вспышка.

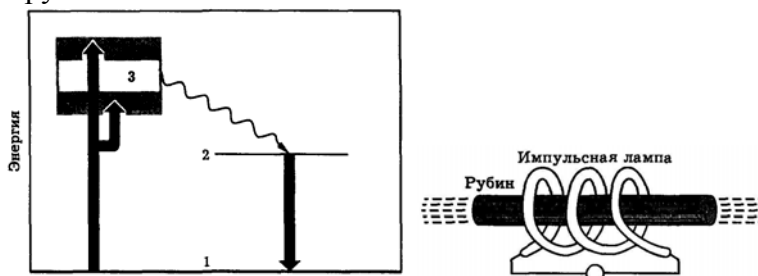


Рис. 8. Схема энергетических уровней атома хрома в кристалле рубина и принцип создания инверсной населенности (слева). Конструкция лазера Меймана (справа).

Рубиновый лазер работает по так называемой “трехуровневой” схеме. Сначала уровень 3 большой спектральной ширины заселяется атомами хрома под воздействием мощной вспышки света ксеноновой лампы. С уровня 3 атомы совершают быстрый безызлучательный переход на узкий энергетический уровень 2. **Уровень 2 является метастабильным**, время жизни атома на этом уровне достаточно велико; оно составляет порядка 10 с. Это позволяет атомам хрома накапливаться на уровне 2, и если скорость перевода атомов из основного состояния 1 в возбужденное состояние 3 достаточно велика, то через некоторое время заселенность уровня 2 может превысить заселенность уровня 1, т. е. возникнет инверсия населенностей. далее атомы совершают переход с уровня 2 на уровень 1, при котором генерируется излучение с длиной волны

Отметим здесь важное достоинство трехуровневой схемы лазера, заключающееся в том, что в такой схеме частота возбуждающего света накачки не совпадает с частотой генерируемого излучения (см. рис. 8).

В гелий-неоновом лазере инверсная населенность создается следующим образом (см. рис. 9). Вначале электроны в газоразрядной трубке возбуждают атомы гелия (а), которые безизлучательно передают энергию атомам неона, имеющим близкорасположенный метастабильный уровень 3(б). Генерация происходит на переходе $3 \rightarrow 2$, а затем осуществляется безизлучательный переход в основное состояние (в).

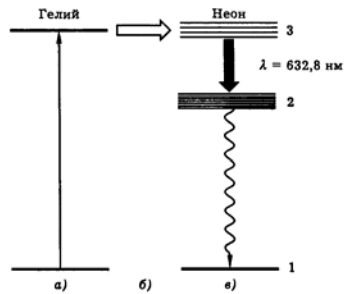


Рис. 9. Схема работы гелий-неонового лазера

В зависимости от вещества активной среды лазеры бывают газовыми, твердотельными, полупроводниковыми, волоконными, на красителях, и т.д.