

ЛЕКЦИЯ 76

ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. Спонтанное и вынужденное излучения атомов.
2. Нормальная и инверсная заселенности энергетических уровней.
3. Принцип работы квантового генератора.
4. Рубиновый лазер.
5. Газовый лазер (*самостоятельно*).
6. Свойства лазерного излучения
7. Примеры применения лазеров.

СПОНТАННОЕ И ВЫНУЖДЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЯ АТОМОВ.

Электроны, поглощая падающее излучение, могут совершать *вынужденные переходы* с более низких на более высокие уровни.

Обратные переходы с более высоких уровней на нижние (*спонтанные или самопроизвольные*), приводят к испусканию атомами квантов света с частотой $\omega_{mn} = |E_m - E_n|/\hbar$.

А.Эйнштейн, 1918г.: двух видов переходов недостаточно для объяснения существования равновесия между излучением и поглощением энергии веществом.

Должны существовать еще переходы, сопровождающиеся испусканием квантов света.

СПОНТАННОЕ И ВЫНУЖДЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЯ АТОМОВ.

Такие переходы существуют, это *вынужденные* или *индуцированные* переходы.

Это переходы с более высоких уровней в основное состояние под действием падающего излучения.

Итак,

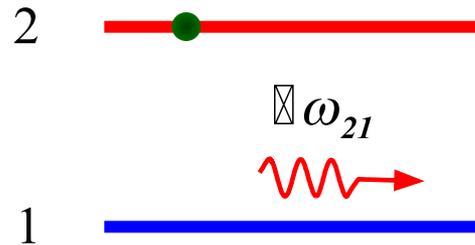
существуют излучающие переходы двух типов: спонтанные (самопроизвольные), происходящие без какого-либо взаимодействия с внешним полем излучения и вынужденные (индуцированные), происходящие под влиянием внешнего облучения с частотой, близкой к частоте ω_{mn} .

Свойства спонтанного и вынужденного излучений.

Пусть атом имеет два возможных состояния: состояние 1 с более низкой энергией (нормальное) и состояние 2 – возбужденное.

СПОНТАННОЕ И ВЫНУЖДЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЯ АТОМОВ.

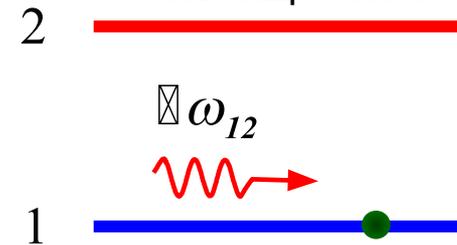
Спонтанное излучение



Атом из состояния 2 через $\sim 10^{-8}-10^{-6}$ с самопроизвольно переходит на уровень 1, излучая при этом квант энергии $\hbar\omega_{21} = E_2 - E_1$.

Фазы спонтанного излучения отдельных атомов не связаны между собой. Спонтанное излучение *некогерентное*.

Вынужденный переход с поглощением

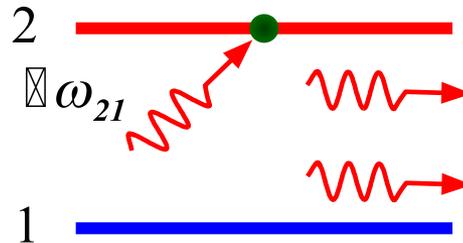


Переходы, индуцированные световым квантом ω_{12} , как отмечено выше, могут быть с поглощением и излучением.

Если атом находится в состоянии 1, то, поглотив квант света частотой $\omega_{12} = \omega_{21}$, атом переходит в возбужденное состояние 2.

СПОНТАННОЕ И ВЫНУЖДЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЯ АТОМОВ.

Вынужденный переход с излучением



Если атом находится в возбужденном состоянии 2, то квант света частотой ω_{21} может индуцировать переход атома в нормальное состояние 1. При этом атом излучает два кванта света: первичный с частотой ω_{12} и вторичный с частотой ω_{21} . Вторичные фотоны при этом неотличимы от первичных: $\omega_{12} = \omega_{21}$.

Индуцированное излучение *когерентно* с вызывающим его внешним электромагнитным излучением и совпадает с ним по направлению.

НОРМАЛЬНАЯ И ИНВЕРСНАЯ ЗАСЕЛЕННОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УРОВНЕЙ

Воздействующая на вещество электромагнитная волна с частотой ω , совпадающей с одной из частот $(E_n - E_m)/\hbar$ атомов вещества ($E_n > E_m$), будет вызывать два процесса: вынужденный переход $m \rightarrow n$ с энергетически более низкого уровня на более высокий и вынужденный переход $n \rightarrow m$.

Первый переход приводит к поглощению волны и ослаблению падающего потока, второй – к увеличению интенсивности падающей волны.

Результирующее изменение интенсивности падающей электромагнитной волны зависит от того, какой из процессов преобладает.

Из статистической физики: число атомов в нормальном (более низком) энергетическом состоянии больше числа возбужденных атомов.

НОРМАЛЬНАЯ И ИНВЕРСНАЯ ЗАСЕЛЕННОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УРОВНЕЙ

Поэтому число актов поглощения превышает число актов излучения, и падающее электромагнитное излучение при прохождении через вещество ослабляется.

Но: можно создать такое состояние, при котором число возбужденных атомов будет больше числа атомов, находящихся в нормальном состоянии.

Такое состояние называется *инверсным* (обращенным). Оно является неравновесным.

Процесс перевода вещества в состояние с инверсной заселенностью - *накачка*.

Способы накачки: оптические, тепловые, химические, электроионизационные, другие.

Вещество с инверсной заселенностью атомных уровней обладает отрицательным коэффициентом поглощения $k_{\omega} < 0$.

НОРМАЛЬНАЯ И ИНВЕРСНАЯ ЗАСЕЛЕННОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УРОВНЕЙ

Среда, заполненная веществом с инверсной заселенностью, - *активная* среда.

Изменение интенсивности волны $I_\omega(x)$ при прохождении через вещество выражается *законом Бугера – Ламберта – Бера*:

$$I_\omega(x) = I_0 e^{-k_\omega x},$$

здесь I_0 - интенсивность падающей электромагнитной волны.

Итак, в поглощающей среде интенсивность электромагнитной волны убывает.

В веществе с инверсной заселенностью энергетических уровней индуцированное излучение превышает поглощение, вследствие чего электромагнитное излучение, проходящее через вещество, будет усиливаться.

Из закона Бугера – Ламберта – Бера видно, что при $k_\omega < 0$ интенсивность излучения экспоненциально возрастает с ростом x .

Вывод: среда с инверсной заселенностью энергетических уровней способна усиливать электромагнитное излучение с частотой

$$\omega = (E_n - E_m) / \hbar$$

ПРИНЦИП РАБОТЫ КВАНТОВОГО ГЕНЕРАТОРА.

Усиление электромагнитного излучения активной средой с инверсной заселенностью энергетических уровней используется в оптических квантовых генераторах – *лазерах* и генераторах микроволнового излучения – *мазерах*.

Первые квантовые генераторы были созданы в 1954 году советскими учеными Н.Г.Басовым и А.М.Прохоровым и, независимо от них, американским ученым Таунсом.

Принцип работы лазера.

Лазер должен иметь три основных компонента:

- 1). *Активную среду*, в которой создается состояние с инверсной заселенностью энергетических уровней;
- 2). *Систему накачки* для создания инверсии в активной среде;
- 3). *Оптический резонатор*, формирующий световой пучок.

ПРИНЦИП РАБОТЫ КВАНТОВОГО ГЕНЕРАТОРА.

Активная среда не генерирует излучение, она лишь усиливает световую волну определенной частоты, проходящую через нее.

Генерация направленного излучения происходит в оптическом резонаторе.

Простейший резонатор – это пара обращенных друг к другу плоских или вогнутых зеркал.

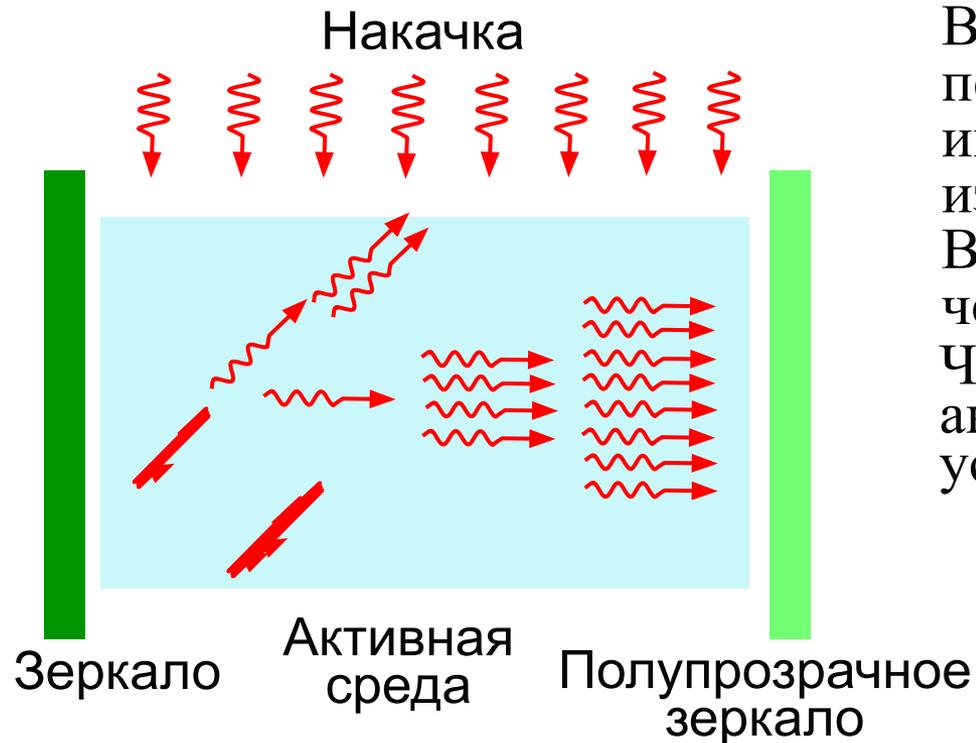
Зеркала располагаются на общей оптической оси, на расстоянии L друг от друга.

Между зеркалами помещается активная среда. Такая система называется *открытый резонатор*.

Для вывода излучения лазера одно из зеркал делается частично прозрачным.

ПРИНЦИП РАБОТЫ КВАНТОВОГО ГЕНЕРАТОРА.

Схема открытого резонатора.

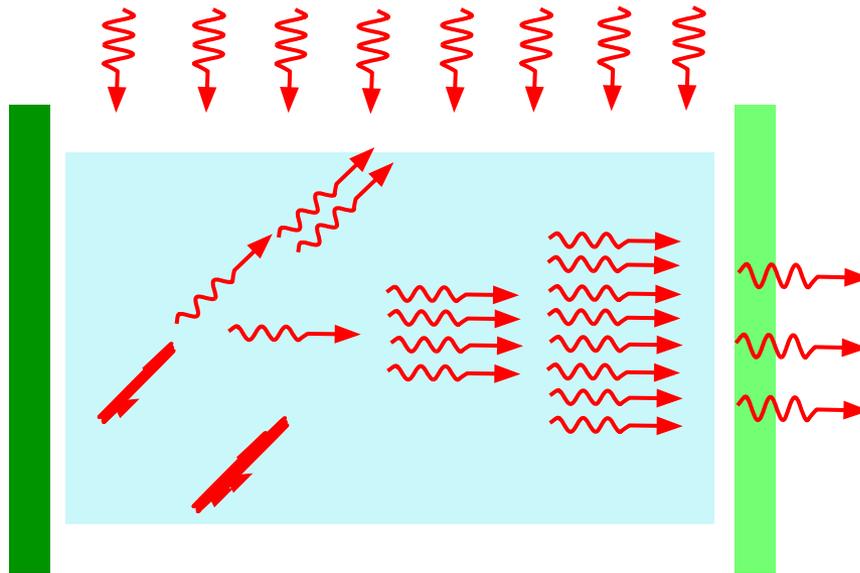


В результате спонтанного перехода между уровнями с инверсной заселенностью атом излучает световую волну. Волна усиливается, проходя через активную среду. Чем больше путь волны в активной среде, тем больше усиление световой волны.

Фотоны, движущихся вдоль оптической оси, максимально усиливаются.

Фотоны, движущиеся под углом к оптической оси резонатора, выходят из активной среды через ее боковую поверхность, инициируя лишь небольшое число переходов между уровнями с инверсной заселенностью.

ПРИНЦИП РАБОТЫ КВАНТОВОГО ГЕНЕРАТОРА.



Фотоны, движущиеся вдоль оптической оси, многократно отражаются от зеркал резонатора, каждый раз вызывая вынужденное излучение вторичных фотонов.

Число движущихся вдоль оси фотонов лавинообразно нарастает.

Достигнув полупрозрачного зеркала, излучение частично выйдет наружу, частично отразится, и будет вновь использоваться для генерации лазерного излучения.

Многократно усиленный и вышедший сквозь полупрозрачное зеркало поток фотонов создает строго направленный световой пучок большой яркости.

РУБИНОВЫЙ ЛАЗЕР.

Создание лазера стало возможным после того, как были найдены способы осуществления инверсной населенности уровней в некоторых веществах.

В одном из первых построенных лазеров рабочим телом (активной средой) был кристалл рубина.

Торцы рубинового стержня длиной около 5 см отполированы.

Один торец покрыт непрозрачным слоем серебра, второй – слоем серебра, пропускающим около 8% упавшей на него энергии.

Строго параллельные посеребренные торцы кристалла образуют открытый оптический резонатор.

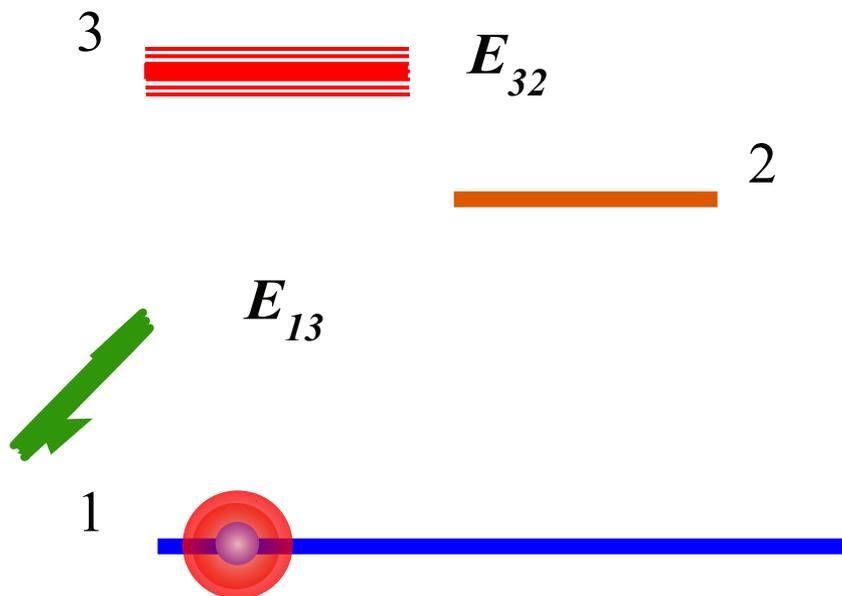
Накачку кристалла рубина производят мощной импульсной ксеноновой лампой.

Кристалл рубина - это окись алюминия, в кристаллической решетке которого некоторые атомы алюминия замещаются трехвалентными ионами хрома.

РУБИНОВЫЙ ЛАЗЕР.

При поглощении энергии E_{13} во время накачки ионы хрома с основного уровня 1 переходят в возбужденное состояние на уровень 3.

Уровень 3 - это множество близко расположенных уровней, образующих широкую энергетическую зону. Вследствие этого накачка может производиться источником света с широкой полосой частот.



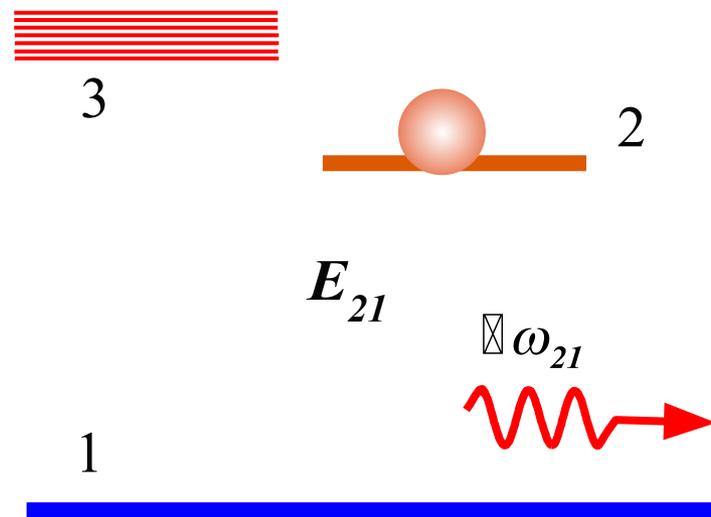
Обратный переход в основное состояние происходит в два этапа.

На первом этапе возбужденные ионы отдают часть своей энергии E_{32} кристаллической решетке и безизлучательно переходят на уровень 2 в метастабильное состояние.

РУБИНОВЫЙ ЛАЗЕР.

Переход из метастабильного состояния с уровня 2 в основное запрещен правилами отбора.

Поэтому среднее время жизни иона на этом уровне примерно на 4 – 5 порядков превосходит время жизни в обычном возбужденном состоянии.



При высокой интенсивности накачки светом с частотой, соответствующей зеленому свету, в кристалле создается инверсия заселенности уровней 1 - 2.

Вероятность переходов $2 \rightarrow 1$ все-таки отлична от нуля, такие спонтанные переходы возможны.

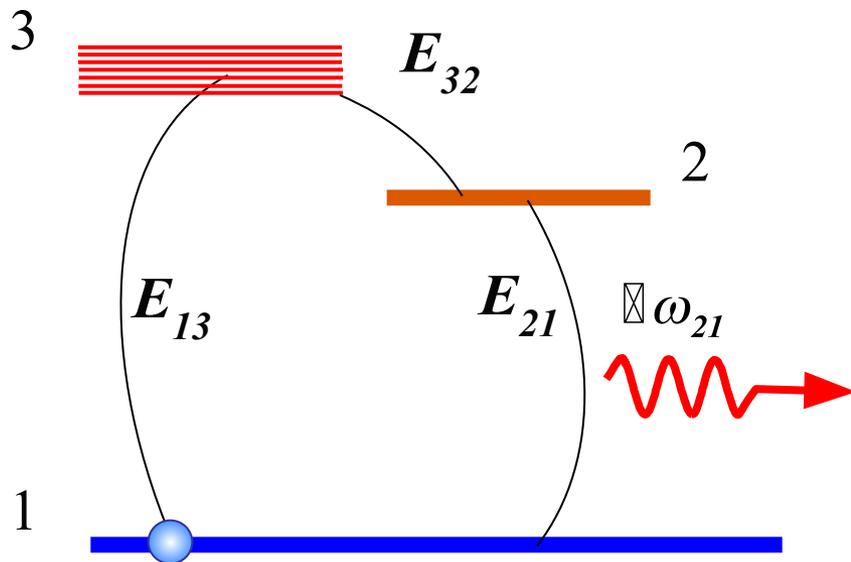
Излученный при этом в направлении оптической оси фотон может вызвать вынужденное испускание дополнительных фотонов с энергией $E_{21} = \hbar \omega_{21}$.

В итоге лазер излучает импульс света с частотой $\omega_{21} = E_{21}/\hbar$.

РУБИНОВЫЙ ЛАЗЕР.

Лазеры на рубине работают в импульсном режиме с частотой порядка нескольких импульсов в минуту.

В процессе работы внутри кристалла выделяется большое количество тепла.



Поэтому его приходится охлаждать, что осуществляется часто жидким воздухом (азотом).

Рубиновый лазер - первый твердотельный лазер, работающий в видимой области спектра.

СВОЙСТВА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.

1. *Высокая временная и пространственная когерентность.* Временная когерентность лазера примерно на семь порядков выше, чем для обычных источников света.
 2. *Строгая монохроматичность.* $\Delta\lambda < 10^{-11} \text{ м.}$
 3. *Большая плотность потока энергии.* Плотность потока энергии лазера может составлять величину около $2 \cdot 10^{10} \text{ Вт/м}^2$.
 4. *Малое угловое расхождение в пучке.* Пример: при специальной фокусировке луч лазера, направленный с Земли, дал бы на поверхности Луны пятно диаметром около 3 км. Для сравнения: луч прожектора осветил бы поверхность луны диаметром примерно 40000 км.
- К.п.д. лазеров колеблется от **0,01%** (гелий-неоновый) до **75%** (лазер на стекле с ниодимом). У большинства лазеров к.п.д. составляет **0,1 – 1%**. Мощные CO_2 – лазеры непрерывного действия, генерирующие инфракрасное излучение - к.п.д. примерно **30%**

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРОВ

1. *Техническое применение*: обработка, резание, сварка твердых материалов, создание калиброванных отверстий, дефектоскопия.
2. *Медицина*: хирургический нож.
3. *Ядерная энергетика*: химическое разделение изотопов, например, урана.
4. *Экология*: мониторинг окружающей среды.
5. *Измерительная техника*: стандарты частоты, лазерные сейсмографы, интерферометрия: сверхточные измерения линейных перемещений, юстировочные и нивелировочные операции, измерения параметров сред – коэффициенты преломления, давление, температура.
6. *Голография*.
7. *Бытовое применение*: воспроизводство видео- и аудио-информации с оптических носителей (компакт - дисков) и т.д.