

## Спонтанное и индуцированное излучения

Лазеры— это современные когерентные источники излучения, обладающие целым рядом уникальных свойств. К настоящему времени создано большое количество лазеров с различными характеристиками – газовых, твердотельных, полупроводниковых, излучающих свет в различных оптических диапазонах.

Лазеры могут работать в импульсном и непрерывном режимах.

Мощность излучения лазеров может изменяться в пределах от долей милливатта до  $10^{12}$ – $10^{13}$  Вт (в импульсном режиме).

Лазеры находят широкое применение в военной технике, в технологии обработки материалов, в медицине, в оптических системах навигации, связи и локации, в прецизионных интерференционных экспериментах, в химии, просто в быту и т. д. Хотя первый лазер был построен сравнительно недавно (1960 г.), современную жизнь уже невозможно представить без лазеров.

Одним из важнейших свойств лазерного излучения является чрезвычайно высокая степень его монохроматичности, недостижимая в излучении нелазерных источников. Это и все другие уникальные свойства лазерного излучения возникают в результате согласованного, кооперативного испускания световых квантов многими атомами рабочего вещества.

Чтобы понять принцип работы лазера, рассмотрим процессы поглощения и излучения атомами квантов света. Атом может находиться в различных энергетических состояниях с энергиями  $E_1$ ,  $E_2$  и т. д.

**Эти состояния называются стабильными.**

На самом деле стабильным состоянием, в котором атом может находиться бесконечно долго в отсутствие внешних возмущений, является только состояние с наименьшей энергией.

**Это состояние называют основным.**

*Все другие состояния нестабильны.*

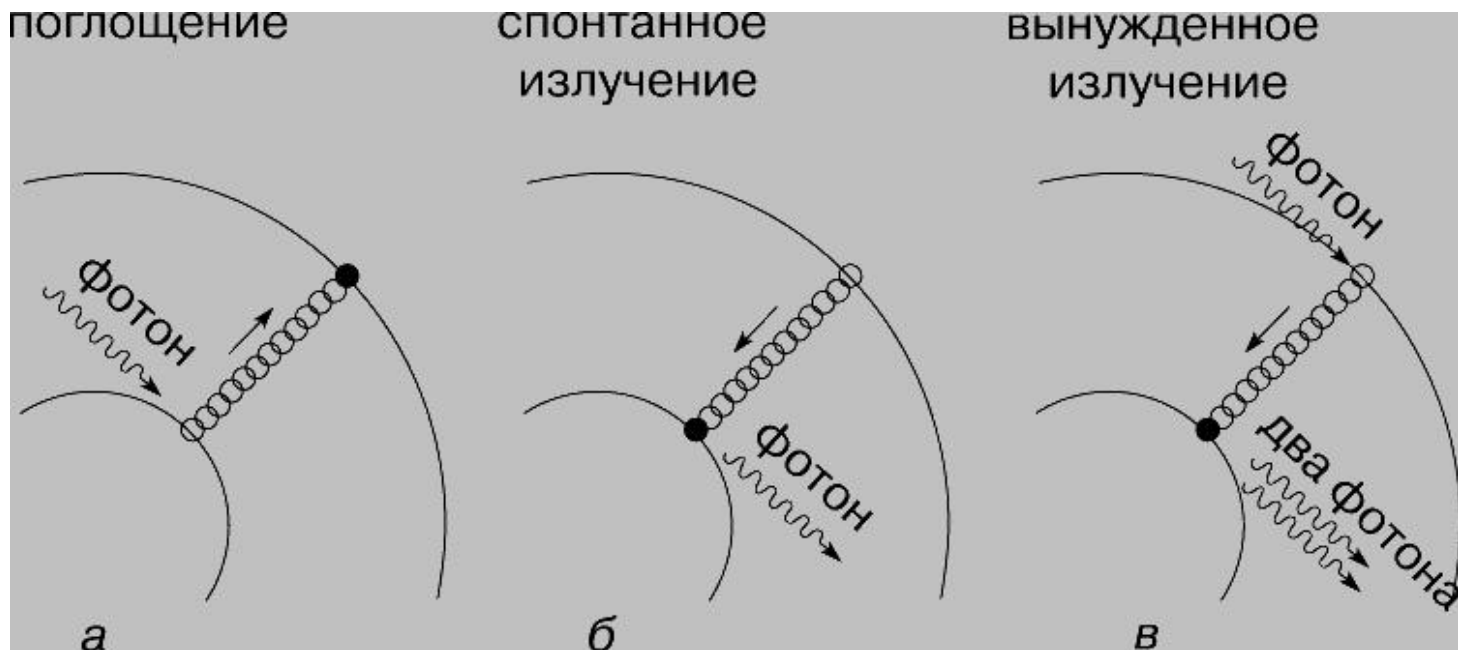
Возбужденный атом может пребывать в этих состояниях лишь очень короткое время, порядка  $10^{-8}$  с, после этого он самопроизвольно переходит в одно из низших состояний, испуская квант света,

**Излучение, испускаемое при самопроизвольном переходе атома из одного состояния в другое, называют спонтанным.**

На некоторых энергетических уровнях атом может пребывать значительно большее время, порядка  $10^{-3}$  с.

**Такие уровни называются метастабильными.**

Переход атома в более высокое энергетическое состояние может происходить при резонансном поглощении фотона, энергия которого равна разности энергий атома в конечном и начальном состояниях.



*Рис. 1. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ электромагнитного излучения с веществом.*

**а** - фотон (квант энергии, равный разности двух энергетических уровней атома) поглощается атомом, находящимся на нижнем энергетическом уровне (внутренняя окружность). При этом атом возбуждается, переходя на верхний энергетический уровень (внешняя окружность);

**б** - возбужденный атом (на верхнем энергетическом уровне) испускает фотон и переходит на нижний энергетический уровень; состояние с меньшей энергией более устойчиво;

**в** - атом, находящийся на верхнем энергетическом уровне, в процессе вынужденного излучения поглощает фотон, переходит на нижний энергетический уровень и испускает два фотона с той же самой длиной волны.

Переходы между энергетическими уровнями атома не обязательно связаны с поглощением или испусканием фотонов. Атом может приобрести или отдать часть своей энергии и перейти в другое квантовое состояние в результате взаимодействия с другими атомами или столкновений с электронами.

Такие переходы называются безызлучательными.

В 1916 году А. Эйнштейн предсказал, что переход электрона в атоме с верхнего энергетического уровня на нижний **может происходить** под влиянием внешнего электромагнитного поля, частота которого равна собственной частоте перехода.

**Возникающее при этом излучение называют вынужденным или индуцированным.**

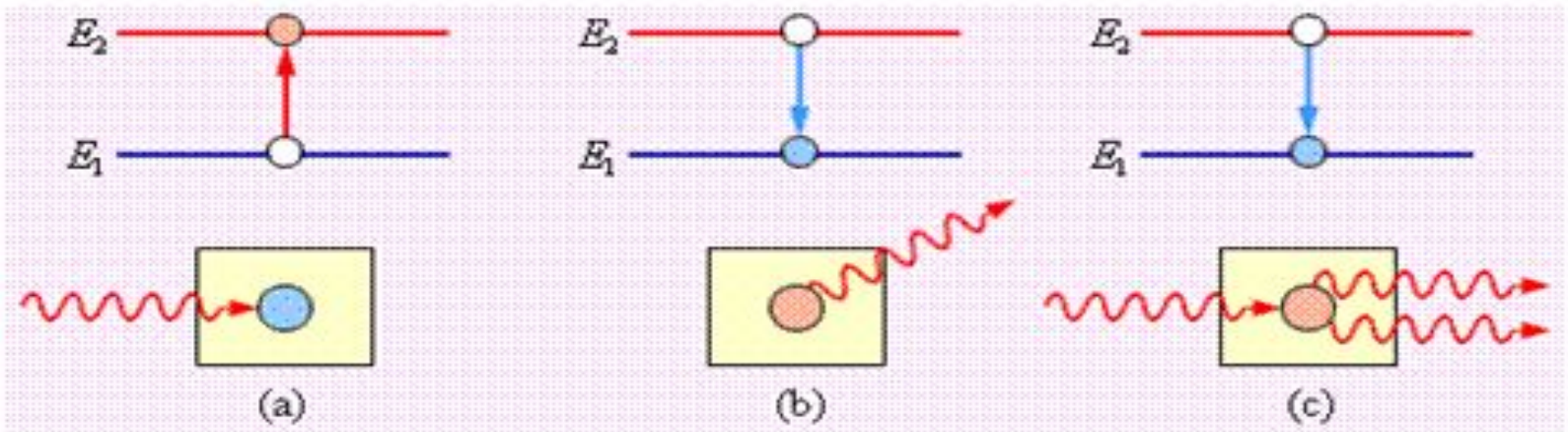
Оно резко отличается от спонтанного излучения.

В результате взаимодействия возбужденного атома с фотоном атом испускает еще один фотон той же самой частоты, распространяющийся в том же направлении.

**Т.Е. атом излучает электромагнитную волну, у которой частота, фаза, поляризация и направление распространения точно такие же, как и у первоначальной волны.**

В результате вынужденного испускания фотонов амплитуда волны, распространяющейся в среде, возрастает. В результате взаимодействия возбужденного атома с фотоном, частота которого равна частоте перехода, появляются два совершенно одинаковых фотона-близнеца.

**Именно индуцированное излучение является физической основой работы лазеров**



**Рисунок 80**

Здесь схематически представлены возможные механизмы переходов между двумя энергетическими состояниями атома с поглощением (а), спонтанным испусканием кванта (b) и индуцированным испусканием кванта (c). Рассмотрим слой прозрачного вещества, атомы которого могут находиться в состояниях с энергиями  $E_1$  и  $E_2 > E_1$ . Пусть в этом слое распространяется излучение резонансной частоты перехода  $\nu = \Delta E / h$ . При термодинамическом равновесии большее количество атомов вещества будет находиться в нижнем энергетическом состоянии. Некоторая часть атомов будет находиться и в верхнем энергетическом состоянии, получая необходимую энергию при столкновениях с другими атомами. Обозначим населенности нижнего и верхнего уровней соответственно через  $n_1$  и  $n_2 < n_1$ . При распространении резонансного излучения в такой среде будут происходить все три процесса, изображенные на рисунке.

Эйнштейн показал, что процесс (а) поглощения фотона невозбужденным атомом и процесс (с) индуцированного испускания кванта возбужденным атомом имеют одинаковые вероятности. Так как  $n_2 < n_1$  поглощение фотонов будет происходить чаще, чем индуцированное испускание. В результате прошедшее через слой вещества излучение будет ослабляться.

Излучение, возникающее в результате спонтанных переходов,  
**некогерентно,**

распространяется во всевозможных направлениях и не дает вклада в проходящую волну.

Чтобы проходящая через слой вещества волна усиливалась, нужно искусственно создать условия, при которых  $n_2 > n_1$ , т. е. создать

**инверсную населенность уровней.**

Такая среда является термодинамически **неравновесной**.

Идея использования неравновесных сред для получения оптического усиления в 1940 г. высказана В.А.Фабрикантом. В 1954 году Н.Г.Басов, А.М.Прохоров и Ч. Таунс использовали это явление для создания микроволнового генератора радиоволн с длиной волны  $\lambda = 1,27$  см.

За разработку нового принципа усиления и генерации радиоволн в 1964 году все трое были удостоены Нобелевской премии.

Среда, в которой создана инверсная населенность уровней, называется **активной**.

Она может служить резонансным усилителем светового сигнала. Для того, чтобы возникала генерация света, необходимо использовать обратную связь. Для этого активную среду нужно расположить между двумя высококачественными зеркалами, отражающими свет строго назад, чтобы он многократно прошел через активную среду, вызывая лавинообразный процесс индуцированной эмиссии когерентных фотонов. При этом в среде должна поддерживаться инверсная населенность уровней.

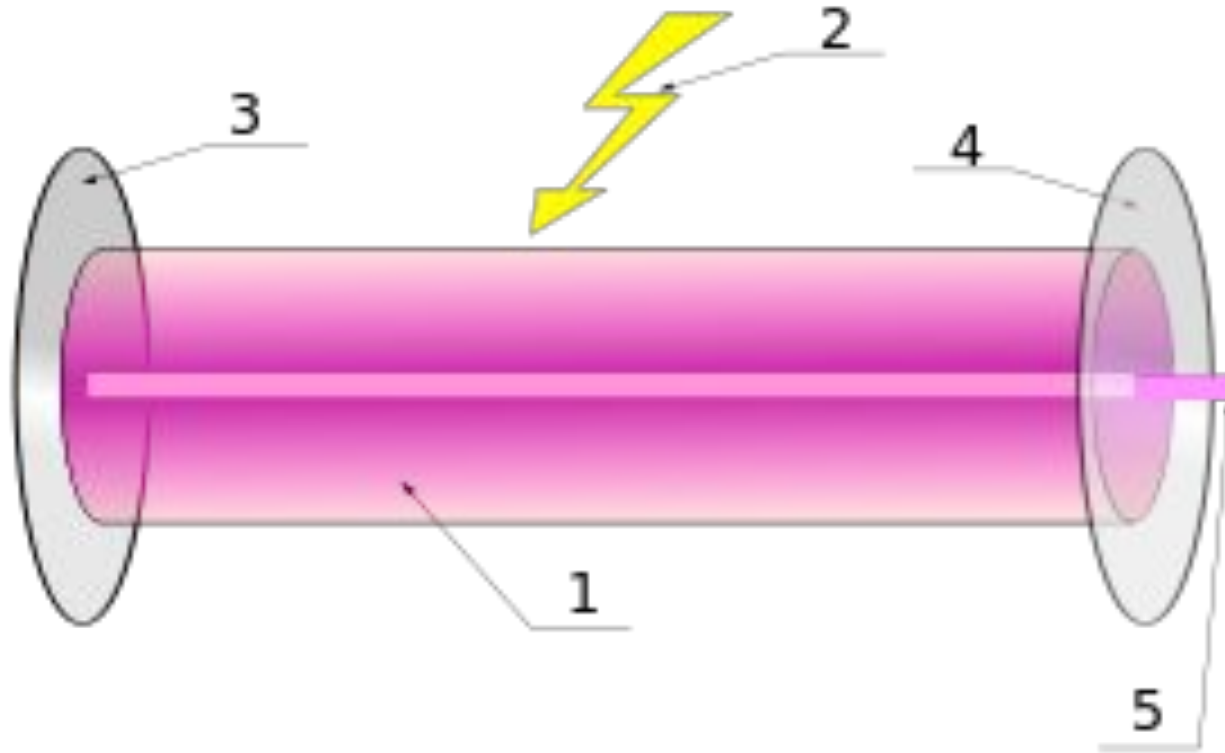
**Этот процесс в лазерной физике принято называть накачкой.**

Начало лавинообразному процессу в такой системе при определенных условиях может положить случайный спонтанный акт, при котором возникает излучение, направленное вдоль оси системы. Через некоторое время в такой системе возникает стационарный режим генерации.

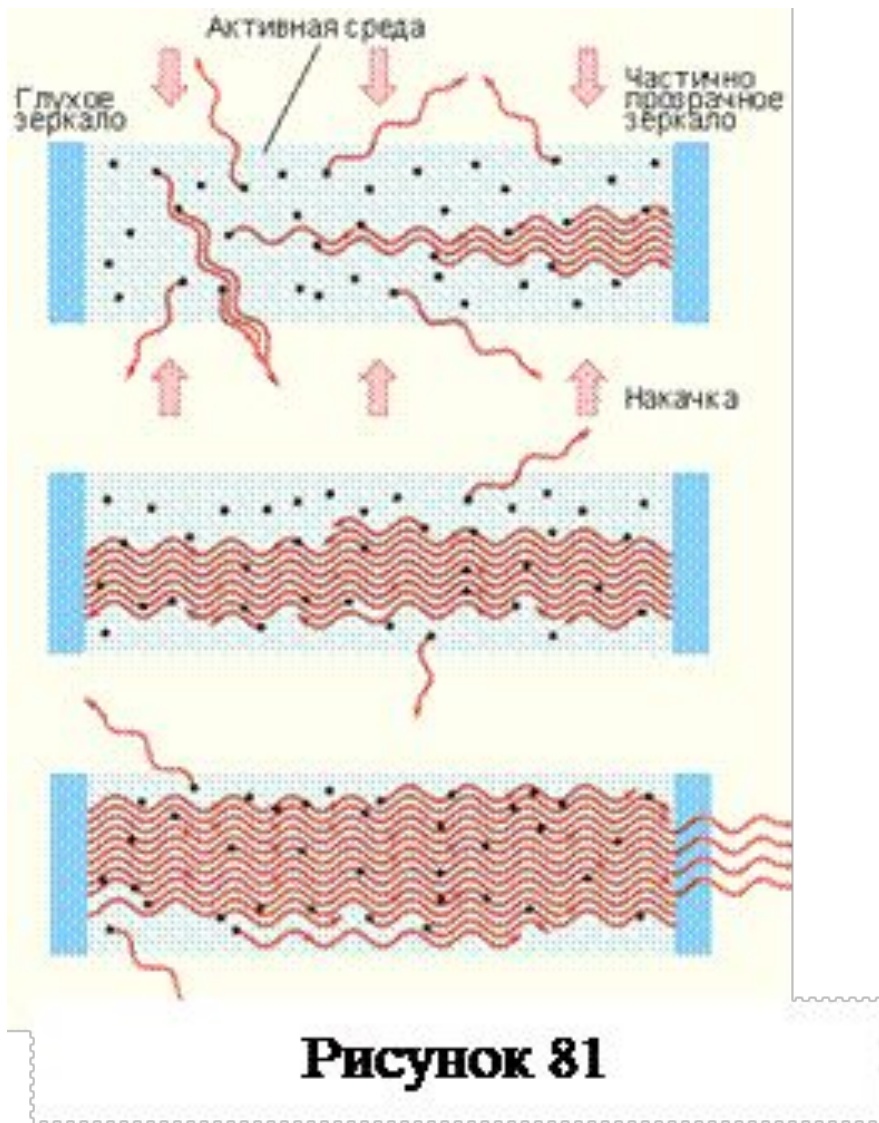
**Это и есть лазер**



# Устройство лазера



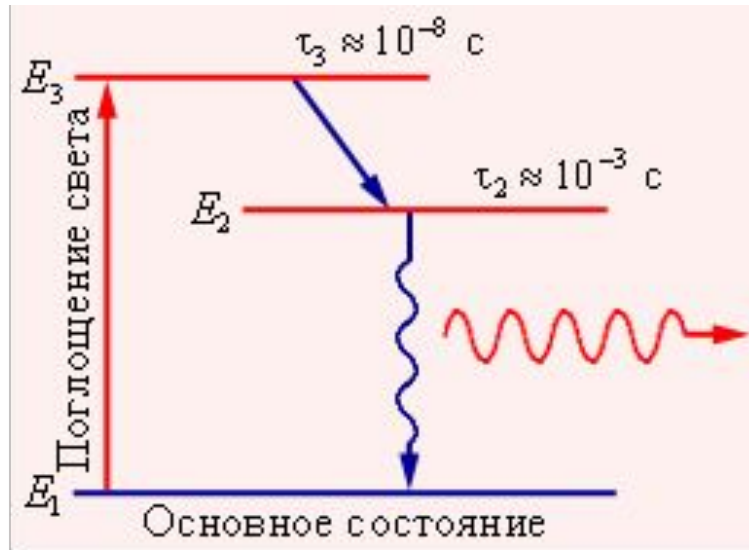
На схеме обозначены: 1 — активная среда; 2 — энергия накачки лазера; 3 — непрозрачное зеркало; 4 — полупрозрачное зеркало; 5 — лазерный луч.



На рис. 81 схематически представлено развитие лавинообразного процесса в лазере.

Существуют различные способы получения среды с инверсной населенностью уровней.

В рубиновом лазере используется оптическая накачка. Атомы возбуждаются за счет поглощения света. Но для этого недостаточно только двух уровней. Каким бы мощным не был свет лампы–накачки, число возбужденных атомов не будет больше числа невозбужденных. Лазерное излучение выводится наружу через одно (или оба) из зеркал, обладающее частичной прозрачностью.



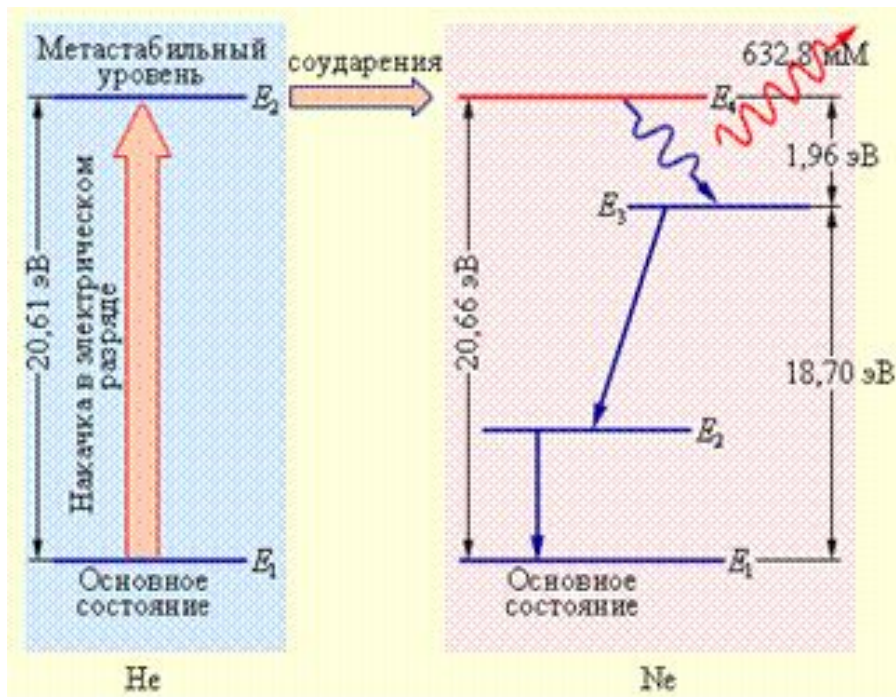
**Рисунок 82**

. Существуют различные способы получения среды с инверсной населенностью уровней. В рубиновом лазере используется оптическая накачка. Атомы возбуждаются за счет поглощения света. Но для этого недостаточно только двух уровней. Каким бы мощным не был свет лампы-накачки, число возбужденных атомов не будет больше числа невозбужденных. В рубиновом лазере накачка производится через третий расположенный выше уровень. Схема трёхуровневой накачки приведена на рисунке. Здесь же указано время жизни на 2 и 3 уровнях. Уровень  $E_2$  метастабильный. Переход между уровнями  $E_3$  и  $E_2$  безызлучательный. Лазерный переход осуществляется между уровнями  $E_2$  и  $E_1$ . В кристалле рубина уровни  $E_1$ ,  $E_2$  и  $E_3$  принадлежат примесным атомам хрома.

После вспышки мощной лампы, расположенной рядом с рубиновым стержнем, многие атомы хрома, входящего в виде примеси в кристалл рубина (около 0,05 %), переходят в состояние с энергией  $E_3$ , а через промежуток  $t \approx 10^{-8}$  с они переходят в состояние с энергией  $E_2$ . Перенаселенность возбужденного уровня  $E_2$  по сравнению с невозбужденным уровнем  $E_1$  возникает из-за относительно большого времени жизни уровня  $E_2$ . Лазер на рубине работает в импульсном режиме на длине волны 694 нм (темно-вишневый свет), мощность излучения может достигать в импульсе 10<sup>6</sup>–10<sup>9</sup> Вт.

**Исторически это был первый действующий лазер (американский физик Т. Майман, 1960 г.).**

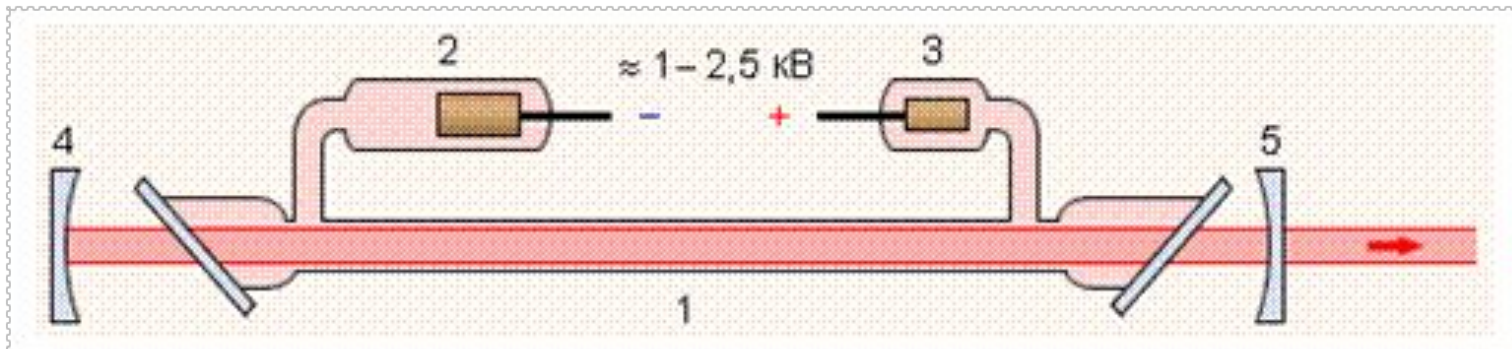
Рассмотрим газовый лазер на смеси гелия и неона. Общее давление в смеси составляет порядка  $10^2$  Па при соотношении компонент He и Ne примерно 10 : 1. Активным газом, на котором возникает генерация на длине волны 632,8 нм (ярко-красный свет) в непрерывном режиме, является **неон**. Гелий является буферным газом, он участвует в механизме создания инверсной населенности одного из верхних уровней неона. Излучение He–Ne лазера обладает исключительной монохроматичностью. Реально достигнутая монохроматичность излучения He–Ne лазера делает этот прибор совершенно незаменимым при решении многих научных и технических задач



**Рисунок 83**

Первый гелий-неоновый лазер был создан в 1961 году. На рис. 83 представлена упрощенная схема уровней гелия и неона и механизм создания инверсной населенности лазерного перехода. Прямыми стрелками изображены спонтанные переходы в атомах неона.

При достаточно высоком уровне накачки в смеси гелия и неона начинается лавинообразный процесс размножения идентичных когерентных фотонов. Если кювета со смесью газов помещена между высокоотражающими зеркалами, то возникает лазерная генерация



**Рисунок 84**

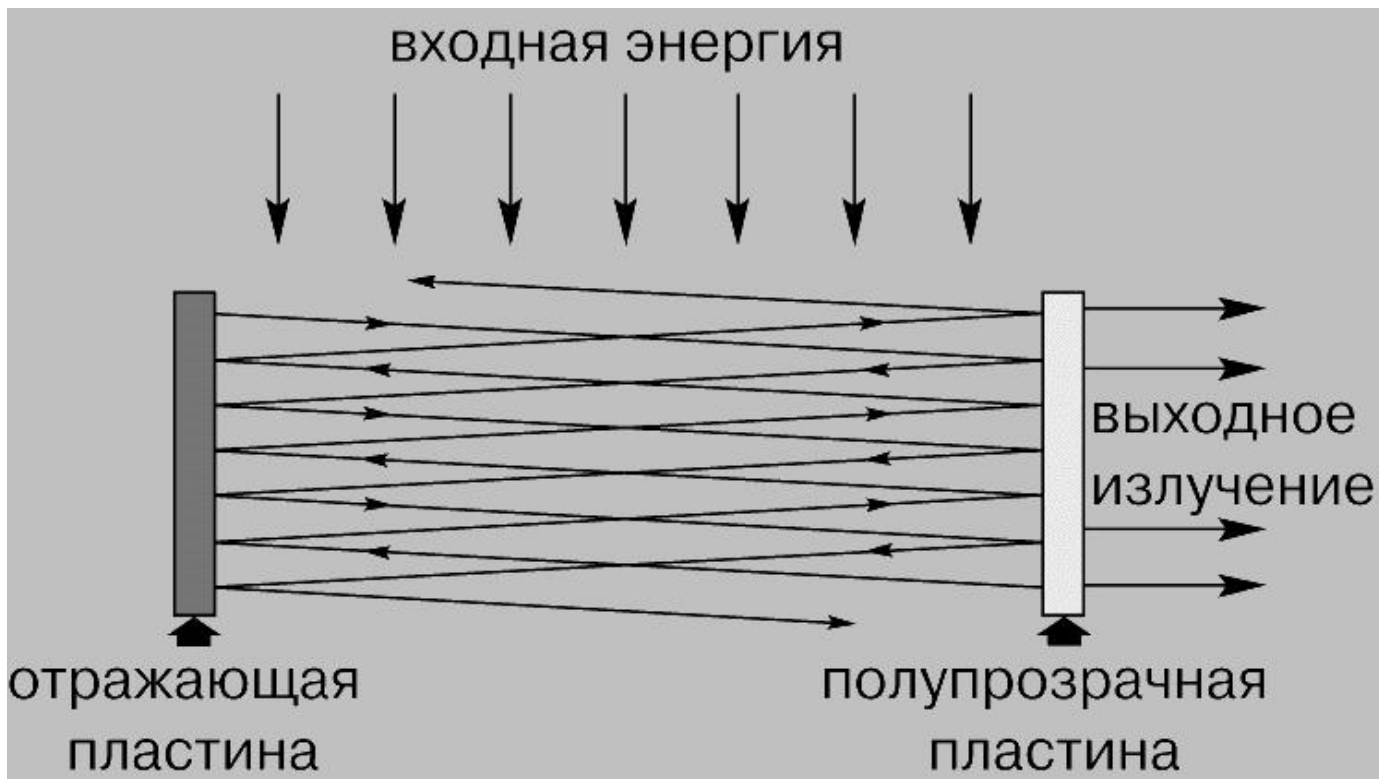
На рисунке 84 изображена схема гелий-неонового лазера: 1 – стеклянная кювета со смесью гелия и неона, в которой создается высоковольтный разряд; 2 – катод; 3 – анод; 4 – глухое сферическое зеркало с пропусканием менее 0,1 %; 5 – сферическое зеркало с пропусканием 1–2 %. Современные высокостабильные гелий-неоновые лазеры производятся в моноблочном исполнении. Для этого используется стеклообразное вещество – ситалл, обладающий практически нулевым температурным коэффициентом расширения

Для создания инверсной населённости среды лазера используются различные механизмы. В твердотельных лазерах для создания инверсной населённости среды лазера используются различные механизмы. В твердотельных лазерах она осуществляется за счёт облучения мощными газоразрядными лампами-вспышками для создания инверсной населённости среды лазера используются различные механизмы. В твердотельных лазерах она осуществляется за счёт облучения мощными газоразрядными лампами-вспышками, сфокусированным солнечным для создания инверсной населённости среды лазера используются различные механизмы. В твердотельных лазерах она осуществляется за счёт облучения мощными газоразрядными лампами-вспышками, сфокусированным солнечным излучением (так называемая оптическая накачка) и излучением других лазеров (в частности, полупроводниковых). При этом возможна работа только в импульсном режиме, поскольку требуются очень большие плотности энергии для создания инверсной населённости среды лазера используются различные механизмы. В твердотельных лазерах она осуществляется за счёт облучения мощными газоразрядными лампами-вспышками, сфокусированным солнечным излучением (так называемая оптическая накачка) и излучением других лазеров (в частности, полупроводниковых). При этом возможна работа только в импульсном режиме, поскольку требуются очень большие плотности энергии накачки, вызывающие при длительном воздействии

Чтобы увеличить усиление, нужно дольше удерживать излучение в контакте с активной средой. Для этого можно заключить активную среду в камеру с отражающими стенками. Тогда поперечная волна будет отражаться от стенки к стенке, немного усиливаясь при каждом проходе. Когда же она достаточно усилится, часть излучения можно выпустить из камеры в качестве выходного.

В диапазоне СВЧ (сверхвысокочастотном), т.е. когда длина волны находится в диапазоне от 0,1 до 100 см, размеры камеры обычно сравнимы с длиной волны. Камера, настраиваемая на нужную частоту путем изменения размеров (ее длина должна быть равна длине волны), называется объемным резонатором. Если же длина волны излучения составляет примерно 1 мм или меньше, то такой резонатор даже трудно изготовить. Однако можно сделать объемный резонатор для инфракрасного или коротковолнового видимого света так, чтобы его длина была намного больше длины волны, - например, в виде двух параллельных зеркальных пластин (рис. 2). В таком устройстве поперечная пластинам волна, поочередно отражаясь от зеркал, будет оставаться в активной среде и нарастать за счет вынужденного излучения. Волна же, распространяющаяся в любом другом направлении, быстро уходит из резонатора почти без усиления.





*Рис. 2. РЕЗОНАТОР квантового генератора (усилителя) в виде пары плоских параллельных зеркальных пластин. Существенно усиленным оказывается только то излучение, которое в конце концов выходит через полупрозрачную пластину; оно и является выходным излучением квантового генератора*

## Активная среда.

Для резонансного поглощения и усиления за счет вынужденного излучения необходимо, чтобы волна проходила сквозь материал, атомы или системы атомов которого "настроены" на нужную частоту. Иначе говоря, разность энергетических уровней  $E_2 - E_1$  для атомов материала должна быть равна частоте электромагнитной волны, умноженной на постоянную Планка:

$$E_2 - E_1 = h\nu.$$

Далее, для того чтобы вынужденное излучение преобладало над поглощением, атомов на верхнем энергетическом уровне должно быть больше, чем на нижнем. Поскольку атомов, находящихся в низших состояниях, в условиях равновесия всегда больше, чем в высших, в таких условиях всегда преобладает поглощение, а не усиление за счет вынужденного излучения. Избыток атомов в определенном возбужденном состоянии можно создавать и поддерживать, только искусственно переводя их в это состояние, причем быстрее, чем они возвращаются к тепловому равновесию. Система, в которой имеется избыток возбужденных атомов, стремится к тепловому равновесию, и ее необходимо поддерживать в неравновесном состоянии, создавая в ней такие атомы.

## Трехуровневый квантовый генератор.

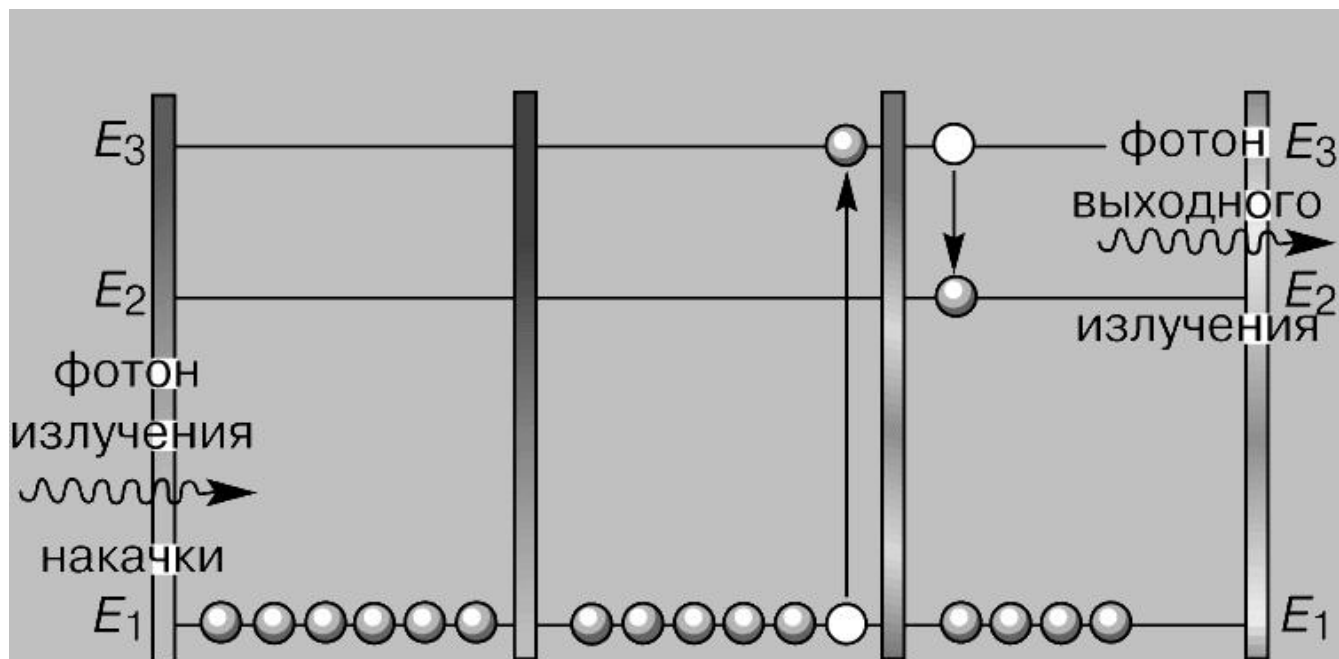
Метод создания и поддержания избытка атомов в возбужденном состоянии для газов (метод трехуровневой системы) предложен Н.Г. Басовым и А.М.Прохоровым, а для твердых материалов - Н. Бломбергенем. Первый трехуровневый квантовый усилитель создали Д.Сковил, Дж.Феер и Г.Зайдель. Трехуровневая система схематически представлена на рис. 3. Первоначально все атомы находятся на самом низком уровне  $E_1$ , а уровни  $E_2$  и  $E_3$  не заполнены. Энергетическое расстояние между уровнями  $E_2$  и  $E_3$  не равно расстоянию между уровнями  $E_1$  и  $E_2$ .

Лампа или генератор "накачки" (в зависимости от того, о каком диапазоне идет речь - оптическом или радиочастотном) дает излучение с частотой, соответствующей переходу с нижнего уровня на верхний. Поглощая это излучение, атомы возбуждаются и переходят с нижнего уровня на верхний. Поскольку первоначально на промежуточном уровне  $E_2$  нет атомов, на уровне  $E_3$  их оказывается больше. Когда на уровне  $E_3$  накопится достаточно много атомов, начинается генерация на частоте, соответствующей переходу с верхнего уровня на промежуточный

Для того чтобы квантовая генерация происходила непрерывно, уровень E2 должен быстро опустошаться, т.е. атомы должны удаляться с него быстрее, чем они создаются за счет вынужденного излучения с уровня E3.

Уровень E2 может опустошаться разными процессами, такими, как столкновения с другими атомами и передача энергии кристаллической решетке (если активная среда твердая). Во всех случаях энергия преобразуется в тепло, так что необходимо охлаждение прибора.

Накачкой можно перевести с уровня E1 на E3 не более половины атомов, так как далее эффект вынужденного излучения заставляет их возвращаться на нижний уровень. Но если вследствие столкновений или других процессов атомы с уровня E3 быстро переходят на уровень E2, то накачка их на верхний уровень с последующим переходом на промежуточный может продолжаться. Таким путем можно перекачать на уровень E3 больше половины атомов (и даже все). Тогда на промежуточном уровне оказывается больше атомов, чем на нижнем, и начинается генерация на частоте, соответствующей переходу.



*Рис. 3. ТРЕХУРОВНЕВЫЙ ПРИНЦИП*

(три энергетических уровня атомов активной среды квантового генератора). Сначала все атомы находятся на нижнем уровне  $E_1$ . Излучение накачки с соответствующей частотой заставляет атомы перескакивать на верхний уровень  $E_3$ . При переходе атомов с верхнего уровня на промежуточный  $E_2$  происходит квантовая генерация на частоте, соответствующей этому переходу. Такая квантовая генерация, в отличие от двухуровневой, может осуществляться в непрерывном режиме, если систему охлаждать