

# Методика расширенного изучения темы «Лазеры» для классов профильного обучения

## Оглавление

1. Типы лазеров и принцип их работы
2. Резонаторы
3. Источники питания лазеров
4. Осветительные системы накачки активных сред
5. Свойства лазерного пучка

### 1. Типы лазеров и принцип их работы

Оптические квантовые генераторы – это технические устройства, создающие условия инверсной заселенности в активной среде, с целью усиления внешнего вынуждающего излучения. В качестве активной среды могут быть использованы твердые, жидкие, газообразные вещества и полупроводники. Несмотря на теоретические предпосылки Эйнштейна, Фридмана и других ученых по возможности создания квантовых усилителей и генераторов, тем не менее получить инверсное состояние атомной системы оказалось сложной задачей и долго не удавалось осуществить на практике. Дело в том, что в процессе установления теплового равновесия, ранее возбужденная система от внешнего излучателя, самостоятельно переходит в основное состояние через спонтанные безызлучательные переходы. Кроме этого, в системе происходят потери на столкновение, поглощение и др. Для получения инверсии уровней, а значит и усиление вынуждающего излучения необходимо выполнение условий:

- вещество должно иметь разделенные уровни, чтобы разность энергетических состояний между ними соответствовало:  $\Delta E = h\nu_{nm} = E_n - E_m$

- в веществе можно создать инверсию населенности, когда на верхнем уровне возбужденных атомов больше, чем на основном уровне:  $N_n > N_m$ ;
- коэффициент усиления активной среды должен быть больше коэффициента всех потерь.

При соблюдении указанных условий, в атомной системе энергия возбужденных электронов метастабильного уровня активной среды может освобождаться внешним электромагнитным излучением (индуцированное излучение) и спонтанными переходами в атоме, излучая при этом фотоны той же длины волны. Таким образом, лазер может служить в качестве усилителя вынуждающего излучения и генератора когерентного излучения. Для работы ОКГ обязательное наличие обратной положительной связи. Эту связь обеспечивают разного рода резонаторы, чаще всего оптические в виде многослойных интерференционных зеркал, которые устанавливаются с обеих сторон активного элемента. Инверсию населенности верхних уровней можно осуществить:

- методом оптической накачки;
- методом сепарации, т.е. отделение возбужденных от невозбужденных атомов, путем удаления последних из активной среды;
- метод электронной бомбардировки в газовом разряде;
- метод тепловой накачки, когда возбужденные неизлучающие атомы отдают энергию излучающим атомам.

Принцип работы лазеров рассмотрим на примерах твердотельных, газовых, жидкостных и полупроводниковых активных средах. Но, предварительно полезно рассмотреть принцип работы мазера, аналога лазера для сантиметрового диапазона длин волн. Следует сказать, что описание всех лазеров приведено только для общего ознакомления с принципами работы

квантовых генераторов. Каждому лазеру в мировой научной литературе посвящено множество статей и книг, разного уровня сложности. Но, поверьте, лазеры – это интересно, полезно и востребовано.

## Мазер

Исторически первым квантовым усилителем внешнего излучения стал мазер на смеси молекул аммиака и азота, разработанный Н.Басовым, А.Прохоровым и Ч.Таунсом. В газоразрядной камере при столкновении с быстрыми электронами образуются возбужденные и невозбужденные молекулы аммиака. При этом, число невозбужденных молекул больше возбужденных. Пространственно молекула аммиака  $\text{NH}_3$  представляет собой тетраэдр, в основания которого атомы водорода, а в вершине атом азота. В основном, то есть в невозбужденном состоянии молекула аммиака является диполем. В возбужденном состоянии атом азота поочередно занимает место в вершинах тетраэдра относительно его основания и не является диполем. Если пучок возбужденных и невозбужденных молекул аммиака пропустить сквозь неоднородное электрическое поле квадрупольного конденсатора, то невозбужденные молекулы, будучи диполями, отклоняются от прямолинейного направления, а возбужденные молекулы, не будучи диполями, продолжат движение по прямой и попадают в камеру резонатора. В результате, возбужденных атомов аммиака будет больше, чем атомов в основном невозбужденном состоянии, что требуется для инверсии. Схема устройства мазера. Рис.1

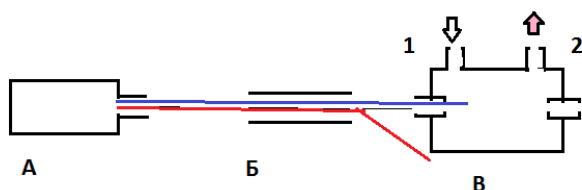


Рис.1 Схема устройства мазера (А-камера, Б-сепаратор, В-резонатор, вход 1 – сигнал 23,870 ГГц, волновод 2 – излучение 1,26 см

Через вход резонатора(1), настроенного на частоту колебательного уровня молекулы аммиака 23,870 ГГц подается слабое электромагнитное излучение. В результате через волновод(2) выходит усиленное индуцированное излучение с длиной волны 1,26 см. Схема накачки мазера на рис.2

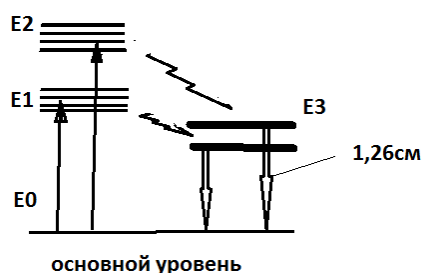


Рис.2 Схема накачки мазера

## Рубиновый лазер

Первым лазером видимого диапазона света был рубиновый лазер, изобретенный А.Майманом в 1960 г. Активный элемент – рубиновый круглый стержень облучался светом газоразрядной лампы. Кристалл рубина – это окисел алюминия  $Al_2O_3 + Cr^{3+}$  при содержании 0,05% ионов хрома цвет стержня розовый, а при содержании 0,5% рубин красного цвета. Лазер состоит из трех обязательных элементов: 1) активная среда, 2) система накачки с блоком питания, 3) резонатор, обеспечивающий обратную положительную связь. Работает лазер по трех уровневой энергетической схеме накачки Рис.3

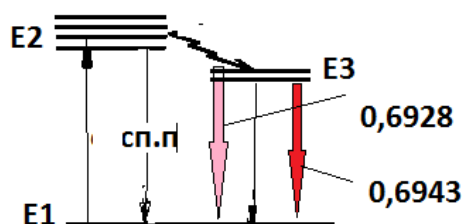


Рис.3 Схема накачки рубинового лазера

В результате импульсной оптической накачки возбужденные ионы хрома заселяют верхний широкий энергетический уровень: переход  $E_1 \rightarrow E_2$ . С уровня  $E_2$  электроны безызлучательным образом переходят на сдвоенный метастабильный уровень  $E_3$ , на котором время жизни на пять порядков больше, чем для спонтанного перехода с верхнего уровня на нижний уровень. Таким образом, обеспечивается инверсия заселенности и система готова усиливать внешнее излучение при совпадении частот. Для получения генерации электромагнитного излучения необходима обратная положительная связь. Эту связь осуществляет оптический резонатор в виде двух строго параллельных зеркал, между которыми размещают лазерную головку. У первого рубинового лазера серебряные зеркала были нанесены прямо на торцы рубинового стержня, одно из которых имел меньший коэффициент отражения для выхода лазерного луча. Спонтанные переходы с возбужденного уровня на основной уровень сопровождаются испусканием квантов света определенной энергией, но разнонаправленностью внутри активного элемента. В спектре лампы накачки всегда найдутся кванты с частотой, направлением и другими параметрами, совпадающими с квантами спонтанного перехода. В этом случае, по теории индуцированных переходов Эйнштейна происходит усиление внешнего излучения за счет индуцированных переходов. При этом, число переходов будет возрастать лавинообразно при многократном проходе фотонов внутри резонатора. Эти фотоны совершенно идентичны между собой, поэтому через полупрозрачное зеркало выходит когерентный луч, состоящий из двух спектральных линий - 0,6928 и 0,6943 мкм, соответствующие двум подуровням метастабильного уровня.

### **Газоразрядный гелий-неоновый лазер**

В газовых лазерах активной средой является смесь нескольких газов. Важной особенностью газовых активных сред является их высокая оптическая однородность. Это позволяет использовать резонатор и газовую трубку большой длины, что улучшает характеристики луча: монохроматичность, мощность, направленность. Атомарный гелий-неоновый лазер использует смесь гелия и неона в соотношении 10 : 1,5 при общем внутреннем давлении газов 80 Па. Атомы неона создают инверсную населенность, а атомы гелия лишь передают свою энергию возбуждения атомам неона. Газовую смесь возбуждают постоянным или переменным током (30 МГц), при этом возникает тлеющий разряд. Активная среда лазера возбуждается в результате соударения быстрых электронов непрерывного газового разряда с молекулами газовой смеси. Лазер работает по 4-х уровневой схеме рис.4

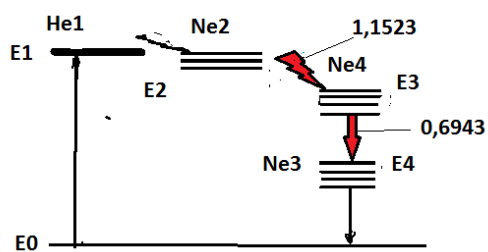


Рис.4 Схема накачки He-Ne - лазера

Возбужденные атомы гелия переходят с основного уровня на верхний уровень He(1). Рядом с этим уровнем (разность энергий всего 0,04 эВ) находится широкая полоса возбуждения атомов неона Ne(2), на который безызлучательно передается энергия возбуждения атомов гелия. Уровень Ne(2) метастабильный и переход с него на уровень Ne(4) сопровождается излучением с  $\lambda = 1,1523$  мкм. С уровня Ne(4) электроны переходят на уровень Ne(3), что сопровождается излучением на  $\lambda = 0,6328$  мкм. Переход с уровня Ne(3) на основной уровень безызлучательный в результате рассеивания энергии при столкновении с атомами среды. Газоразрядная трубка гелий-неонового лазера изготовлена из стекла или кварца длиной 20 – 100 см. С одной стороны, увеличение длины трубки увеличивает мощность лазера, с

другой стороны, ухудшаются условия газового разряда. Для уменьшения потерь на выходе луча его линейно поляризуют с помощью окон установленных под углом Брюстера, равный  $\arctg n$ , где  $n$  – показатель преломления материала окна. Интерференционные зеркала резонатора настраивают(юстируют) строго параллельно между собой. При возбуждении постоянным током, напряжение до 2-х кВ, а для поджига разряда подается короткий импульс в 12 кВ с емкости 1 – 2 мкф через первичную обмотку импульсного трансформатора. Некоторые характеристики гелий-неонового лазера: мощность до 60 мВт, расходимость луча до 3 мрад ( $10'$ ), к.п.д. около 0,1%..

## Неодимовые лазеры

Твердотельные лазеры на ионах неодима работают по четырехуровневой схеме накачке инверсионных уровней. К этим лазерам относятся неодимовые лазеры на стекле и на кристаллах ИАГ (иттрий алюминиевый гранат). Оптически однородный круглый стеклянный стержень, активированный трехвалентными ионами неодима, является активной средой. Так как объем активной среды непосредственно влияет на выходную мощность лазера, то лазеры на стекле имеют неоспоримые достоинства: практически любой размер и форма (длина до двух метров, диаметр стержня до 80 мм) высокая оптическая однородность и низкая стоимость по сравнению с кристаллическими средами. Правда, стекло имеет низкую теплопроводность, поэтому стеклянный лазер необходимо охлаждать проточной водой, особенно в многоимпульсном режиме. Энергетическая схема накачки неодимового лазера приведена на рис.5.

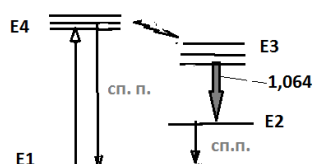


Рис.5 Схема накачки неодимового лазера

$E_1$  – основной уровень,  $E_4$  - верхний уровень накачки,  $E_3$  – метастабильный уровень,  $E_2$  – конечный уровень. Время жизни на уровне  $E_4$  около  $10^{-5}$  с зависит от концентрации ионов неодима, температуры и теплофизических свойств стекла. Через безызлучательные переходы энергия возбужденных атомов с уровня  $E_4$  передается метастабильному уровню  $E_3$ , на котором время жизни около  $10^{-3}$  с. Рабочим или лазерным переходом является переход  $E_3 \rightarrow E_2$  с излучением на  $\lambda = 1,064$  мкм. Уровень  $E_2$  почти пустой, так как тепловой переход  $E_1 \rightarrow E_2$  запрещен, в виду их энергетической разницы в  $200 \text{ см}^{-1}$  ( $1 \text{ см}^{-1} = 1,24 \cdot 10^{-4}$  эВ). Таким образом, получена инверсия заселенности, позволяющая активной среде усиливать вынуждающее излучение путем индуцированных переходов. Для возбуждения 4-х уровневой активной среды требуется значительно меньше энергии, чем для 3-х уровневой системы накачки. Более перспективным оказался лазер на кристалле ИАГ +  $\text{Nd}^{3+}$  с  $\lambda = 1,064$  мкм. Этот лазер может работать в многоимпульсном и непрерывном режимах излучения, в виду высокой теплопроводности кристалла. Мощность лазера до 0,5кВт, а расходимость луча менее 30 угловых минут, к.п.д. около 2%, плотность мощности в импульсе до  $10^8 \text{ Вт/см}^2$ . Лазер может работать в многомодовом (свободная генерация) и одномодовом (модуляция добротности) режимах. В одномодовом режиме средняя мощность уменьшается, а плотность мощности повышается за счет уменьшения расходимости луча и уменьшения длительности импульса. Лазер на ИАГ может работать с частотой 100 Гц и длительностью импульса менее 10нс. Срок эксплуатации твердотельных лазеров в основном определяется сроком службы импульсных ламп накачки, которую легко заменить на новую. При соответствующей настройке резонатора лазер ИАГ может работать на удвоенной частоте, или  $\lambda = 0,523$  мкм. Работая в многоимпульсном режиме активный элемент



нагревается и его характеристики изменяются. Поэтому большинство твердотельных лазеров необходимо охлаждать проточной водой и правильно выбрать частоту следования импульсов, во избежание срыва генерации излучения.

## Аргоновый лазер

Ионный аргоновый лазер непрерывного и импульсного действия с  $\lambda = 0,48 \text{ мкм}$  является достаточно распространенным по своим функциональным характеристикам. Часто ионные лазеры относят к атомным. Способ накачки аргонного лазера предложил Е.Гордон(1964г.) Химически инертный газ в виде атомов ионизируется быстрыми электронами в стационарном тлеющем разряде при плотности тока до  $10^3 \text{ А/см}^2$ . В импульсном режиме работы лазера используют импульсный разряд от высоковольтного источника напряжения. Частота повторения импульсов составляет несколько кГц и зависит от свойств нестационарной плазмы. Газовый разряд создается в капилляре диаметром 5мм при давлении газа 500Па. Ток в капилляре большой, а значит нагревание высокое, поэтому активный элемент необходимо охлаждать проточной водой. Упрощенная схема получения инверсной заселенности аргонного лазера дана на рис.6

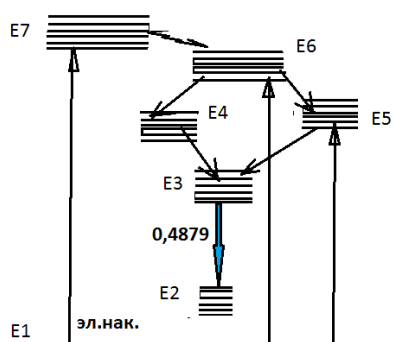


Рис.6 Схема накачки аргонного лазера

Между уровнями  $E_3$  и  $E_2$  происходит инверсия населенности в результате возбуждения атомов аргона быстрыми электронами в газовом разряде.

Степень ионизации атомов аргона может быть трехкратной, поэтому в аргоновом лазере можно получить генерацию в ультрафиолете на  $\lambda = 0,361$  и  $0,3638$  мкм. Лазерный уровень  $E_3$  метастабильный и время жизни на нем значительно выше чем на уровнях  $E_2$  и  $E_6$ , которые быстро опустошаются. Через капилляр идет сильный ток, поэтому капилляр из кварцевого стекла быстро выходит из строя (100 ч.). Капилляр из окиси бериллия значительно долговечнее (1000 ч.). При высокочастотном возбуждении атомов срок капилляров увеличивается, так как снижается бомбардировка его стенок ионами аргона. Потребляемая мощность лазера около 5 кВт, а к.п.д. достигает 7%. Кроме основной длины волны  $\lambda = 0,4879$  мкм для однократной ионизации аргоновый лазер может работать на  $\lambda = 0,4579$  мкм и  $0,5145$  мкм в зависимости от интерференционного зеркала резонатора, синтезированного на данную длину волны. Лазер на аргоне считается самым мощным в своем классе и распространенным для лазеров в ультрафиолетовом и видимом диапазонах длин волн.

### **Газовый лазер на молекулах азота**

Получить инверсную заселенность верхних уровней молекул азота можно лишь в нестационарном режиме. Это связано с тем, что в процессе развития разряда верхние уровни заселяются активнее, чем нижние уровни. Время жизни возбужденных ионов на верхнем уровне заселения на три порядка короче нижнего лазерного уровня. Источник напряжения до 40 кВ обеспечивает, необходимую для инверсии, высокую скорость нарастания тока газового разряда. Длительность импульсов азотного лазера составляет 5 – 20 нс. Частота следования импульсов 50 – 100 Гц. Выходная мощность излучения до 10 кВт. Плотность активной среды газовых лазеров значительно меньше плотности твердотельных лазеров, поэтому для роста мощности увеличивают длину активного элемента (газовой металлостеклянной трубки).

Зеркала резонатора размещают либо внутри трубки, либо вне ее. На концах трубки под углом Брюстера ( $\arctg n$ ,  $n$  – показатель преломления стекла) закреплены интерференционные зеркала на стеклянных (для видимого света) или кварцевых (для ультрафиолетового излучения) подложках. Чтобы уменьшить изменение однородности в плотности газа вблизи электродов, используется обводная трубка, выравнивающая давления у анода и катода. Юстировочный механизм позволяет установить зеркала строго параллельно при настройке лазера на генерацию излучения. Азотный лазер работает на  $\lambda = 0,33 \text{ мкм}$ , длительность импульсов 5 – 15 нс, частота следования импульсов 100 Гц, расходимость луча около 5 угловых минут.

### **Молекулярный CO<sub>2</sub> – лазер**

У атомных и ионных лазеров верхний энергетический уровень значительно выше нижнего уровня, поэтому их излучательный к.п.д. довольно низкий. Для повышения к.п.д. лазера необходимо иметь верхние уровни ближе к основному уровню, чтобы большее число, возбужденных атомов оказалось на лазерном уровне в процессе накачки активной среды. Колебательные уровни молекул CO<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub>, HCN, H<sub>2</sub>O располагаются близко к основному уровню и их можно использовать для получения инверсии заселения. В 1964 г. С.Пател получил мощность CO<sub>2</sub> – лазера в непрерывном режиме около 1кВт и к.п.д. 10%, что было совершенно неожиданно для того времени. CO<sub>2</sub> –лазер работает на смеси газов: CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, He, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> в пропорциях – 1,5:2,5:11,2:0,2:0,1 при общем давлении газов 15мм.рт.ст. При этом в схеме переходов учитывают лишь газы CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, He. CO<sub>2</sub>–лазеры делят на прокачиваемые и не прокачиваемые, импульсные и непрерывные. В прокачиваемых лазерах отсутствует проблема изменения химического состава активной смеси, в отличие от не прокачиваемых лазеров. Молекула CO<sub>2</sub> имеет колебательных степени свободы, соответствующие трем типам

колебаний: симметричные, деформационные и асимметричные колебания. Их энергии возбуждения соответственно: 0,163эВ, 0,078эВ, 0,276эВ. Механизм создания инверсии заселенности удобно описывать через квантовые числа  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ , которым приписывают кратности возбуждения соответствующих типов колебаний. Пусть  $n_1 = 0$ ,  $n_2 = 2$ ,  $n_3 = 0$ , тогда для чисто асимметричных колебаний молекулы соответствует запись (001), а состояние с двукратным деформационным колебанием можно записать, как (020). Основное, то есть невозбужденное состояние выглядит как (000). С учетом сказанного, на рис.8 показана схема образования инверсионных уровней, на котором три разных типа колебаний молекулы  $\text{CO}_2$  и один возбужденный уровень молекулы азота.

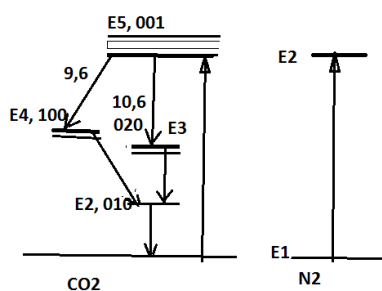


Рис. 7 Схема накачки  $\text{CO}_2$  лазера

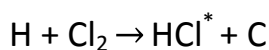
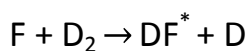
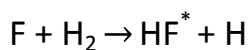
Нижние уровни (020) и (100), верхний уровень молекулы  $\text{CO}_2$  (001). Лазерный переход (001)  $\rightarrow$  (100) дает индуцированное излучение с  $\lambda = 10,6\text{мкм}$ , а переход (001)  $\rightarrow$  (020) дает излучение на  $\lambda = 9,4\text{мкм}$ . Возбужденный уровень (001) образуется при столкновении молекулы  $\text{CO}_2$  с электронами газового разряда и в результате резонансного взаимодействия с возбужденными молекулами азота. Переходы с уровней (020) и (100) на уровень (010), а затем на основной уровень (000) резонансные безызлучательные посредством молекул воды и гелия, которые способствуют получить инверсию заселенности. Следует заметить, что каждому колебательному уровню соответствует вращательный подуровень,

поэтому переходы типа  $(001) \rightarrow (020)$  и  $(001) \rightarrow (100)$  являются колебательно-вращательными. Действительно, все верхние уровни состоят из большого числа подуровней, и генерация излучения лежит в диапазоне 9,2 – 11,4 мкм. На основной частоте  $2,83 \cdot 10^{13}$  Гц (10,6 мкм) в непрерывном режиме мощность  $\text{CO}_2$  – лазеров достигает сотни кВт, а к.п.д. достигает 60%. Прокачиваемые  $\text{CO}_2$  –лазеры мощные, но громоздкие, из-за системы подачи газов и регулирования, а также большой длины трубы с газами. Обычно, мощные  $\text{CO}_2$  –лазеры состоят из отдельных секций, параллельных между собой и соединенных поворотными зеркалами. Резонатор лазера состоит из полусферических зеркал на основе хлористого натрия, покрытых пленкой теллура, в виду, гигроскопичности каменной соли. Для улучшения оптических характеристик и увеличения мощности на выходе лазера стоит пластинка из арсенида галлия под углом Брюстера-  $\arctg(n - \text{показатель преломления пластинки})$ , создающая линейно-поляризованное излучение. На выходе устройства ирисовая диафрагма, как в обычном фотоаппарате, для регулирования светового потока. Трубка с активной средой охлаждается проточной водой. В активной среде могут происходить процессы типа диссоциации молекул, особенно в отпаянных  $\text{CO}_2$  – лазерах, что снижает мощность излучения или срывает генерацию. Поэтому параллельно трубке устанавливают резервный баллон со смесью газов. Помимо газоразрядного  $\text{CO}_2$  – лазера, имеются электроионизационные и газодинамические  $\text{CO}_2$  – лазеры. В электроионизационных лазерах давление газовой смеси выше, чем у газоразрядных лазера, поэтому они мощнее на несколько порядков на единицу объема активной среды. Принцип и схема получения индуцированного излучения аналогичен газоразрядному  $\text{CO}_2$  – лазеру, но возбуждение молекул газовой смеси происходит под действием электронов, ускоренных в линейном ускорителе. Поэтому в газоразрядной трубке возникает несамостоятельный разряд с плотностью тока  $10^{-4}$  А/см<sup>2</sup> и

энергией электронов до 500 кэВ. Газодинамический ОКГ работает на газовой смеси  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  в пропорциях: 0,08:0,90:0,02, по принципу тепловой накачки. Молекулы  $\text{H}_2\text{O}$  используются для быстрой релаксации уровня (010). Смесь газов проходит через узкую щель и быстро расширяется в большой объем. При этом температура смеси падает с 1500К до 300К, а давление с 30 атм до 0,1 атм., скорость газа на выходе из сопла около 1500 м/с. В газовой смеси содержание азота 90 % и резонансная передача колебательной энергии, возбужденных при температуре 1500 градусов молекул азота молекулам углекислого газа, создает необходимую инверсию заселенности. Мощность газодинамических лазеров сотни кВт, а к.п.д. всего несколько процентов.

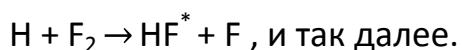
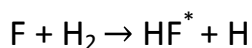
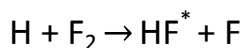
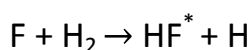
## **Химические лазеры**

Интерес использования химических реакций для создания на их основе лазеров объясняется тем, что в экзотермических реакциях может выделяться большое количество тепловой энергии. В химических лазерах колебательно-вращательные переходы реакций замещения используются для создания инверсной заселенности лазерных уровней. Возбужденные молекулы или сами высвечивают фотоны, или стимулируют своей энергией возбуждения другие молекулы на излучение. В качестве примеров можно привести такие химические реакции:



Но для получения вместо молекул  $\text{F}_2$ ,  $\text{D}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{Cl}_2$  их атомы, теперь это химически активированные реагенты, надо затратить определенную энергию извне. Еще надо ускорить химическую реакцию, чтобы верхние

рабочие уровни заселялись быстрее. Концентрация реагентов влияет на скорости химической реакции. Для получения химически активных реагентов используют диссоциацию: тепловую, фотодиссоциацию, диссоциацию электронным ударом. Именно эти способы используют для получения инверсной заселенности рабочих уровней. При этом, инициирование электронным ударом наиболее кратковременный ( $10^{-8}$  с). Фотодиссоциация осуществляется импульсными ультрафиолетовыми кварцевыми лампами. Тепловое инициирование диссоциации молекул можно в газодинамическом лазере, где скорости потока газов и температура высокие. Обычно химические реакции имеют цепной характер, и химически активные центры воспроизводятся в самой реакции, но вначале их надо получить с помощью диссоциации. Пусть имеется атом фтора и молекула водорода, тогда в реакции получим возбужденную молекулу HF\* .



Наиболее перспективными химическими лазерами оказались лазеры не смеси дейтерия, фтора и углекислого газа, дающие длинную лазерную цепь. В этом лазере энергия возбуждения передается от активированных молекул в химической реакции к невозбужденным молекулам, не являющиеся инверсионными. Так, активированные молекулы HF , DF резонансным путем передают свою энергию невозбужденным молекулам CO<sub>2</sub> , которые затем высвечивают фотоны. Вариант химического лазера показан на схеме рис.9

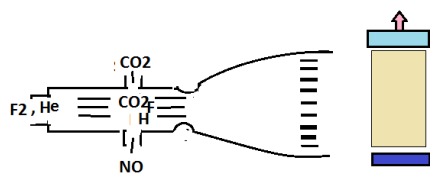
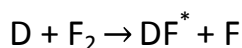
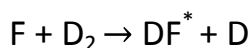


Рис 8 Схема химического лазера

Для работы лазера сначала в камеру поступает смесь фтора и гелия. Причем, гелий нужен для снижения заселенности нижнего уровня молекулы  $\text{CO}_2$  и предотвращения воспламенения смеси фтор-водород. Затем, через отверстия инжектируют окись азота и углекислый газ. Газ  $\text{NO}$  вводят в камеру, чтобы по реакции  $\text{NO} + \text{F}_2 \rightarrow \text{NOF} + \text{F}$  получить химически активный центр. Когда концентрация атомов фтора станет достаточной, в камеру инжектируют водород. В результате начинается цепной процесс по схеме:



Возбужденные молекулы  $\text{DF}^*$  резонансно передают свою энергию молекулам  $\text{CO}_2$ . Теперь эти возбужденные молекулы потоком выносятся в резонатор и генерируется лазерное излучение. Проблемой такого лазера является агрессивность и токсичность газов.

### Эксимерные лазеры.

Условно к химическим лазерам можно отнести эксимерные лазеры на молекулах галоидов и димеров инертных газов ( $\text{ArCl}$ ,  $\text{KrF}$ ,  $\text{XeCl}$ ,  $\text{XeF}$ ,  $\text{Ar}_2$ ,  $\text{Kr}_2$ ,  $\text{Xe}_2$ ) дающие излучение в ультрафиолетовой области[18].. Димеры и их галоиды могут существовать только в возбужденном состоянии. Это значит,  $\text{AB}$  - неустойчивое, а возбужденное состояние  $\text{AB}^*$  - устойчивое (где  $\text{A}$  – атом инертного газа, а  $\text{B}$  – атом галогена). Возбуждение молекул  $\text{A}_2$  и  $\text{AB}$  происходит при столкновениях невозбужденных молекул  $\text{A}_2$  и  $\text{AB}$  с



возбужденными молекулами  $A_2^*$  и  $AB^*$ , а также при соударении с быстрыми электронами в газовом разряде. Время жизни возбужденного состояния до  $10^{-9}$  с, а в основном состоянии -  $10^{-14}$  с. Переход в основное состояние происходит по схеме:  $AB^* \rightarrow A + B + h\nu$ . В зависимости от типа димеров в системе эксимерные лазеры могут излучать на разных ультрафиолетовых линиях от 0,13 до 0,35 мкм, что пока не могут генерировать другие типы лазеров. Длительность импульсов может быть от 3нс( $Xe_2$ ) до 1мкс( $XeF$ ), и ширина полосы усиления изменяется от 1нс( $XeBr$ ) до 20нс ( $Xe_2$ ). Для работы эксимерного лазера с однородным газом требуется большое давление (до 10 атм) и высокие скорости накачки. Энергия в импульсе достигает величины 1Дж при длительности –  $10^{-9}$  с, а к.п.д. до 20%. Использование буферных газов типа Ar, Ne,  $NF_3$  и других, удается снизить давление (до 13кПа) и увеличить энергию в импульсе до 100 Дж( $KrF$ ). Частота следования импульсов эксимерного лазера может составлять  $10^3$  Гц, при средней мощности 100Вт. Эксимерные лазеры широко используют в науке, микроэлектронике, в медицине, в частности, в офтальмологии, для проведения сложнейших операций в глазу.

### **Жидкостные лазеры**

В жидкостях концентрация активных центров может приближаться к твердотельным лазерам. Поэтому мощность тоже может быть соответствующей. Более того, мощность зависит от объема активной среды, а объем кюветы жидкостного лазера не лимитирован, да и охлаждать его нет нужды. Хотя однородность активной среды в жидкостном лазере выше, чем у твердотельного, но при мощной накачке возможна оптическая неоднородность, в плане показателя преломления. Жидкие активные среды делятся на металлоорганические(хелатные) и неорганические (апротонные, т.е. без водорода). В металлоорганических растворах накачка происходит не

световая, а в результате возбуждения ионов внутримолекулярной передачи энергии от органической составляющей к ионам металл, чаще лантаниды. В хелатных растворах используют диметиламмоний ( $\text{CH}_3\text{CN} + \text{Eu}^{3+}$ ) и дейтерированный трибутилфосфат, активированный трехвалентным неодимом, излучающие на длинах волн 0,612 и 1,054 мкм. Инверсия происходит по 4-х уровневой неодимовой схеме. Неорганические растворы в качестве активной среды на основе  $\text{SeOCl}_2 + \text{Nd}^{3+}$  дают генерацию на длинах волн 1,056 и 1,0525 мкм, но они токсичны.

### **Лазеры на красителях**

Так как молекулы красителей сложные, то у них сильно выражены колебательные уровни энергии. Эти уровни располагаются почти непрерывно в полосе спектра. В результате внутримолекулярного взаимодействия молекула быстро переходит на другой энергетический уровень. После накачки, через очень короткий промежуток времени на верхнем уровне полосы соберутся все возбужденные молекулы. Далее они могут совершить переход на любой из энергетических уровней нижней полосы, излучая квант света. В результате, появляется возможность получить излучение практически любой частоты в интервале ширины основной полосы. В зависимости настройки резонатора лазера на красителе можно получить почти непрерывную перестройку частоты лазера в широком диапазоне от 0,34 до 1,1 мкм. Органические красители делят на классы: оксазины, полиметины, ксантены, кумарины, атрацены, фталацианины, азины и др.[20], Растворы красителей обладают широкими полосами поглощения в ультрафиолетовой и видимой области. В качестве растворителей красителей используются вода, метанола, этанола, циклогексаны, толуол, ацетон, глицерин, а также полиметакрилат, полистирол. Для накачки активной среды используются лазеры видимого и

ультрафиолетового спектра или импульсные газоразрядные лампы.

## Полупроводниковые лазеры

Особенности энергетических спектров полупроводников позволяют использовать эти свойства для создания лазеров в широком диапазоне длин волн. Легированные полупроводники чувствительны к внешним воздействиям: нагревание, давление, различным излучениям. Еще до появления первого полупроводникового лазера на арсениде галлия(1962г.) Н.Басов, Ю.Попов, Б.Вул разработали принципы создания и функционирования полупроводниковых излучателей. Сегодня промышленность выпускает большое число разных типов полупроводниковых лазеров. Например, CdS, CdSe, CdTe, ZnS, ZnO, PbS, PbSe, GaAs, GaTe,  $Al_{1-x}Ga_xAs$ ,  $GaAs_{1-x}Sb_x$  и др. Полупроводниковые лазеры излучают на различных длинах волн, начиная от УФ до дальнего ИК (0,38 - 31 мкм). Полупроводниковые лазеры малогабаритны, мало потребляют энергии и имеют очень высокий к.п.д. до 98%. Энергетическая структура полупроводника состоит из трех широких зон. Рис.9 Схема уровней легированного полупроводника.

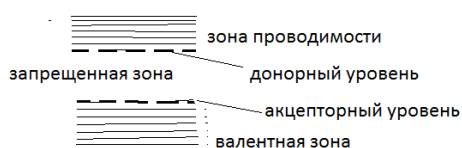


Рис.9 Схема уровней полупроводника

Валентная и зона проводимости разделены относительно широкой запрещенной зоной так, что чистый полупроводник по своим свойствам ближе к диэлектрикам. В результате внешних воздействий, например, тепла или излучения, электроны из валентной зоны перейдут в зону проводимости. Тогда образуется пара электрон-дырка, которая может участвовать в

проводимости. С другой стороны, спонтанный или вынужденный переход под действием света в основное состояние сопровождается рекомбинацией электрона и дырки (электрон возвращается в валентную зону). Однако, в условиях термодинамического равновесия полупроводник может только поглощать свет, но не усиливать внешнее излучение, так как концентрация электронов в валентной зоне всегда больше, чем в зоне проводимости. Другое дело, когда запрещенная зона станет уже за счет свободных зон вблизи дна запрещенной зоны и зон выше потолка валентной зоны. Для получения инверсной заселенности, а значит создания условий для индукционных переходов, необходимо, чтобы в у дна зоны проводимости электронов оказалось значительно больше, чем у потолка валентной зоны. Полупроводник считается вырожденным, когда в зоне проводимости число электронов значительно больше, чем в валентной зоне, а все дырки находятся вверху валентной зоны. Легирование полупроводника трехвалентной примесью делает его полупроводником р-типа, т.е. с дырочной проводимостью. Легирование полупроводника пятивалентной примесью делают его полупроводником n-типа, т.е. с электронной проводимостью. В результате легирования получаем необходимые свободные зоны у потолка валентной зоны и у дна зоны проводимости. Эти свободные зоны названы уровнями Ферми. В результате возбуждения в зоне проводимости концентрация электронов становится выше, чем в валентной зоне и расстояние между уровнями Ферми становится больше ширины запрещенной зоны, и это создает условие для получения инверсной заселенности уровней. Накачку этих уровней можно осуществить нагреванием, излучением, пропусканием тока. Соединяя полупроводники противоположной проводимости в месте их контакта получим р-n переход, При совпадении частоты вынуждающего излучения с частотой перехода в зону проводимости можно получить усиленное индуцированное излучение в

результате вынужденной рекомбинации электронно-дырочных пар. Помещая вырожденные полупроводник в оптический резонатор, возникшие при рекомбинации, фотоны будут многократно проходить кристалл, индуцируя все больше таких же фотонов, создавая их лавину. При этом, широкая вначале полоса частот будет постепенно сужаться, по причине резонансных свойств резонатора. В качестве резонатора служат зеркала (L1 и L2) или полированные грани кристаллов. Пример схемы полупроводникового лазера рис 10

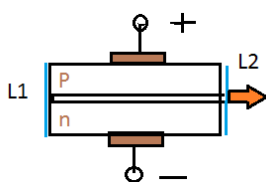


Рис.10 Схема полупроводникового лазера

Полупроводниковые лазеры можно разделить по способу накачки: 1) инжекционные на p-n – переходе, 2) с электронным возбуждением, 3) с оптической накачкой, 4) прямым электронным возбуждением через лавинный пробой. Наиболее распространены инжекционные лазеры, когда инжекция неравновесных носителей происходит при пропускании прямого тока через p-n – переход. Инжекционные лазеры делят на гомоструктурные и гетероструктурные (собраны из нескольких полупроводниковых веществ).

## 2. Резонаторы

ОКГ построен из трех основных узлов: активный элемент разного исполнения, системы накачки с источником питания и резонатор, а также вспомогательных систем. Теория резонаторов[21] достаточно сложная, поэтому при создании нового лазера учитывают выводы теории, но окончательное слово за экспериментами. При описании разных типов лазеров обязательно говорилось о назначении резонатора и его исполнении,

правда, в двух словах. Чаще всего, в качестве резонатора служат два параллельных зеркала, между которыми расположен активный элемент. Резонатор, настроенный на выбранную длину волны, должен обеспечить резонанс электромагнитных колебаний на его фактической длине, на которой должно укладываться целое число полуволн, а на двух проходах целая волна. При этом, для выполнения условия максимума сдвиг фазы составит ровно  $2\pi$ . Для функциональной характеристики резонатора вводят понятие добротности( $Q$ ), которая показывает отношение рабочей частоты к ширине спектральной полосы резонатора. Эта полоса расширяется из-за температурных и других эффектов в активной среде и свойств самого резонатора. К примеру, добротность резонатора для твердотельных неодимовых лазеров  $Q > 10^6$ . Резонатор влияет на структуру лазерного луча и мощность. Структура излучения описывается в виде типов колебаний, называемых модами. Конкретная мода характеризуется распределением амплитуды и фазы на рабочей поверхности зеркала резонатора. Наличие мод создает пиковую структуру лазерного луча. Обозначают моды через сочетание  $TEM_{mnq}$ , где  $m$  и  $n$  -поперечные индексы моды, а  $q$  -продольный индекс моды. Схематично поперечные типы мод изображены на рис. 11

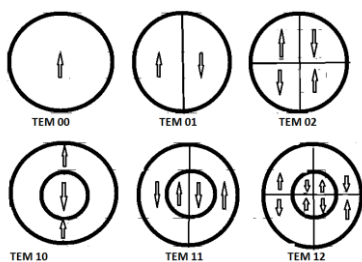


Рис. 11 Схема поперечных мод

Этим продольным модам соответствуют аксиальные продольные моды. Основная поперечная мода обозначается как  $TEM_{00}$ , это значит, в структуре лазерного пятна нет пиков. Обычно, в структуре пятна в импульсном или непрерывном режиме многомодовая. Формирование модовой структуры

происходит при многократном отражении электромагнитной волны от зеркал резонатора. Часто для улучшения характеристики лазерного излучения внутри резонатора устанавливают оптически прозрачную пластинку под углом Брюстера ( $\arctg n$ , где  $n$  – показатель преломления пластинки). Эта пластинка пропускает линейно-поляризованное излучение. Иногда, с той же целью под углом Брюстера устанавливают выходное зеркало резонатора. В случаях высокого усиления активной среды (лазер на парах меди, водорода, азота) отсутствует резонатор и лазер работает как усилитель, но при этом когерентность излучения резко снижается. Создание лазеров большой мощности напрямую связано с задачами управления параметрами лазерного луча, и, в частности, исследования пространственно-временной структурой луча. Выпускаемые лазеры имеют длительность импульсов от  $10^{-3}$  до  $10^{-12}$  с, и предназначены для решения научных и практических задач. Без внешнего воздействия на резонатор все лазеры работают в режиме свободной генерации, которая является нестационарной. Связано это с конкретной активной средой, нестабильностью работы резонатора (например, вибрация) и системы накачки, температурными перепадами. По своей природе лазерное излучение многомодовое и одним из факторов этого является наличие в резонаторе несколько электромагнитных колебаний, отличающихся небольшим сдвигом фаз. Режим свободной генерации проявляется в наличии пиковой структуры лазерного луча. Длительность пикового импульса около  $10^{-7}$  с, а интервал между пиками составляет 1 мкс, при общей длительности импульса  $10^{-3}$  с. Для получения коротких и мощных импульсов используют режим модуляции добротности резонатора, при котором вместо многих пиков получают один гигантский импульс. Длительность такого импульса может быть от 1 до 100 пикосекунд, а мощность в импульсе до  $10^{10}$  Вт. Модуляцию добротности осуществляют с помощью модуляторов внутри резонатора, управляемых

внешним сигналом. В этом случае резко уменьшаются потери при инверсионном заселении. Различают модуляторы: электрооптические, оптико-механические, акустооптические и др. Работа модулятора (затвора) должна быть согласована во времени с временем максимальной накачки инверсионного уровня. Кроме активных модуляторов используют пассивные, например, просветляющие фильтры (фототропный затвор).

### **3. Источники питания лазеров**

Система накачки непрерывных неодимовых лазеров состоит из ксеноновых газоразрядных ламп непрерывного действия и источника питания. В газовых лазерах источник питания обеспечивает накачку активной среды в газовом разряде. Для работы  $\text{CO}_2$  - лазера в непрерывном режиме необходимо учитывать вольт-амперную характеристику газового разряда. Источником питания служит двухтактный выпрямитель или схема с удвоенным напряжением и балластным сопротивлением, включенного последовательно с газоразрядной трубкой, и которое обеспечивает стационарный ток в трубке. Умножение напряжение необходимо только для поджига газового разряда. Накачка неодимовых импульсных лазеров осуществляется импульсными лампами типа ИФП - 800 или ИФП -1200, ИФП – 5000. Для них и для газовых лазеров используют индуктивные, емкостные и индуктивно-емкостные схемы питания. Зарядка занимает время больше, чем длительность импульса накачки. В индуктивных накопителях энергии токи большие, поэтому из-за их коммутации такие накопители используют редко. Выбор емкостного накопителя зависит от возможностей активной среды работать с нужной частотой и мощностью. Заряд емкости производят через балластное сопротивление, которое может перегреваться. Зарядка емкостного накопителя от источника постоянного тока улучшает характеристики импульса и повышает к.п.д. источника питания. Чаще всего,



используют индуктивно-емкостные накопители энергии, так как изменение сопротивления нагрузки (активная среда) не влияет на стабильность тока нагрузки.

#### **4. Осветительные системы накачки активных сред**

Осветительная система состоит из ламп накачки и отражателей разной конструкции. Для системы важны эффективность концентрации светового излучения на активную среду, степень однородности по освещенности и сроки службы. В серийных лазерных технологических установках чаще всего используют одну лампу, расположенную параллельно активному элементу. Снаружи лампа и элемент закрыты зеркальным отражателем из серебра или окиси магния с коэффициентом отражения до 99%. Для мощных лазеров ставят две или четыре осветительные лампы. По мере старения ламп накачки, предусмотрено повышения напряжения на них в определенном пределе. Характеристики импульсных ламп приведены в работе [27]

#### **5. Свойства лазерного луча**

Уникальные возможности луча лазера можно понять при сравнении с другими источниками энергии. Основные характеристики лазерного луча: монохроматичность, когерентность, направленность, плотность мощности в сфокусированном пятне, диаметр сфокусированного пятна, длина волны или возможный диапазон волн. Благодаря таким характеристикам, можно говорить о многообразных возможностях лазерного луча для их практического применения. Рассмотрим некоторые свойства:

- высокая степень монохроматичности видна из выражения:  $\Delta\lambda < 10^{-11}$  м;

- очень высокая плотность мощности: пусть энергия в импульсе 1Дж, а длительность импульса в режиме модулированной добротности  $10^{-8}$  с. Диаметр сфокусированного пятна 100мкм. Тогда плотность мощности в

пятне:  $4 \cdot 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>. для сравнения плотность мощности солнечного света всего 0,13Вт/см<sup>2</sup> без фокусировки, или с такой же фокусировкой – 1,7 кВт/см<sup>2</sup>»

- временная и пространственная когерентность: если время импульса  $t = 1$ нс, то длина когерентности  $L_k = c t$  и  $L_k = 3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-9} = 30$ см, а для импульса  $10^{-8}$ с получим  $L_k = 3$ м. Для дневного света  $L_k = 0,1$ м;

- высокая направленность: угол расходимости газовых лазеров меньше 10 минут. Для сравнения луч мощного прожектора дал бы на поверхности Луны пятно диаметром 40000 км, лазерный луч дает пятно всего 3 км.

- к.п.д. для разных лазеров может быть в пределах от 0,1 до 95%: у гелий-неоновых 0,1%, для CO<sub>2</sub> – лазера – 40%, для полупроводниковых более 95%.

- яркость лазерного луча на много порядков выше солнечного луча;

- мощности лазеров составляет: от 1мВт (гелий-неоновый лазер) до нескольких сотен кВт (газодинамические CO<sub>2</sub> – лазеры);

- длительности импульсов: от  $10^{-14}$  с (эксимерные лазеры) до 1нс (неодимовые лазеры);

- диапазон длин волн: от 30мкм (полупроводниковые лазеры) до 0,13мкм (эксимерные и полупроводниковые).

В заключении, выражаю благодарность всем авторам научных работ и учебников, которые тоже благодарили других более ранних авторов научных книг и учебников, например, И.Ньютона.