

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна

Должность: проректор по учебной работе

Дата подписания: 03.09.2021 17:58:49

Уникальный программный ключ:

0b817ca911e6668abb13a5d426d70ef1e11ebbf73e943df4a4851fda56d089

## МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра космического приборостроения и систем связи

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по учебной работе  
(ЮЗГУ) Локтионова  
« 2 » \_\_\_\_\_ 2018 г.



## ТИПЫ ЛАЗЕРОВ

Методические указания  
по выполнению практической работы  
для студентов, обучающихся по специальности 10.05.02  
«Информационная безопасность телекоммуникационных систем»  
по дисциплине «Квантовая и оптическая электроника»

Курск 2018

УДК 004.716

Составители: А.А. Токарева, А. А. Гуламов

Рецензент

Доктор технических наук, профессор В.Г. Андронов

Типы лазеров: методические указания по подготовке и проведению практического занятия / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: А.А. Токарева А. А. Гуламов. - Курск, 2018. – с.28: ил. 18, табл. 1. – Библиогр.: с.13.

Методические указания по выполнению практической работы содержат теоретические сведения об основных типах лазеров и их использовании.

Полученные знания в результате проведения занятия дают возможность сформировать целостную картину представления об основных типах лазеров, их устройстве, принципах работы и применении.

Методические указания соответствуют требованиям рабочей программы дисциплины «Квантовая и оптическая электроника», утвержденной на заседании кафедры КПиСС по специальности 10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем».

Предназначены для студентов, обучающихся по специальности 10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем» по дисциплине «Квантовая и оптическая электроника», а также для студентов других направлений подготовки в области информационных технологий и систем связи.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано печать 02.10.18. Формат 60x841/16.

Усл. печ. л. 1,8. Уч.-изд. л. 1,63. Тираж 100 экз. Заказ. 2104 Бесплатно

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

## Содержание

1 Цели работы.....	4
2 Краткие теоретические сведения .....	4
2.1 Твердотельные лазеры.....	4
2.1.1 Рубиновый лазер .....	5
2.1.2 Неодимовый стеклянный лазер .....	6
2.1.3 Nd – АИГ – лазеры.....	7
2.1.4 Волоконные лазеры .....	8
2.1.5 Полупроводниковые лазеры .....	11
2.2 Газовые лазеры.....	12
2.2.1 He-Ne-лазер.....	12
2.2.2 Лазеры на парах металлов.....	14
2.2.3 Ионные лазеры .....	16
2.2.4 Молекулярные лазеры .....	17
2.2.5 Эксимерные лазеры .....	20
2.2.6 Газовые лазеры в инфракрасной области спектра .....	21
2.2.7 Химические лазеры.....	22
2.2.8 Газодинамические лазеры.....	25
2.2.9 Электроионизационные лазеры.....	26
2.3 Жидкостные лазеры .....	26
3 Задачи .....	29
4 Список рекомендуемой литературы .....	31

## 1 Цели работы

Получение навыков и умений в освоении дисциплины «Квантовая и оптическая электроника», в вопросе изучения основных типов лазеров, их устройства, принципов работы и применения.

## 2 Краткие теоретические сведения

Существует большое количество типов лазеров, классифицируемых по самым различным признакам – агрегатному состоянию рабочего вещества, рабочей длине волны, способу накачки, мощности излучения, режиму генерации и т.д. Рассмотрим основные типы лазеров, основываясь на классификации по агрегатному состоянию активной среды. С этих позиций можно выделить лазеры: твердотельные, газовые, включая газодинамические, химические и эксимерные, полупроводниковые, лазеры на красителях. Хотя полупроводниковые лазеры по агрегатному состоянию твердотельные, их целесообразно рассмотреть отдельно из-за специфики в механизмах генерации.

### 2.1 Твердотельные лазеры

Активными центрами в лазерах этого типа являются ионы, введенные в кристаллическую или аморфную матрицу. Среди лазерных материалов наиболее представительной является группа ионных кристаллов с примесями. Кристаллы неорганических соединений фторидов ( $\text{CaF}_2$ ,  $\text{LaF}_3$ ,  $\text{LiYF}_4$ ), оксидов ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и сложных соединений ( $\text{CaWO}_4$ ,  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ,  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ ) содержат в кристаллической решетке ионы активных примесей, редкоземельных (самария  $\text{Sm}_2^+$ , диспрозия  $\text{Dy}_2^+$ , тулия  $\text{Tm}_2^+$ ,  $\text{Tm}_3^+$ , празеодима  $\text{Pr}_3^+$ , неодима  $\text{Nd}_3^+$ , эрбия  $\text{Er}_3^+$ , гольмия  $\text{Ho}_3^+$ ), переходных (хрома  $\text{Cr}_3^+$ , никеля  $\text{Ni}_2^+$ , кобальта  $\text{Co}_2^+$ , ванадия  $\text{V}_2^+$ ) элементов или ионов урана  $\text{U}_2^+$ . Концентрация активных примесей в кристаллах составляет от 0,05 до нескольких процентов (по массе). Активные элементы (кристаллическая основа + активные ионы) изготавливаются в виде стержней с отполированными торцевыми поверхностями, с нане-

сенными зеркальными покрытиями и также с обработанной поверхностью для эффективного введения излучения накачки (таблица 1.1).

Таблица 1.1 Размеры коммерческих лазерных стержней

Материал	Длина, мм		Диаметр, мм	
	максимальная	типичная	максимальный	типичный
Рубин	300	100	25	10
Nd – стекло	1000	300	75	14
Nd – ИАГ	150	75	10	5

### 2.1.1 Рубиновый лазер

Рубиновый лазер был создан Т. Мейманом в 1960 году. Рабочим веществом является рубин - кристалл оксида алюминия  $Al_2O_3$  (корунд), в который при выращивании введена примесь - оксид хрома  $Cr_2O_3$ . Красный цвет кристалла рубина обусловлен излучением иона хрома  $Cr_3^+$ , который в кристаллической решетке замещает ион  $Al_2^+$ . Густота красного цвета рубина зависит от концентрации ионов  $Cr_3^+$ , в темно-красном рубине концентрация  $Cr_3^+$ , достигает 1%. Характерные концентрации ионов  $Cr_3^+$ , в рубине – 0.01 – 0.5%. Так как система  $Cr_3^+ : Al_2O_3$  работает по трехуровневой схеме, инверсия населенности достигается только при возбуждении 50% ионов  $Cr_3^+$ . Это приводит к высокому порогу генерации. В кристалле рубина имеются два узких энергетических уровня E1 и E'1 (рисунок 1), при переходе с которых на основной уровень атом излучает свет с длинами волн 694,3 нм и 692,8 нм. Ширина этих линий около 0,4 нм, вероятность вынужденных переходов для линии 694,3 нм больше, чем для 692,8 нм.

Рубиновые лазеры могут работать в импульсном или непрерывном режиме. Из-за низкого КПД (около 0.1%) рубиновый лазер непрерывного действия неэкономичен по сравнению с другими твердотельными лазерами непрерывного действия. При работе в импульсном режиме без модуляции добротности выходное излуче-

ние лазера состоит из повторяющихся пиков длительностью около 1 мкс с большой мощностью в максимумах.

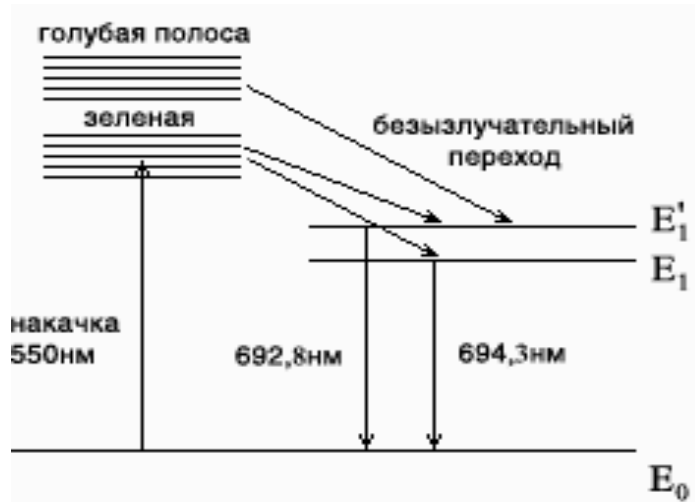


Рисунок 1 - схема энергетических уровней хрома в кристалле рубина

### 2.1.2 Неодимовый стеклянный лазер

Этот лазер излучает в ближайшем ИК-диапазоне ( $\lambda = 1.06$  мкм). В качестве активных ионов в стекло, используемое в качестве матрицы, вводят ионы  $Nd^{3+}$  с массовым содержанием 0.5 – 8%. Nd-лазер работает по четырехуровневой схеме. Поскольку нижний лазерный уровень почти не заселен, то этот тип лазеров обладает относительно низкой пороговой мощностью (200 Вт), в результате чего нетрудно осуществить непрерывный режим работы. Для оптической накачки преимущественно применяют стержневые импульсные лампы с эллиптическим отражателем и полупроводниковые лазерные диоды.

Из-за особой структуры активного вещества лазеры на неодимовом стекле лучше всего подходят для генерации пикосекундных импульсов в режиме синхронизации мод. В этом режиме достигнуты максимальные мощности  $10^{12} - 10^{13}$  Вт. Лазеры со стеклянной матрицей имеют ряд преимуществ – большие размеры стержней, простота изготовления, высокая оптическая однородность. В то же время по сравнению с ионными кристаллами стекла имеют низкую

теплопроводность и более высокий коэффициент термического расширения, что ограничивает сверху частоту повторения импульсов. Кроме неодима, лазеры на стекле могут быть активированы и другими редкоземельными ионами (иттербий, эрбий, гольмий, европий и др.). В стеклах из-за неоднородности локальных электростатических полей линия люминесценции 1,06 мкм сильно уширена (до 30 нм; неоднородное уширение). Сильное неоднородное уширение приводит к тому, что неодимовое стекло имеет меньшее усиление, а соответствующие лазеры - более богатую модовую структуру, чем гранат, активированный неодимом. Вместе с тем стекло допускает большее введение активных центров.

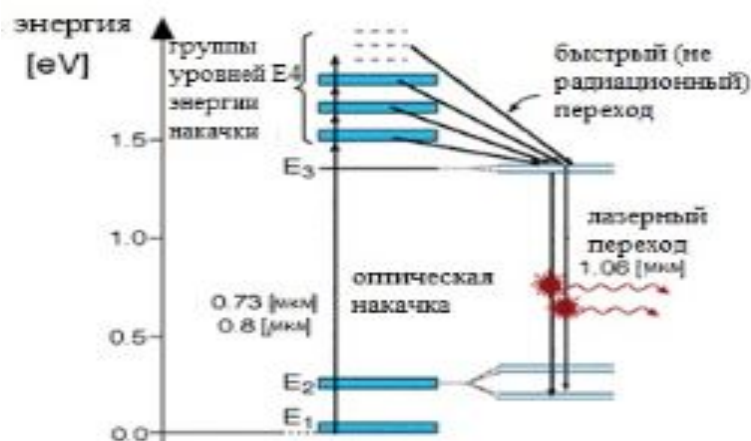


Рисунок 2 - диаграмма энергетических уровней неодимового лазера

### 2.1.3 Nd – АИГ – лазеры

В настоящее время лазер на алюмо-иттриевом гранате является важнейшим твердотельным лазером. Он характеризуется тем, что при относительно простой конструкции достигаются высокие мощности в импульсном режиме при высокой частоте следования импульсов (до 10 кГц) или даже в непрерывном режиме. Лазер работает по четырехуровневой схеме, поэтому имеет сравнительно низкую пороговую мощность накачки. Алюмо-иттриевый гранат является уникальным лазерным материалом, так как обладает высокой теплопроводностью, большой твердостью и хорошими опти-

ческими характеристиками. Кристалл граната является матрицей, которая может быть активирована перечисленными выше редкоземельными элементами. Физический принцип получения инверсии населенности в этом лазере совпадает с лазером на неодимовом стекле. Отличие заключается в использовании кристаллической матрицы ( $Y_3Al_5O_{12}$ ), а не аморфной (стекло). Активирование  $Y_3Al_5O_{12}$  ионами  $Nd_3^+$  составляет 0.5 – 3.5%.

### 2.1.4 Волоконные лазеры

Логическим развитием твердотельных лазеров стали волоконные лазеры, где в качестве систем накачки используются лазерные диоды. Эти источники были разработаны для телекоммуникационных систем волоконной связи, где они применяются в качестве усилителей сигналов. Представьте себе, что кристалл, в котором происходит генерация полезного лазерного излучения, как бы растянут на несколько десятков метров и представляет собой сердцевину волокна диаметром несколько микрон, которая находится внутри кварцевого волокна. Излучение диодов направляется в кварцевое волокно, и на всем его протяжении происходит оптическая накачка сердцевины.

Применение лазерного стекла в качестве активного элемента в твердотельных лазерах известно давно. В отличие от кристаллов, лазерные стекла имеют неупорядоченную внутреннюю структуру. Наряду со стеклообразующими компонентами  $SiO_2$ ,  $B_2O_3$ ,  $P_2O_5$ ,  $BeF_2$ , в них содержатся  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ,  $Li_2O$ ,  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $BaO$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Sb_2O_3$ . Активными примесями чаще всего служат ионы неодима  $Nd_3^+$ ; используются также гадолиний  $Gd_3^+$ , эрбий  $Er_3^+$ , гольмий  $Ho_3^+$ , иттербий  $Yb_3^+$ . Концентрация ионов неодима  $Nd_3^+$  в стеклах доходит до 6% (по массе).

Основой волоконных лазеров является активное волокно, то есть волокно, легированное редкоземельными элементами. Первые волоконные лазеры были созданы на кварцевых волокнах, легированных ионами неодима. Лазерное волокно длиной до нескольких десятков метров, как правило, состоит из двух волокон: центрального и внутреннего. Внутреннее волокно, содержащее активные



ионы (например, ионы иттербия), имеет диаметр несколько десятков мкм и находится внутри кварцевого (центрального) волокна диаметром 400-600 мкм. Внутренние стенки волокна покрыты светоотражающим слоем, поэтому движущийся поток квантов претерпевает многократное отражение.

Волоконный лазер является наилучшим преобразователем лазерной энергии, он эффективен, технологичен, имеет существенные преимущества перед другими лазерными установками и наивысший эффективный КПД. В последнее время волоконные лазеры активно вытесняют традиционные лазеры из таких областей применения лазерной техники, как, например, лазерная резка и сварка материалов, маркировка и обработка поверхностей, полиграфия и скоростная лазерная печать. Их используют в лазерных дальнометрах и трехмерных локаторах, аппаратуре для телекоммуникаций, в медицинских установках и других сферах промышленных и военных комплексов. Так же, как и в случае твердотельных неодимовых лазеров, в волоконных лазерах может использоваться эффект умножения частоты, позволяющей работать на второй и третьей гармониках.

Активной средой волоконных лазеров является стекловолоконно, легированного ионами редких элементов, таких как редкоземельные ионы неодима ( $Nd_3^+$ ), иттербия ( $Yb_3^+$ ), эрбия ( $Er_3^+$ ), тулий ( $Tm_3^+$ ), гольмий ( $Ho_3^+$ ) или празеодима ( $Pr_3^+$ ). Длины волн, излучаемые основными волоконными лазерами лежат в области 1,0-1,1 мкм у иттербиевых лазеров, 1,52-1,57 мкм у эрбиевых лазеров и 1,9-2,1 мкм у тулий-гольмий-легированных лазеров. На Рис. показаны упрощенные диаграммы энергетических уровней иттербия-, эрбий-, тулий-гольмия легированных активных сред. Из-за небольшой разницы квантовых уровней накачки и верхнего лазерного уровня (<10%) (а), вместе с трехуровневой схемой накачки, иттербий является одним из лучших легирующих материалов, в частности, для волоконных лазеров высокой и средней мощности.

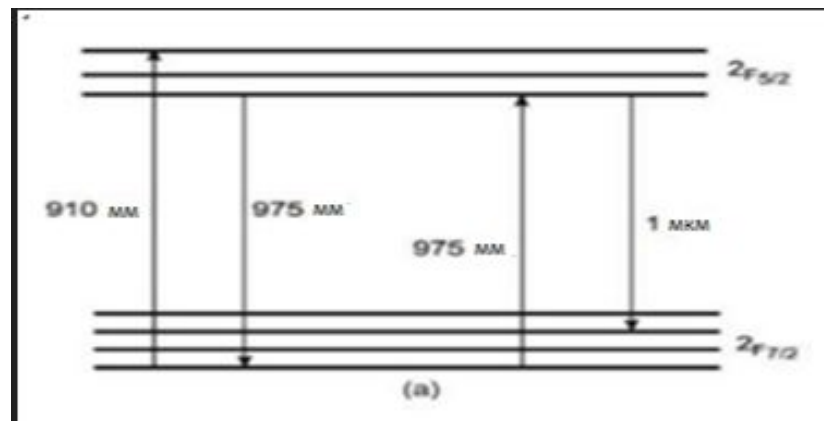


Рисунок 3 - диаграммы энергетических уровней: (а) иттербия

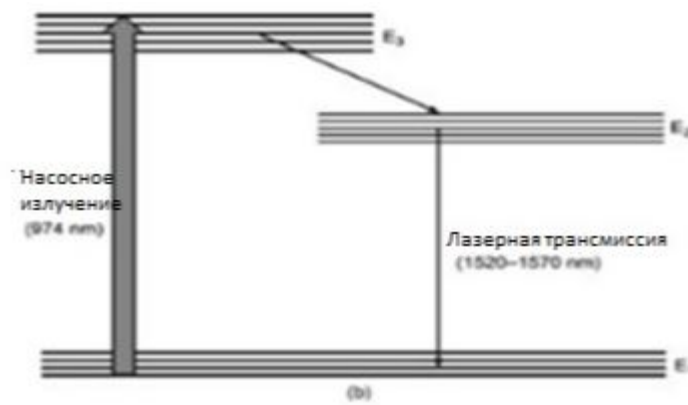


Рисунок 4 - диаграммы энергетических уровней: (b) эрбия

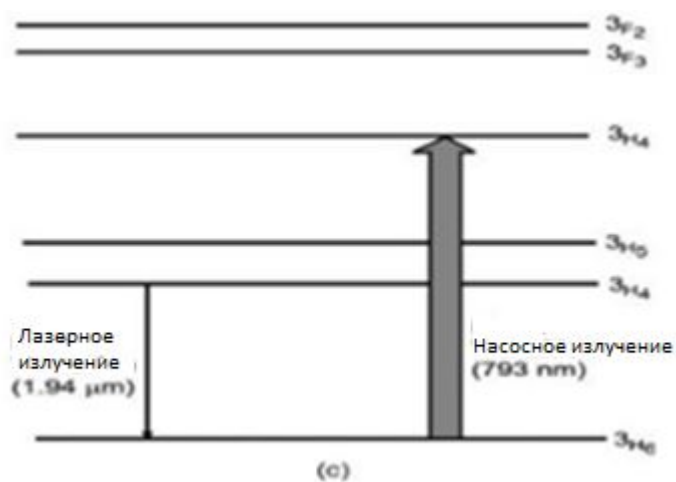


Рисунок 5 - диаграммы энергетических уровней: (с) тулия



Рисунок 6 - диаграммы энергетических уровней: (d) гольмия

### 2.1.5 Полупроводниковые лазеры

Полупроводниковые лазеры на кристалле GaAs были созданы в 1962 в лабораториях Р. Холла, М. И. Нейтена и Н. Холоньяка (США). Основным элементом полупроводникового лазера – рп переход. Действие лазера основано на том, что при прямом смещении электроны инжектируются в р-область, где происходит их излучательная рекомбинация с имеющимися там дырками. Для создания состояния с инверсией населенностей необходима большая концентрация дырок в валентной зоне, что достигается увеличением концентрации легирующей акцепторной примеси. Для того чтобы инжекция электронов в р-область превышала инжекцию дырок в п-область (где рекомбинация безизлучательная, а, следовательно, ток дырок в п-область целиком относится к потерям), необходимо, чтобы концентрация донорной примеси в п- области была выше концентрации акцепторной примеси в р- области. Таким образом, для получения состояния с инверсией населенностей в р-области необходима высокая степень легирования примесями обеих областей р-п-перехода. Инверсия населённости достигается при большой плотности прямого тока через диод (порог генерации соответствует плотности тока 1-4 кА/см<sup>2</sup>, а при пониженной температуре ~ 10<sup>2</sup> А/см<sup>2</sup>).

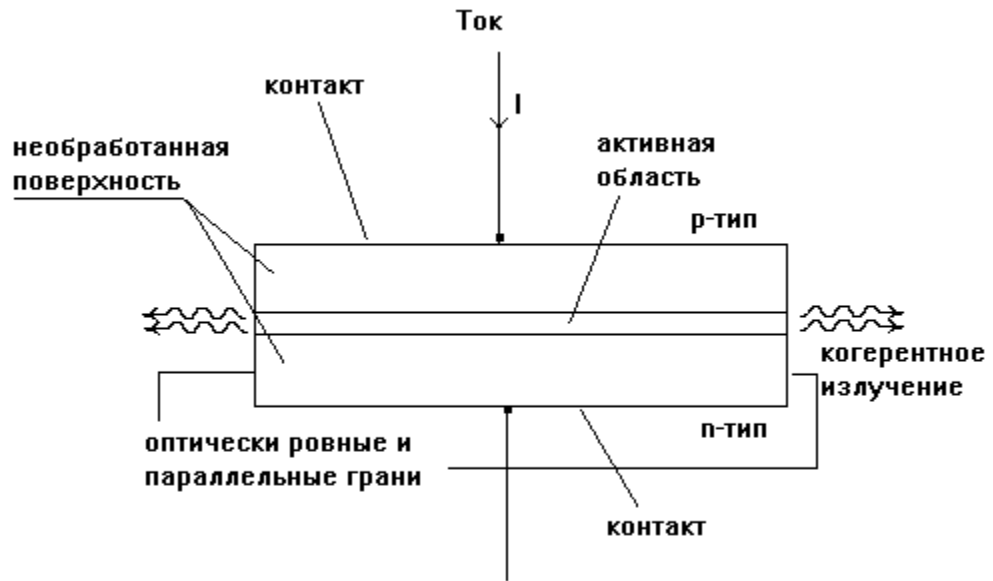


Рисунок 16 - схематическое изображение полупроводникового (инжекционного) лазера

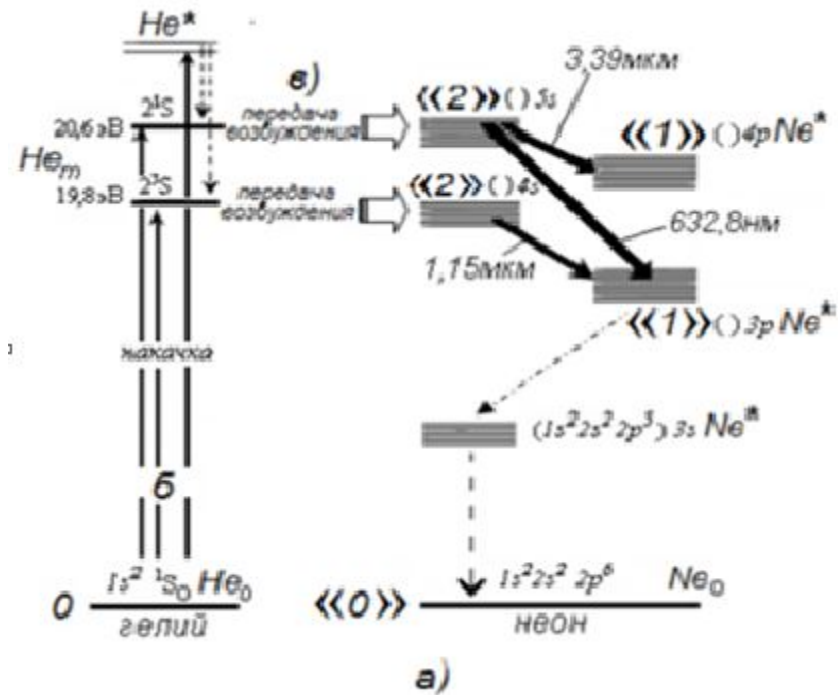
## 2.2 Газовые лазеры

В качестве активных сред для газовых лазеров пригодны все газообразные при комнатной температуре элементы, большое число элементов в парообразном состоянии (например, пары металлов), большое число молекул. При создании инверсии населенности широко используется ударное возбуждение излучающих состояний при столкновениях атомов и молекул с электронами в газовых разрядах и электронных пучках. При этом большую роль обычно играют ступенчатые процессы с участием метастабильных атомов и молекул. Для лазеров, работающих на колебательных переходах в молекулах, может быть использована химическая или газодинамическая накачка.

### 2.2.1 He-Ne-лазер

Самым распространенным лазером на атомных переходах является He-Ne-лазер. Этот лазер может работать в непрерывном ре-

жиме с малыми выходными мощностями. Он отличается небольшими размерами, простой и надежной конструкцией.



б)

Ударное возбуждение гелия в метастабильные состояния  $\text{He}_m$  при неупругом столкновении 1-го рода  $\text{He}$  с электроном плазмы ПС



б)

Передача возбуждения от  $\text{He}_m$   
атому  $\text{Ne}$

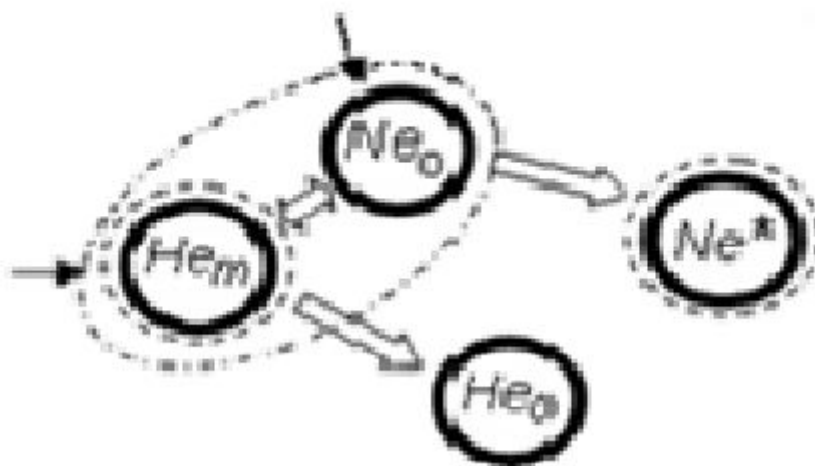


Рисунок 7 - диаграммы энергетических уровней гелия и неона («2» и «1»–верхние и нижние лазерные уровни неона соответственно, жирные стрелки–лазерные переходы в He-Ne лазере)

В He-Ne лазере возможна генерация на многочисленных переходах между электронными уровнями атома неона. Наиболее употребительны лазеры с длиной волны излучения 632,8 нм. Создание инверсной населенности происходит в электрическом газовом разряде, причем заселение верхних уровней в основном происходит за счет неупругих столкновений с метастабильными атомами гелия, которые возбуждаются при столкновениях с электронами.

### 2.2.2 Лазеры на парах металлов

Среди лазеров на переходах в атомах лазеры на парах металлов занимают важное место. Дело в том, что металлы обладают наиболее подходящей структурой энергетических уровней с точки зрения получения высокого квантового КПД. В качестве лазерного обычно используется переход из резонансного в метастабильное состояние. Такие лазеры могут работать только в импульсном режиме, так как время жизни нижнего состояния больше, чем верхне-

го, поэтому они получили название лазеров на самоограниченных переходах.

Впервые генерация на таких переходах была получена в парах марганца (зелёная и инфракрасная области спектра) и парах свинца (красная область спектра) в 1965 г. Несколько позже была получена генерация и в парах меди. Исследования этих, да и других, полученных впоследствии, генераций на самоограниченных переходах в парах различных металлов подтвердили все ожидаемые характеристики и особенности такого класса лазеров. Из них можно выделить следующие:

- Высокую эффективность генерации. Так коэффициент преобразования электрической энергии в световую для этих лазеров в десять раз выше, чем для таких широко известных лазеров как аргонный и гелий-неоновый.

- Сугубо импульсный характер генерации, что связано с метастабильностью нижнего уровня лазерного перехода. Обычно длительность импульсов излучения не превышает  $10^9$ - $10^{10}$  с.

- Жёсткие требования к системе импульсного питания таких лазеров, которая должна обеспечивать мощные высоковольтные наносекундные импульсы с крутизной нарастания тока  $10^9$ - $10^{10}$  А/с.

- Высокое (рекордное) усиление света активными средами этих лазеров. Обычно усиление столь велико, что мощное вынужденное излучение формируется активной средой либо только с одним зеркалом резонатора, либо совсем без зеркал. Усиление в линейном режиме может достигать величин 400-600 дБ/м. Поэтому требования на качество зеркал резонатора для этих лазеров существенно ниже, чем для всех других лазеров. Обычно в качестве выходного зеркала резонатора в этих лазерах используется прозрачная стеклянная пластинка с отражением 4- 8%.

В настоящее время получена генерация на парах многих металлов – меди, золота, свинца, марганца, таллия, висмута, железа, бария, кальция, стронция и других. Промышленное значение имеют в основном лазеры на парах меди и меди-золота. Лазеры на парах меди дают излучение в зеленой (510,6 нм) и желтой (578,2 нм) областях спектра. В присутствии паров золота появляется красная линия (627,8 нм), т.е. излучение лазера становится трехцветным. Та-

кие лазеры имеют среднюю мощность излучения до 20 ватт, а импульсную – до 200 киловатт при длительности импульса 20 – 30 нс.

### 2.2.3 Ионные лазеры

В ионных лазерах генерация осуществляется на электронных переходах в ионах. Из ионных лазеров наибольшее распространение получил аргоновый лазер, в котором генерация может происходить на нескольких длинах волн в диапазоне от 454 до 528 нм. Заселение верхнего лазерного уровня происходит при электронных ударах. Накачка осуществляется мощным дуговым разрядом для создания высокой степени ионизации. Нижний лазерный уровень обладает очень коротким временем жизни, что обеспечивает высокую инверсность населенности. Мощность аргоновых лазеров достигает 500 Вт в непрерывном режиме при КПД порядка 0,1%. Выпускаются также криптоновые лазеры и лазеры на смеси аргона с криптоном.

Инверсия населенностей между верхним (E4) и нижним (E3) рабочими уровнями создается следующим образом (рисунок 6). Уровень E4, имеющий по сравнению с уровнем E3 большее время жизни, заселяется ионами аргона за счет их столкновений с быстрыми электронами в газовом разряде и за счет переходов возбужденных ионов из группы расположенных выше уровней E5. В то же время уровень E3, обладающий очень коротким временем жизни (примерно в 25 раз меньше, чем время жизни уровня E4), быстро опустошается за счет возвращения ионов в основное состояние. Так как уровни E3 и E4 состоят из групп подуровней, генерация может происходить одновременно на нескольких длинах волн: от 0,45 до 0,53 мкм.



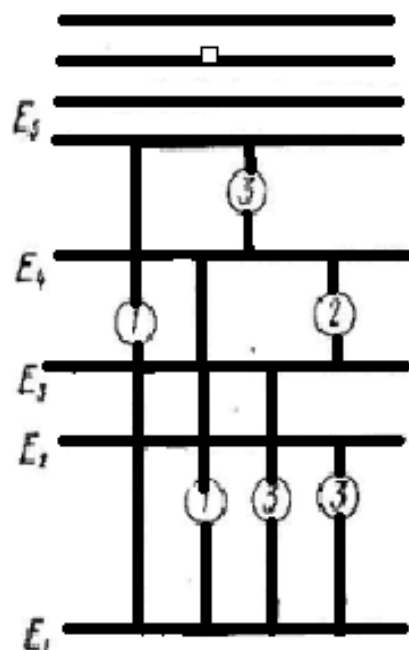


Рисунок 8 - диаграмма энергетических уровней ионизированного аргона: 1 - возбуждение при столкновениях с электронами; 2 - лазерное излучение с длиной волны 0,45 мкм; 3 - спонтанные переходы.

#### 2.2.4 Молекулярные лазеры

Генерация лазерного излучения была получена на большом количестве молекул и их излучение охватывает ультрафиолетовый, видимый и инфракрасный диапазон спектра. Рассмотрим некоторые наиболее часто используемые типы молекулярных лазеров.

Газовые лазеры в УФ-диапазоне ( $N_2$  и  $H_2$  лазеры). Азотный лазер является высокомоощным лазером с коротким временем нарастания импульса и высокой частотой следования импульсов. Вследствие неблагоприятного соотношения вероятностей радиационного распада рабочих уровней молекулы азота инверсию, т.е. генерацию на рассматриваемых переходах можно получить только в нестационарном (импульсном) режиме на фронте импульса возбуждения. Таким образом, азотный лазер, является лазером на самоограниченных переходах.

К настоящему времени разработаны и успешно выпускаются импульсно-периодические азотные лазеры с продольным возбуж-

дением. Благодаря своим уникальным характеристикам (короткой длине волны, малой длительности импульса (порядка 10 нс.), высокой импульсной мощности излучения азотные лазеры широко и эффективно применяются в микроэлектронике и при изготовлении и ретушировании фотошаблонов, гибридных интегральных микросхем и пленочных резисторов, их подгонке. Для достижения высоких энергий в импульсе требуется большая электрическая мощность возбуждения. Благодаря очень быстрому усилению в активной среде, из-за чего вся инверсная населенность снимается в один проход,  $N_2$ -лазер может работать без резонатора. Рабочая длина волны азотного лазера составляет 337,1 нм. Возможна также генерация на длинах волн 315,9 нм и 357,7 нм.

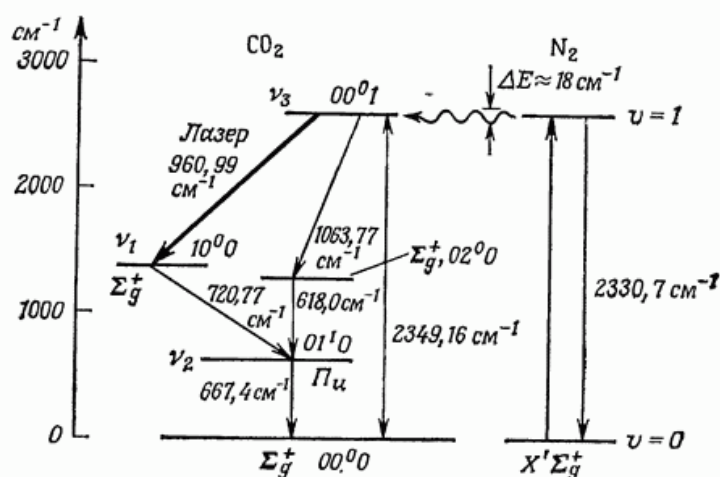


Рисунок 9 - схема нижних энергетических уровней молекулы  $CO_2$  с указанием излучательных и лазерных переходов

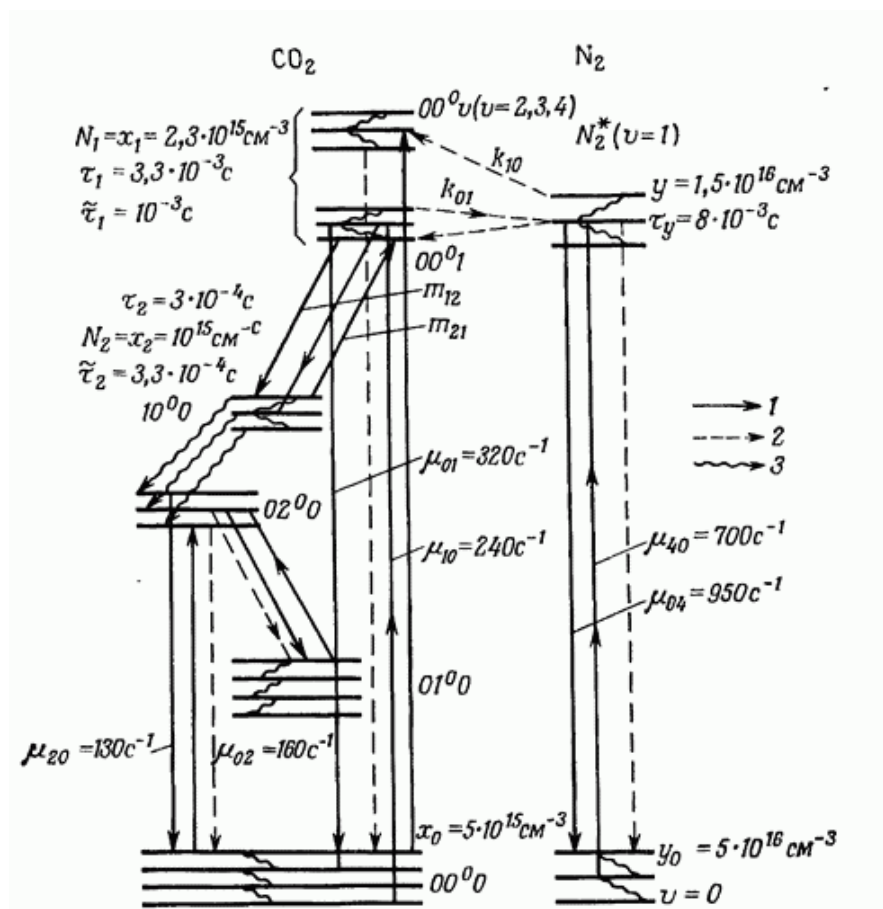


Рисунок 10 - детали структуры нижних энергетических уровней молекулы  $\text{CO}_2$  (и некоторых уровней вспомогательного газа  $\text{N}_2$ )

Сплошными линиями указано электронное возбуждение, штриховыми - колебательная релаксация, волнистыми — вращательная релаксация,  $x_0$ ,  $x_1$ ,  $x_2$  — населенности уровней молекулы  $\text{CO}_2$ ,  $y_0$  и  $y$  — молекулы  $\text{N}_2$   $\tau$  и  $\tau$  эффективные и собственные времена жизни состояния с учетом релаксации в смеси,  $\mu_{ij}$  — вероятности прямых и обратных процессов возбуждения,  $m_{12}$  и  $m_{21}$  — вероятности переходов в результате неупругих соударений с электронами и молекулами газа,  $k_{10} \approx k_{01} \approx 0,75 \times 10^{-14} \text{ cm}^3/\text{c}$  — постоянная, характеризующая частоту неупругих соударений  $\text{CO}_2$  с  $\text{N}_2^* (v = 1)$ .

### 2.2.5 Эксимерные лазеры

Класс импульсных газовых лазеров, объединенных названием "эксимерные", возник сравнительно недавно. Лазеры этого класса работают на переходах между двумя термами молекулы, нижний из которых является отталкивательным и составлен обычно из атомов в основном состоянии. Верхний терм лазерного перехода имеет потенциальный минимум. Такие молекулы существуют только в возбужденном состоянии, откуда и происходит название этого типа лазеров. Особенности работы этого лазера состоят в следующем.

В результате процессов в возбужденном газе образуется эксимерная молекула в электронно-возбужденном состоянии на некотором колебательном уровне. Линия излучения такой молекулы относительно широка. Ширина линии испускания перехода в эксимерном лазере на несколько порядков превышает значение этой величины для других типов лазеров.

Таким образом, сечение индуцированного излучения для перехода в эксимерном лазере весьма мало и этот лазер может работать только при относительно высокой интенсивности накачки. Поэтому существующие эксимерные лазеры работают только в импульсном режиме. По той же причине эксимерные лазеры появились значительно позже других типов лазеров.

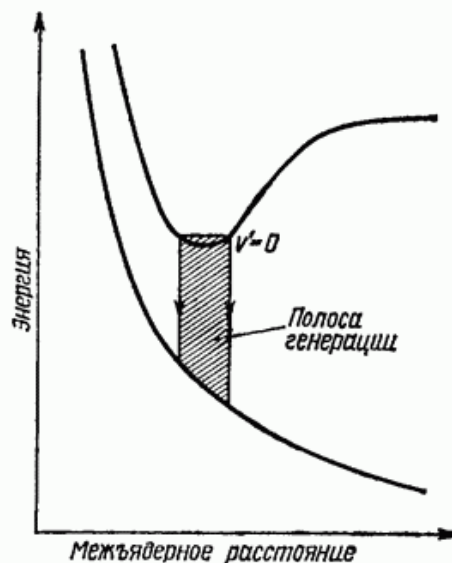


Рисунок 11 - энергетические уровни эксимерного лазера

## 2.2.6 Газовые лазеры в инфракрасной области спектра

Эти газовые лазеры наряду с характерными для всех газовых лазеров свойствами характеризуются, прежде всего, незначительной шириной линии и ограниченными возможностями перестройки при высокой мощности. Вынужденное излучение в ИК-области спектра можно получить на переходах между:

- колебательно-вращательными уровнями молекул в основном электронном состоянии в средней и дальней ИК- области (HF-, CO-, CO<sub>2</sub>-лазеры, H<sub>2</sub>O-, SO<sub>2</sub>-лазеры);

- вращательными уровнями в основном электронном состоянии в дальней ИК-области (HF-, CH<sub>3</sub>F-лазеры).

CO<sub>2</sub> - молекулярные газовые лазеры

Одним из важнейших типов газовых лазеров, излучающих в инфракрасной области, является CO<sub>2</sub>-лазер. В этих генераторах используется смесь газов CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> и He. Генерация происходит на переходе между двумя колебательными уровнями молекулы CO<sub>2</sub>, а N<sub>2</sub> и He служат для повышения КПД. Эти лазеры сейчас являются одними из самых мощных (примерно 80 кВт) и наиболее эффективных (КПД ~ 15 - 20%). Длины волн генерации составляют 10,6 и 9,4 мкм.

На рисунке 10 приведена схема энергетических уровней основных электронных состояний молекулы CO<sub>2</sub>. Эта молекула имеет три невырожденные колебательные моды:

- 1) симметричную валентную (u1),
- 2) деформационную (u2),
- 3) асимметричную валентную (u3).

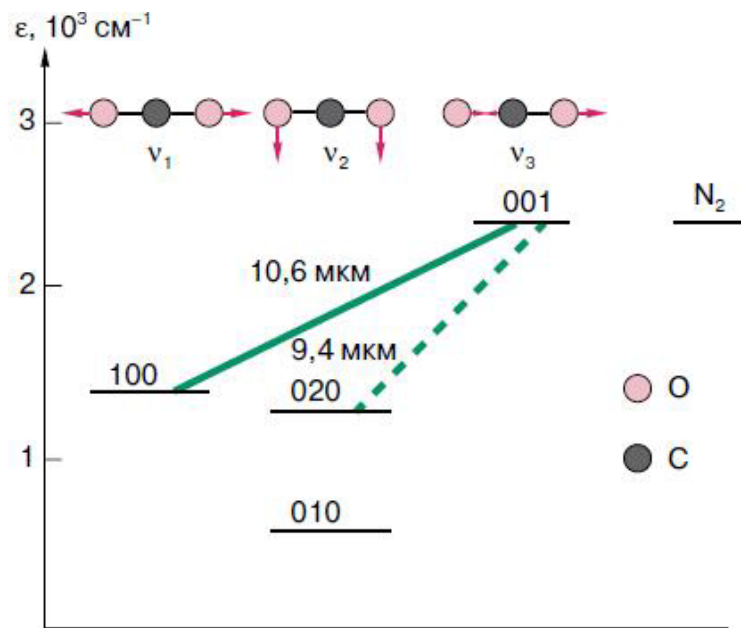


Рисунок 12 - схема энергетических уровней основных электронных состояний молекул  $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2$ , участвующих в генерации лазерного излучения (Рисунок 10)

### 2.2.7 Химические лазеры

Инверсия населенности уровней обусловлена неравновесным распределением энергии химической реакции по степеням свободы молекул продукта. Для создания химических лазеров используют реакции, скорость которых превышает скорость установления равновесного распределения выделяющейся энергии. Как правило, это реакции с участием химически активных атомов или радикалов. Среди них особое место занимают цепные и разветвленные цепные реакции, в которых химически активные центры (атомы и свободные радикалы) воспроизводятся (в разветвленных реакциях - размножаются) в ходе реакции. Для создания некоторого начального числа активных центров (инициирования цепной реакции) необходимо затратить энергию. Поэтому чем больше длина цепи реакции, тем большее количество химической энергии переработается в лазерное излучение и тем меньшую роль будут играть затраты энергии на создание активных центров. При этом решающее значение имеет хемолазерная длина цепи, определяемая как отношение скорости продолжения цепи к скорости релаксации возбужденных мо-

лекул, используемых для генерации когерентного излучения (но не к скорости гибели активных центров). Чем больше хемолазерная длина цепи, тем выше эффективность лазера по отношению к затратам энергии на инициирование реакции. Начальная концентрация активных центров может быть создана с помощью нехимических видов энергии либо чисто химическим способом, например, в результате термодиссоциации молекул газовой смеси, нагреваемой до высокой температуры за счет энергии протекающей в ней химической реакции, или путем использования разветвленной цепной реакции.

На рисунке 13 показана схема фтор-водородного лазера с нехимическим инициированием.

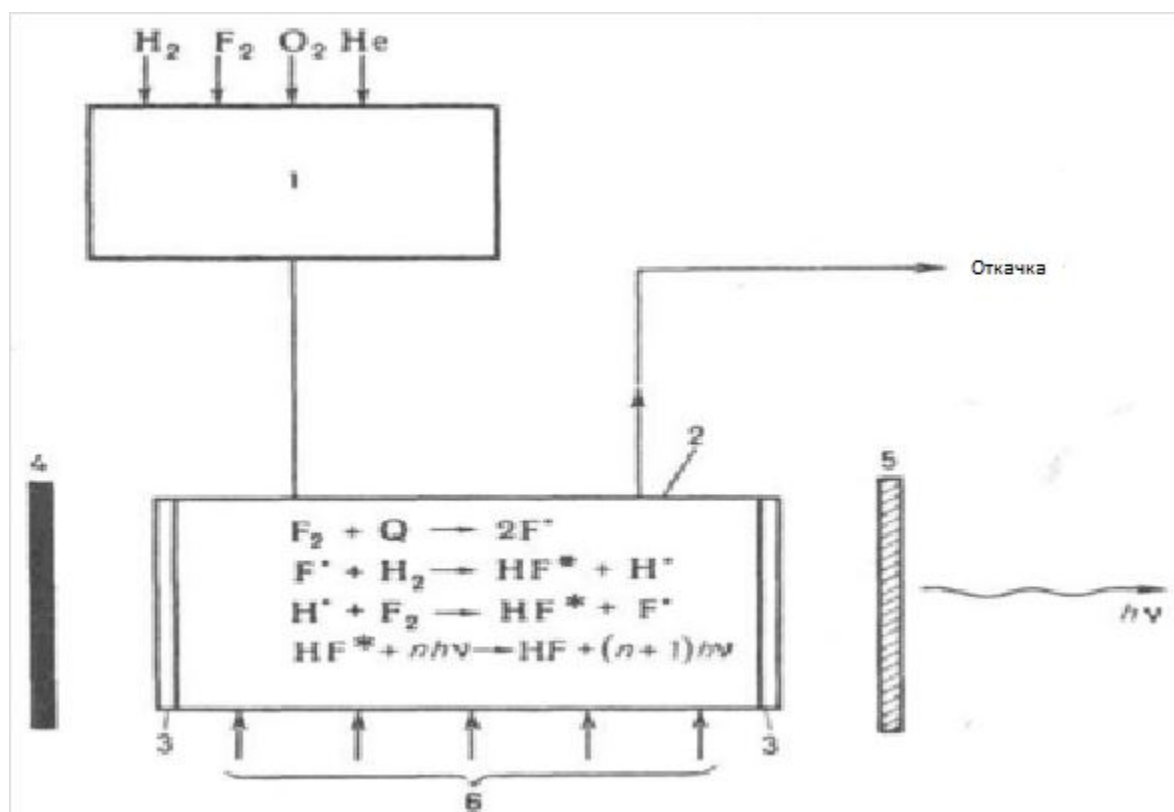


Рисунок 13 - схема фтор-водородного лазера с нехимическим инициированием: 1 - смеситель; 2 - активная зона (реактор); 3 - окна для выхода излучения; 4 и 5 - зеркала (непрозрачное и частично отражающее); 6 - иницирующий агент Q (УФ излучение или пучок электронов)

Из смесителя 1 рабочая смесь поступает в реактор 2, где под действием УФ облучения или пучка электронов (иницирующий

агент) инициируется быстрая молекулярно-радикальная реакция, высвобождающая запасенную в смеси энергию в виде короткого импульса когерентного излучения. При одной и той же степени инициирования чем больше хемолазерная длина цепи реакции, тем выше энергия лазерного импульса.

Наиболее употребительны смеси, содержащие молекулярные фтор и водород (дейтерий), стабилизированные кислородом. Эти смеси обладают наибольшей хемолазерной цепью. Генерирующими молекулами в них являются колебательно-возбужденные  $\text{HF}^*$  ( $\text{DF}^*$ ). На рисунке 14 представлена схема химического лазера с чисто химическим способом инициирования, работающего на основе не цепной реакции атомарного фтора с молекулярным водородом (или дейтерием).

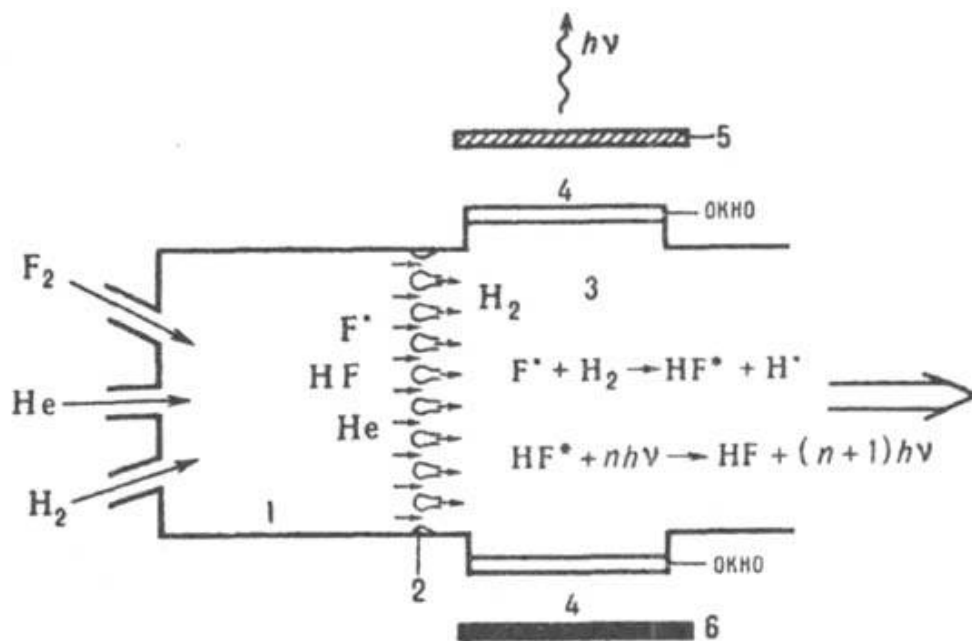


Рисунок 14 - схема фтор-водородного лазера с химическим инициированием (термодиссоциацией); 1 - камера сгорания; 2 сопловый блок; 3 активная зона (реактор); 4 - окна для выхода излучения; 5 и 6 – зеркала



### 2.2.8 Газодинамические лазеры

Активное вещество газодинамического лазера представляет собой смесь азота и двуокиси углерода. Инверсная населенность энергетических уровней в этом лазере создается за счет дифференцированной колебательной релаксации, вызываемой столкновением молекул в процессе сверхзвукового расширения газа. Согласно теоретическим расчетам, газодинамические лазеры способны создавать непрерывное лазерное излучение мощностью в несколько сотен тысяч киловатт в области инфракрасного излучения.

В газодинамическом лазере применяется тепловая накачка за счет сгорания окиси углерода и реактивный принцип истечения активного вещества. Лазерная камера напоминает по внешнему виду камеру сгорания реактивного двигателя. Она снабжена сужающимся и расширяющимся соплом, назначение которого состоит в получении за соплом пониженных температур и давления газа в целях создания инверсной населенности энергетических уровней.

Принцип работы газодинамического лазера основан на расширении газовой смеси и резком снижении ее температуры и давления за время, гораздо меньшее, чем это требуется для протекания процессов колебательной релаксации верхнего энергетического уровня лазерной системы.

Принцип действия газодинамических лазеров на углекислом газе показан на рисунке 15.

В смесительной камере 1 лазера находится смесь нагретых газов (углекислого газа – 75%, азота – 22% и водяных паров – 3%).

Поскольку в процессе генерации газовая смесь должна постоянно истекать из камеры, то для такого истечения газов могут быть использованы различные способы, и в частности нагревание в газообменном аппарате, сжигание соответствующего топлива и т.д.

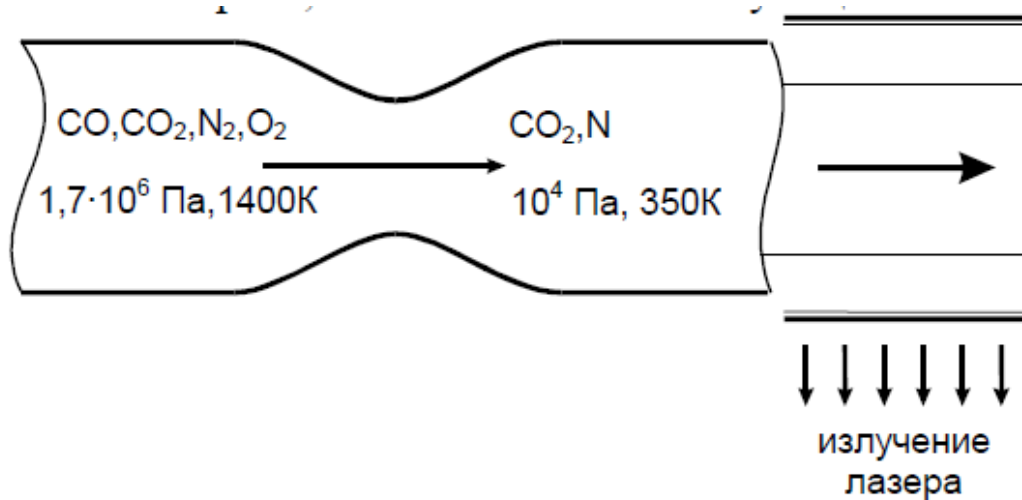


Рисунок 15 - схема газодинамического лазера на молекулах  $\text{CO}_2$

### 2.2.9 Электроионизационные лазеры

Накачка в таком лазере создается с помощью электронного пучка высокой энергии ( $>100 \text{ кэВ}$ ), вводимого в активную среду через тонкую алюминиевую фольгу. В качестве активной среды обычно используется смесь азота и углекислого газа. В этих лазерах достигается очень высокая энергия в импульсе при КПД до 50%.

### 2.3 Жидкостные лазеры

В жидкостных лазерах вынужденное излучение возникает на флуоресцентном переходе в молекулах органического красителя. Концентрация красителя составляет  $0,005 - 0,0001 \text{ моль/л}$ . Используются такие красители, как кумарен, родамины и др. Электронные состояния красителей имеют многочисленные колебательные и вращательные уровни, которые за счет взаимодействия друг с другом и соседними молекулами (растворителя) так сильно уширены, что переходы между электронными состояниями в спектре флуоресценции образуют широкие полосы. Создание инверсии населенностей происходит с помощью оптической накачки. В качестве

мощного источника света используют либо импульсные лампы, либо лазеры (азотные, Nd- ИАГ, ионные, полупроводниковые).

Лазеры на красителях генерируют электромагнитное излучение в спектральном диапазоне от 0,32 до 1,22 мкм. КПД этих лазеров порядка 1%. Обычно жидкостные лазеры работают в импульсном режиме. Наиболее важным свойством лазеров на красителях является возможность перестройки частоты излучения в широких пределах (с одним красителем несколько десятков нм). Более широкая перестройка частоты может осуществляться изменением состава, концентрации и температуры раствора.

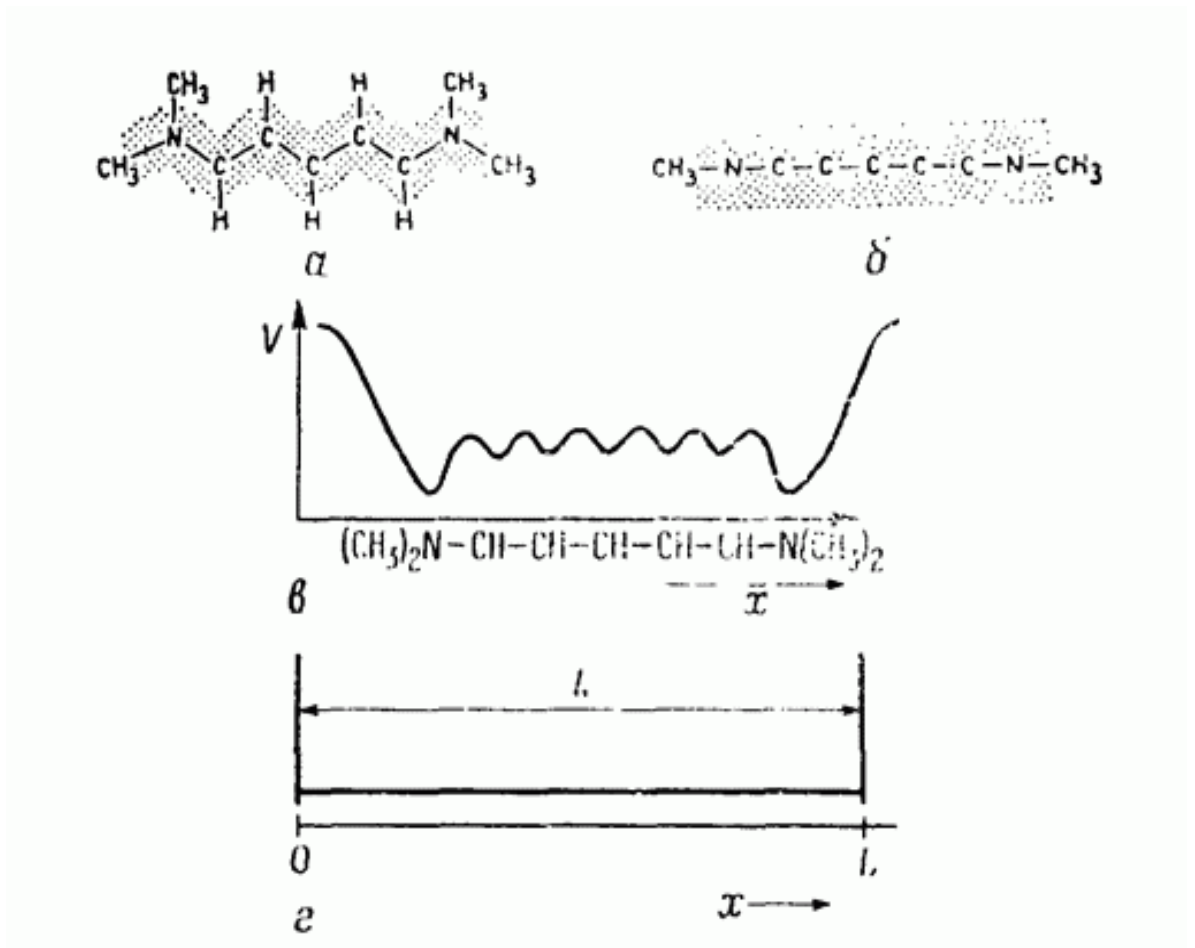


Рисунок 17 - иллюстрация модели свободных электронов, объясняющей структуру электронных энергетических уровней молекулы красителя

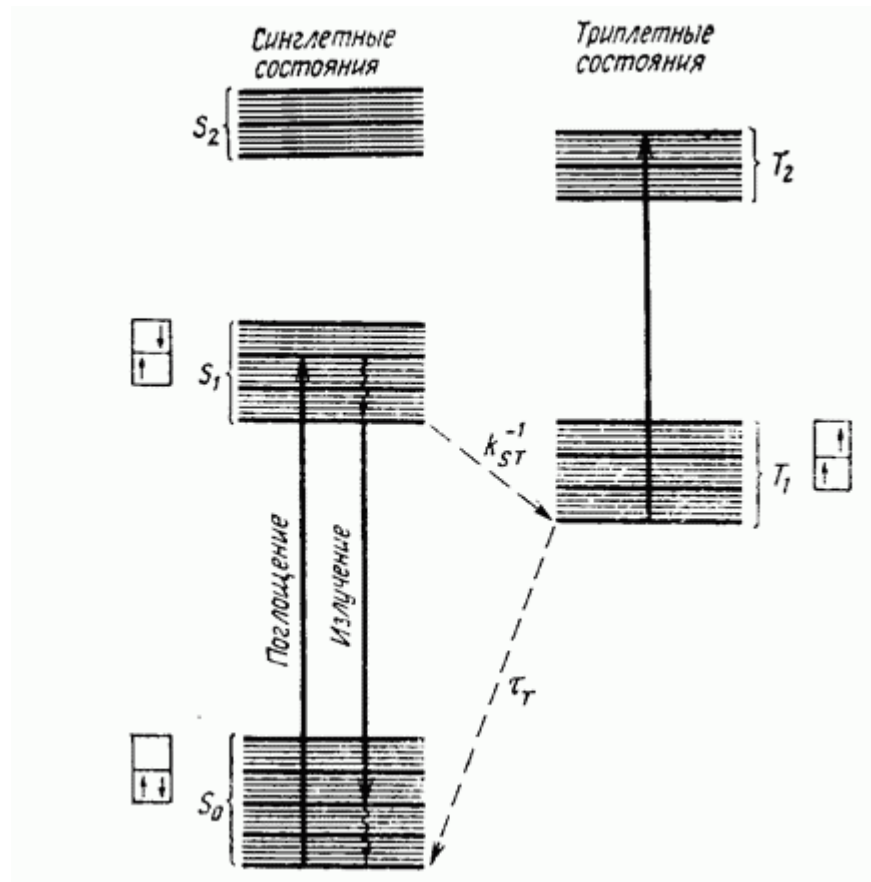


Рисунок 18 - типичная схема энергетических уровней красителя в растворе

### 3 Задачи

1. Пучок лазерного излучения с длиной волны  $0,33 \text{ мкм}$  используют для нагревания  $1 \text{ кг}$  воды с удельной теплоемкостью  $4200 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$ . За какое время вода нагреется на  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ , если лазер ежесекундно испускает  $10^{20}$  фотонов, и все они поглощаются водой?

2. На плоскую поверхность тонкой плосковыпуклой положительной линзы нанесено абсолютно отражающее покрытие. На выпуклую поверхность этой линзы падает узкий пучок импульсного лазерного излучения с энергией  $W = 4 \text{ Дж}$  и длительностью импульса  $\tau = 10^{-8} \text{ с}$ . Падающий пучок распространяется параллельно главной оптической оси линзы на расстоянии  $F/(2\sqrt{3})$  от оси ( $F$  – фокусное расстояние линзы). Найдите величину средней силы, действующей на линзу со стороны света, если половина энергии лазерного излучения поглощается в линзе. Отражением от поверхности линзы (без покрытия) можно пренебречь.

3. Лазер излучает световые импульсы с энергией  $W = 0,1 \text{ Дж}$ . Частота повторения импульсов  $\nu = 10 \text{ Гц}$ . Коэффициент полезного действия лазера, определяемый как отношение излучаемой энергии к потребляемой, составляет  $\eta = 0,01$ . Какой объем воды  $V$  нужно пропустить за время  $\tau = 1 \text{ час}$  через охлаждающую систему лазера, чтобы вода нагрелась не более, чем на  $\Delta t = 10^\circ\text{C}$ ? Удельная теплоемкость воды  $c = 4,2 \text{ Дж/(г}\cdot\text{К)}$ , плотность воды  $\rho = 1 \text{ г/см}^3$ .

4. Лазерный усилитель представляет собой кювету, заполненную усиливающей свет средой (про такую среду говорят, что она обладает инверсной заселенностью). На вход лазерного усилителя падает лазерное излучение с мощностью  $P_1 = 1 \text{ кВт}$ . Мощность лазерного излучения на выходе из усилителя оказывается равной  $P_2 = 10 \text{ МВт}$ . Найти силу, которую нужно прикладывать к усилителю, чтобы удерживать его в неподвижном положении.

5. Шар радиуса  $R$  из вольфрама, покрытый тонким слоем цезия, освещают аргоновым лазером, излучающим на длине волны  $\lambda_1$ . Какой заряд приобретет шар, если красная граница для Cs на  $W$  составляет  $\lambda_2$ ?

6. Пучок лазерного излучения мощностью  $W = 100$  Вт падает на непрозрачную пластинку под углом  $\alpha = 30^\circ$ . Пластинка поглощает 60 % падающей энергии, а остальную энергию зеркально отражает. Найдите абсолютную величину силы, действующей на пластинку со стороны света. Скорость света  $c = 3 \times 10^8$  м/с.

7. Терапевтический гелий-неоновый лазер, работающий в непрерывном режиме, даст излучение монохроматического света с длиной волны  $\lambda = 630$  нм, развивая мощность  $P = 40$  мВт. Сколько излучает лазер за 1 с?

8. При удалении полипа хирургическим путем используется луч гелий-неонового лазера мощностью  $N = 10$  мВт, сфокусированного на пятне диаметром  $d = 0,4$  мм. Лазер дал вспышку продолжительностью  $t = 1$  с. Определить энергию вспышки и плотность мощности ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) на пятне. Во сколько раз усиливается излучение, если коэффициент усиления составляет а) 0,1 дБ, б) 1 дБ, в) 10 дБ.

9. Определить диапазон скоростей сканирования  $V_{\text{ск}}$  пучка излучения непрерывного лазера при фокусировке его излучения в пятно диаметром 100 мкм, при которых время эффективного воздействия находится в диапазоне  $10^{-3} - 10^{-9}$  с.

10. Лазер, работающий в импульсном режиме, потребляет мощность 1 кВт. Длительность 1 импульса 5 мкс, а числа импульсов в 1 с равно 200. найти излучаемую энергию и мощность одного импульса, если на излучение идет 0,1% потребляемой мощности.

#### 4 Список рекомендуемой литературы

- 1) В.И. Светцов. Оптическая и квантовая электроника: учебное пособие, 2-е издание - Иваново: ИГХТУ, 2010. - 197с.
- 2) А.Н. Пихтин. Оптическая и квантовая электроника - М.: Высшая школа, 2001. - 573с
- 3) Складов, Олег Константинович. Волоконно-оптические сети и системы связи [Текст]: учебное пособие / О. К. Складов. - 2-е изд., стер. - СПб. : Лань, 2010. - 272 с.