

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»**

## **ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

*Методические указания к практическим занятиям*

Самара 2016

УДК 621.373.8

Составители: В.П. Захаров, Д.Н. Артемьев

**Основы квантовой электроники:** Метод. указ. к практическим работам/ Самар. нац. исследов. ун-т.; сост. В.П. Захаров, Д.Н. Артемьев; Самара, 2016. 44 с.

Методические указания, составленные в соответствии с программой курса «Основы квантовой электроники», содержат основные разделы квантовой электроники с позиций компетентностного подхода к их изучению: краткие теоретические сведения подкреплены примерами решений и сопровождаются большим количеством задач для самостоятельной работы студентов. В первом разделе кратко изложены физические основы взаимодействия лазерного излучения с веществом: вынужденные и спонтанные переходы, форма и ширина спектральной линии, усиление, коэффициенты Эйнштейна. В дальнейших 3-х разделах рассмотрены вопросы, относящиеся к устройствам работы лазера и их типам: оптические резонаторы, характеристики лазерного излучения и основные типы лазеров.

Методические указания подготовлены на кафедре лазерных и биотехнических систем Самарского университета и предназначены для студентов дневного отделения, обучающихся по специальности 12.03.05 «Лазерная техника и лазерные технологии» по дисциплине «Основы квантовой электроники».

Ил. 6. Библиогр. 6 назв.

Рецензент: Кренц А.А., к.ф.-м.н., доцент кафедры физики

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ .....	6
Задачи с решениями .....	10
Задачи для самостоятельной работы.....	12
2. УСТРОЙСТВО РАБОТЫ ЛАЗЕРА .....	14
Задачи с решениями .....	23
Задачи для самостоятельной работы.....	24
3. СВОЙСТВА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	26
Задачи с решениями .....	31
Задачи для самостоятельной работы.....	32
4. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ЛАЗЕРОВ .....	34
Задачи с решениями .....	38
Задачи для самостоятельной работы.....	39
5. СПИСОК ТЕМ ДЛЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ДОКЛАДОВ.....	40
6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	41
7. ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ .....	42
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ.....	43

## ВВЕДЕНИЕ

Квантовая электроника – это область науки и техники, исследующая и применяющая методы усиления и генерации электромагнитного излучения, основанные на использовании вынужденного излучения. Вынужденное (индуцированное) излучение возникает в результате согласованного по частоте и направлению почти одновременного испускания электромагнитных волн огромным количеством атомов и молекул под действием внешнего электромагнитного поля. Вынужденное излучение может происходить в диапазонах радиоволн, инфракрасного излучения, видимого света и УФ излучения.

Исторически первыми генераторами индуцированного излучения являлись генераторы в СВЧ-диапазоне (1954 – 55 гг.). Такие приборы получили название «мазер» (MASER – Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Следующий, естественный для развития квантовой электроники шаг был сделан в направлении освоения коротковолнового, оптического диапазона. В августе 1960 г. Теодор Мейман (США) впервые наблюдал импульсную генерацию когерентного излучения с  $\lambda = 0,69$  мкм в кристалле рубина. Созданный им прибор, названный лазером (LASER – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), открыл новую эру в развитии квантовой электроники. 60-е годы XX века ознаменовались бурным поиском новых лазерных активных сред. Примерно за десять лет была получена генерация в большинстве известных активных средах и перекрыт диапазон длин волн генерации от инфракрасного (ИК) до ультрафиолетового (УФ). С появлением лазера наука и техника получили в свое распоряжение качественно новый источник оптического излучения, характеризующийся огромной яркостью, высокой степенью направленности, монохроматичности и когерентности.

Методические указания к практическим занятиям составлены в соответствии с рабочей программой дисциплины «Основы квантовой электроники». Они содержат краткие теоретические сведения, необходимые для правильного понимания физической сущности

исследуемых явлений и предназначены для оказания помощи студентам в подготовке к практическим занятиям. В разделах «Задачи с решениями» в первую очередь были отобраны те задачи, ознакомление с предлагаемыми решениями которых (как и в случае с типовыми задачами) будет способствовать лучшему пониманию и усвоению учебного материала. В конце каждой главы приведены формулировки задач для самостоятельного решения, а также список рекомендуемой учебной литературы. Сформулирован список тем докладов, которые способствуют для самостоятельного анализа студентами литературы по одной из представленных тем. Предложенные задания направлены на освоение компетенций ОПК-1 (способность представлять адекватную современному уровню знаний научную картину мира на основе знания основных положений, законов и методов естественных наук и математики), ОПК-2 (способность осуществлять поиск, хранение, обработку и анализ информации из различных источников и баз данных, представлять ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий) и ОПК-3 (способность выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения физико-математический аппарат).

# 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

В квантовых системах, обладающих дискретными уровнями энергии, существуют три типа переходов между энергетическими состояниями: переходы, индуцированные электромагнитным полем, спонтанные переходы и безызлучательные релаксационные переходы.

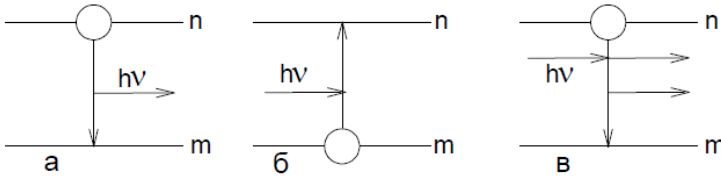


Рисунок 1- Квантовые переходы при взаимодействии с фотоном: а - спонтанный переход с испусканием фотона; б - вынужденный переход с поглощением фотона; в - вынужденный переход с испусканием фотона.

Рассмотрим переходы частицы из одного состояния в другое с выделением или поглощением энергии электромагнитного поля. Возбужденная частица в произвольный момент времени может самопроизвольно перейти в более низкое энергетическое состояние, излучив при этом квант света. Такое излучение называется спонтанным. Скорость спонтанного перехода с уровня  $n$  на уровень  $m$  определяется выражением:

$$\frac{dN_n}{dt} = A_{nm}N_n,$$

где  $N_n$  - концентрация частиц на уровне  $n$ . Коэффициент  $A_{nm}$  есть вероятность перехода или коэффициент Эйнштейна для спонтанного излучения. Величина, обратная  $A_{nm}$ , называется спонтанным временем жизни.

Значение коэффициента Эйнштейна для спонтанных переходов в оптическом диапазоне может изменяться от  $10^8 \text{ с}^{-1}$  для разрешенных переходов до  $1 \text{ с}^{-1}$  для запрещенных переходов. Случайность спонтанных переходов приводит к тому, что различные атомы излучают независимо и несинхронно. Поэтому спонтанное излучение ненаправленно, некогерентно, неполяризовано и немонохроматично.

Такое естественное излучение испускают все обычные источники света.

Другим оптическим процессом является поглощение излучения частицей, переходящей в результате этого в возбужденное состояние. Скорость поглощения:

$$\frac{dN_m}{dt} = -B_{mn}\rho(\nu)N_m,$$

где  $B_{mn}$  - коэффициент Эйнштейна для вынужденного поглощения,  $\rho(\nu)$  - спектральная плотность излучения,  $N_m$  - концентрация частиц на уровне  $m$ . Однако эти два процесса не объясняют всех закономерностей взаимодействия излучения со средой.

При взаимодействии возбужденной частицы с фотоном возможен переход частицы в состояние с меньшей энергией - при этом излучается дополнительный фотон. Этот процесс носит название вынужденного или стимулированного излучения. Скорость этого процесса:

$$\frac{dN_n}{dt} = -B_{nm}\rho(\nu)N_n,$$

где  $B_{nm}$  - коэффициент Эйнштейна для вынужденного излучения,  $\rho(\nu)$  - спектральная плотность излучения,  $N_n$  - концентрация частиц на уровне  $n$ . Произведение  $B_{nm}\cdot\rho(\nu)$  имеет размерность, обратную времени. Следует отметить, что  $B_{nm} = B_{mn}$  с точностью до постоянного множителя. Связь между коэффициентами спонтанного и вынужденного испускания определяется соотношением:

$$\frac{A_{nm}}{B_{nm}} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3}.$$

Рассмотрим подробнее вопрос о коэффициенте усиления системы. Изменение интенсивности излучения при прохождении оптически активной среды описывается уравнением:

$$dI_\nu = -x_\nu I_\nu dx,$$

представляющим собой закон Бугера в дифференциальной форме. Здесь  $x$  и  $\nu$  - коэффициент поглощения. Если в рассматриваемой среде существует инверсная заселенность, то коэффициент поглощения меньше нуля, то есть волна не затухает, а усиливается. В этом случае о

среде с инверсной заселенностью можно говорить, как о среде с отрицательным коэффициентом поглощения.

Для лазерных сред отрицательный коэффициент поглощения получил название коэффициента усиления. Он непосредственно характеризует усилительные свойства среды.

Усилительные свойства среды можно улучшить, если использовать положительную обратную связь, то есть возвращать часть сигнала в активную среду, обеспечивая многократное прохождение его. При этом достигается гораздо большее усиление. Если усиление существенно перекрывает потери среды и системы обратной связи, то произойдет самовозбуждение усилителя, начнется генерация излучения. Интегральное усиление сигнала в инверсной среде характеризуется коэффициентом усиления, представляющим отношение величины выходного сигнала к входному:

$$K = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}}.$$

В случае, когда усиление значительно, указывают коэффициент усиления в децибелах:

$$K = 10 \cdot \lg\left(\frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}}\right),$$

Мы рассмотрели влияние инверсной среды на характеристики проходящего излучения. Однако изменения происходят и в инверсной среде. Увеличение плотности излучения в среде вызовет уменьшение плотности инверсии, так как баланс процессов изменится в сторону обеднения верхнего уровня и дополнительного заселения нижнего уровня. Этот процесс называется насыщением усиления и определяет нелинейный характер усиления излучения инверсной средой.

### **Форма и ширина спектральной линии**

Энергетическому переходу между двумя бесконечно узкими энергетическими уровнями должна соответствовать бесконечно узкая спектральная линия поглощения или излучения на строго фиксированной частоте. Реально такая идеализированная монохроматическая волна существовать не может, поскольку уровни



энергии имеют конечную ширину. Поэтому излучение происходит в некотором интервале частот около  $\nu_0$ . На этой частоте мощность излучения максимальна и убывает на частотах, больших или меньших чем  $\nu_0$ . Частотный интервал, в пределах которого интенсивность убывает вдвое по сравнению с максимальным значением, называется шириной спектральной линии  $\Delta\nu_N$ . Ширина спектральной линии, определяемая спонтанными переходами, называется естественной шириной, которая прямопропорциональна вероятности спонтанного перехода:

$$\Delta\nu_N = \frac{A_{nm}}{2\pi} = \frac{32\pi^3 \nu_{nm}^3}{3hc^3 g_m} |D_{nm}|^2$$

где  $g_m$  - кратность вырождения уровня  $|D_{nm}|$  - матричный элемент дипольного момента перехода

Форма спектральной линии с естественной шириной описывается функцией Лоренца, которую иногда называют форм-фактором:

$$F_\nu = \frac{\Delta\nu_N}{\pi(\nu - \nu_0)^2 \Delta\nu_N^2}$$

В реальных условиях существует ряд факторов, приводящих к увеличению ширины спектральной линии по сравнению с естественной шириной.

Рассмотрим некоторые из них.

1. Доплеровское уширение. Эффект Доплера есть изменение частоты (длины волны), наблюдаемое при движении источника излучения относительно приемника. Частота излучения увеличивается, если источник приближается к наблюдателю. Частота электромагнитных волн, которую воспринимает наблюдатель, относительно которого он движется со скоростью  $v$ , может быть найдена из уравнения:

$$\nu = \nu_0 \left( 1 + \frac{v}{c} \cos\theta \right) \text{ при } v \ll c$$

Хаотичность теплового движения молекул в газе дает форму спектральной линии, описываемой функцией Гаусса:

$$G_{\nu} = \frac{\sqrt{\ln 2 / \pi}}{\Delta \nu} \exp \left\{ - \ln 2 \left[ (\nu - \nu_0)^2 / \Delta \nu^2 \right] \right\}$$

с шириной

$$\Delta \nu_D = \nu_0 \sqrt{\frac{2kT \cdot \ln 2}{mc^2}}$$

Доплеровское уширение в газовых активных средах достигает 1000 МГц, тогда как в твердых телах оно незначительно из-за жесткой связи ионов активатора с решеткой.

2. Уширение при столкновениях. Столкновения атомов с другими частицами или со стенками сосуда в газе, а также взаимодействие атомов с решеткой в твердых телах приводят к увеличению скорости обмена энергией между частицами и, следовательно, к уменьшению времени жизни атома в возбужденном состоянии. Форма спектральной линии, уширенной за счет столкновений, будет описываться функцией Лоренца, как и при естественном уширении. Но время жизни атома в возбужденном состоянии будет определяться временем столкновения. Из кинетической теории газов время столкновения равно:

$$\tau_{ст} = \frac{(MkT / \pi)^{0,5}}{16a^2P}$$

где  $a$  - эффективный борковский радиус атома,  $P$  - давление газа. Оценки показывают, что при пониженных давлениях уширение за счет столкновений в газе меньше доплеровского (например, в условиях работы гелий-неонового лазера), а при давлениях порядка атмосферного это уширение может быть преобладающим (некоторые типы лазеров на углекислом газе).

### **Задачи с решениями**

#### **Задача 1.1.**

Лазер мощностью 1 мВт излучает свет с длиной волны 632,8 нм. Вычислить поток квантов излучения.

Решение

Энергия одного фотона определяется выражением

$$E_0 = h \cdot \lambda = h \cdot \frac{c}{\lambda},$$

где  $\lambda$ - длина волны лазерного излучения,  $h$ - постоянная Планка ( $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с),  $c$ - скорость света. Запишем уравнения полной энергии

$$\begin{aligned} E &= N \cdot E_0 \\ E &= P \cdot t \end{aligned} \Rightarrow N \cdot E_0 = P \cdot t,$$

где  $N$ - число фотонов. Выразим поток фотонов определяется выражением

$$\Pi = \frac{N}{t} = \frac{P}{E_0},$$

где  $P$ - мощность лазера,  $\lambda$ - длина волны лазерного излучения,  $h$ - постоянная Планка ( $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с),  $c$ - скорость света. Заменим энергию одного фотона ( $E_0$ ) в выражении потока энергии.

$$\Pi = \frac{P \cdot \lambda}{h \cdot c} = \frac{10^{-3} \cdot 632,8 \cdot 10^{-9}}{6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8} = 31,8 \cdot 10^{14},$$

Ответ: Поток квантов излучения  $\Pi = 31,8 \cdot 10^{14}$  Вт.

Задача 1.2.

Вычислите столкновительное уширение спектральной линии неона 632,8 нм при давлении газа 400 Па и температуре 400 К, сравните с Доплеровским уширением.

Решение

Столкновительное уширение спектральной линии определяется выражением

$$\Delta \vartheta_{\text{ст}} = \frac{1}{\pi \cdot \tau_{\text{ст}}},$$

где  $\tau_{\text{ст}}$ - время между столкновениями атомов и молекул, которое выражается

$$\tau_{\text{ст}} = \frac{(\text{МКТ})^{1/2}}{16 \cdot \pi^{1/2} \cdot P \cdot a^2},$$

где  $k$ -постоянная Больцмана ( $k=1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К),  $M$ -молекулярная масса ( $M=0,02$  кг/моль),  $a$  - размер молекулы (для Ne  $a=76 \cdot 10^{-12}$ ).

Подставим полученные значения в уравнение времени между столкновениями между атомами и молекулами

$$\tau_{ст} = \frac{(MkT)^{1/2}}{16 \cdot \pi^{1/2} \cdot P \cdot a^2} = \frac{(0,02 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 400)^{1/2}}{16 \cdot 3,14^{\frac{1}{2}} \cdot 400 \cdot (76 \cdot 10^{-12})^2} = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ с}$$

Тогда значение столкновительного уширения спектральной линии будет равно

$$\Delta \vartheta_{ст} = \frac{1}{\pi \cdot \frac{(MkT)^{1/2}}{16 \cdot \pi^{1/2} \cdot P \cdot a^2}} = \frac{1}{3,14 \cdot 1,2 \cdot 10^{-7}} = 2,7 \cdot 10^6 \text{ Гц} = 2,7 \text{ МГц}$$

Доплеровское уширение спектральной линии определяется выражением

$$\begin{aligned} \Delta \vartheta_{доп} &= 2 \cdot \vartheta_0 \sqrt{\frac{2 \cdot K \cdot T \cdot \ln 2}{c^2 \cdot M}} = 2 \cdot \frac{c}{\lambda} \sqrt{\frac{2 \cdot K \cdot T \cdot \ln 2}{c^2 \cdot M}} \\ &= 2 \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{632,8 \cdot 10^{-9}} \sqrt{\frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 400 \cdot 0,69}{0,02 \cdot 9 \cdot 10^{16}}} \\ &= 1,5 \cdot 10^6 \text{ Гц} = 1,5 \text{ МГц} \end{aligned}$$

Ответ:  $\Delta \vartheta_{ст} = 2,7 \text{ МГц}$ ,  $\Delta \vartheta_{доп} = 1,5 \text{ МГц}$

### Задачи для самостоятельной работы

1. Определить энергию кванта света, имеющего длину волны 632,8 нм; 1,06 мкм; 10,6 мкм; 228 нм; 330 нм

2. Получить с помощью формулы Планка приближенные выражения для объемной спектральной плотности излучения  $u_\omega$ : а) в области, где  $\hbar\omega \ll kT$  (формула Рэлея — Джинса); б) в области, где  $\hbar\omega \gg kT$  (формула Вина).

3. Коэффициент поглощения излучения в активной среде составляет  $0,1 \text{ см}^{-1}$ . Во сколько раз уменьшится интенсивность излучения при прохождении пути  $l$  (10 см, 100 см).

4. Вычислите коэффициент вынужденного излучения  $B$ , если коэффициент спонтанного излучения  $A$  составляет: а)  $10^8 \text{ с}^{-1}$ , б)  $10^6 \text{ с}^{-1}$ , в)  $10^4 \text{ с}^{-1}$ .

5. Вычислите столкновительное уширение спектральной линии молекулы углекислого газа с длиной волны 10,6 мкм при давлении газа 105 Па и температуре 400 К, сравните с Доплеровским уширением и естественной шириной спектральной линии.

6. Интегральный коэффициент усиления системы составляет 10 дБ, выходная мощность 1 мВт. Определить входную мощность.

## 2. УСТРОЙСТВО РАБОТЫ ЛАЗЕРА

Общая схема оптического квантового генератора (лазера) приведена на рисунке 2. Необходимыми элементами любого лазера являются:

1) Рабочее вещество, в котором может быть осуществлена инверсия (активная среда).

2) Устройство, в котором используется какое-либо физическое воздействие на рабочее вещество, позволяющее осуществить инверсию населенности (система накачки).

3) Элемент, при помощи которого осуществляется интенсивное взаимодействие излучения с веществом и происходит отбор энергии от возбужденных молекул (оптический резонатор).

4) Устройство, обеспечивающее вывод энергии.

5) Дополнительные элементы, зависящие от цели лазера. (Приборы управления лучом, модуляторы и т.д.)

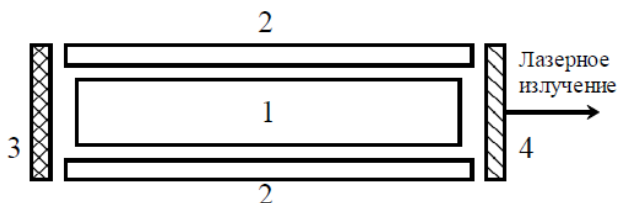


Рисунок 2- Принципиальная схема лазера

1 - активный элемент; 2 - устройство накачки; 3 - зеркало со стопроцентным отражением; 4 - полупрозрачное зеркало

### Рабочее вещество

Активная среда лазера может быть различна по агрегатному состоянию. Именно по этому признаку различают лазеры на твердом теле, газовые лазеры, жидкостные. Соответственно различается и устройство активных элементов лазеров, относящихся к разным группам. Активный элемент твердотельного лазера представляет собой стержень с кристаллической или аморфной структурой. В газовых лазерах активный элемент имеет вид трубки, заполненной газом или их смесью. В жидкостных лазерах активный элемент находится в кювете.

### Создание инверсии заселенности.

Условия получения инверсной населенности уровней можно получить из анализа балансных уравнений кинетики заселения и тушения конкретных энергетических уровней в активной среде при наличии накачки. При этом нет необходимости рассматривать все возможные элементарные процессы в системе, достаточно ограничиться лишь теми, которые вносят наиболее существенный вклад в изменение населенности рабочих уровней под действием накачки. В общем случае достаточно рассмотреть двух-, трех- и четырехуровневую схемы возбуждения активного вещества, соответствующие количеству энергетических уровней, участвующих в создании инверсной населенности.

#### Двухуровневая лазерная схема

Рассмотрим простейшую двухуровневую систему, в которой активная среда имеет уровень  $E_1$  - основное состояние и уровень,  $E_2$  - возможное возбужденное состояние (рисунок 3).

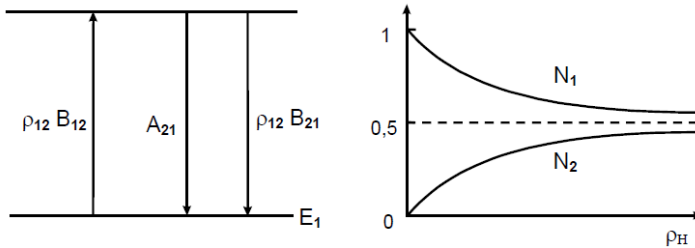


Рисунок 3 - Схема энергетических состояний двухуровневой квантовой системы (а) и зависимость относительной населенности рабочих уровней от плотности накачки (б)

В такой системе достаточно учесть три основных процесса: возбуждение уровня  $E_2$  в результате накачки и спонтанный и вынужденный излучательные переходы в основное состояние  $E_1$ . В стационарном состоянии скорости заселения и расселения уровня  $E_1$  равны и уравнение баланса можно записать следующим образом:

$$\rho_H B_{12} N_1 = (\rho_H B_{21} + A_{21}) N_2$$

Обозначив общее количество частиц в системе  $N = N_1 + N_2$ , получим:

$$N_2 = \frac{\rho_H B_{21}}{A_{21} + 2\rho_H B_{21}} N \quad N_1 = \frac{A_{21} + \rho_H B_{21}}{A_{21} + \rho_H B_{21}} N$$

$\rho_H$  - плотность излучения накачки. При отсутствии возбуждения все частицы находятся на энергетическом уровне  $E_1$ . С увеличением плотности накачки населенность уровня  $E_1$  уменьшается, а  $E_2$  растет. В предельном случае, при бесконечно большой плотности накачки, населенности обоих уровней выравниваются:

$$\lim N_1 = \lim N_2 = N/2$$

Такое состояние называется "просветлением" среды, так как показатель поглощения при этом стремится к нулю. Но ни при каких условиях, используя оптическую накачку, в двухуровневой системе нельзя достичь инверсии, а, следовательно, и усиления. Аналогичный результат получается и для других способов накачки. Инверсную населенность в двухуровневой системе можно получить только методом сортировки частиц. Пример - мазер на пучке молекул аммиака.

### **Трехуровневая лазерная схема.**

На рисунке 4 приведены два варианта трехуровневых систем. В первом из них рабочий переход заканчивается в основном состоянии, а во втором - на возбужденном. Накачка в обоих случаях осуществляется по возможности селективно на уровень  $E_3$ .

Рассмотрим зависимость населенности уровней от плотности накачки для трехуровневой системы первого типа. Предположим, что накачка системы осуществляется оптическим путем только по каналу 1 - 3, а внешним возбуждением в каналах 1 - 2 и 2 - 3 можно пренебречь.

$$dN_3/dt = \rho_H B_{13} N_1 - (\rho_H B_{31} + S_{32} + A_{31}) N_3 = 0$$

$$dN_2/dt = S_{32} N_3 - S_{21} N_2 = 0$$

$$N_1 + N_2 + N_3 = N$$

$S$  - частота релаксации при излучательных и безизлучательных переходах,  $c^{-1}$ .



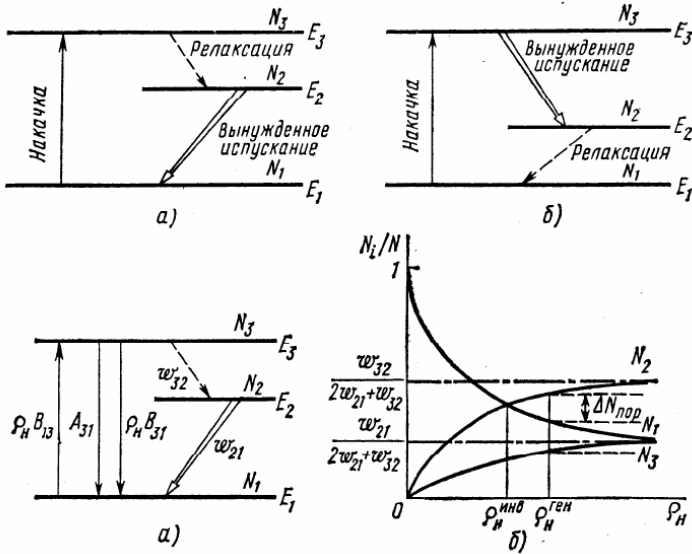


Рисунок 4- Трехуровневые схемы первого (а) и второго (б) типов и зависимость относительной населенности уровней от плотности накачки (в)

Полагая кратности вырождения всех уровней равными единице, находим следующие выражения для населенности уровней:

$$N_1 = \frac{S_{21}(A_{31} + S_{32} + \rho_H B_{31})}{S_{21}(S_{32} + A_{31}) + (2S_{21} + S_{32})\rho_H B_{31}} N$$

$$N_2 = \frac{S_{32}\rho_H B_{31}}{S_{21}(S_{32} + A_{31}) + (2S_{21} + S_{32})\rho_H B_{31}} N$$

$$N_3 = \frac{S_{21}\rho_H B_{31}}{S_{21}(S_{32} + A_{31}) + (2S_{21} + S_{32})\rho_H B_{31}} N$$

При некотором значении плотности накачки, называемым пороговым, возникает инверсия населенности между уровнями  $E_2$  и  $E_1$  ( $N_2 > N_1$ ). С увеличением плотности накачки выше порогового значения инверсия увеличивается. Отметим, что порог накачки по инверсии обычно меньше порога накачки по генерации. Приравнивая выражения для концентраций  $N_1$  и  $N_2$ , получим выражение для пороговой плотности накачки по инверсии:

$$\rho_{\text{н.инв.}} = \frac{S_{21}(S_{32} + A_{31})}{B_{31}(S_{32} - S_{21})}$$

Из рассмотренных выше соображений следует, что для создания максимального уровня инверсии наиболее выгодны системы, в которых переход 3 - 2 должен быть быстрым, уровень  $E_2$  - долгоживущим, а коэффициент Эйнштейна для перехода 1 - 3 - большим.

В режиме генерации происходит изменение населенностей рабочих уровней, сопровождающееся насыщением инверсии и коэффициента усиления. Увеличение поступления частиц на уровень  $E_2$ , вызываемое ростом плотности накачки, компенсируется возрастанием числа активных переходов 2 - 1. Поэтому в режиме генерации инверсия остается приблизительно постоянной и близкой к пороговому значению плотности накачки по генерации.

### **Четырехуровневая лазерная схема**

В четырехуровневой системе каналы накачки и генерации полностью разделены, что позволяет получать инверсию населенностей при минимальных уровнях накачки. Механизм создания инверсии между рабочими лазерными уровнями  $E_3$  и  $E_2$  показаны на рисунке 5. Так же, как и в трехуровневой системе, накачка переводит атомы из основного  $E_1$  в верхнее возбужденное состояние  $E_4$ . Инверсия достигается между уровнями  $E_3$  и  $E_2$ . Для этого необходимо, чтобы процессы  $E_4 - E_3$  и  $E_2 - E_1$  были быстрыми. Возможные переходы 4 - 1, 4 - 2, 3 - 1, 1 - 2, 3 - 4 приводят к уменьшению инверсии. Так же, как и в предыдущих случаях, для четырехуровневой системы может быть проведен кинетический анализ, результаты которого показаны на рисунок 5 (б). Сами балансные уравнения из-за их громоздкости не приводятся.

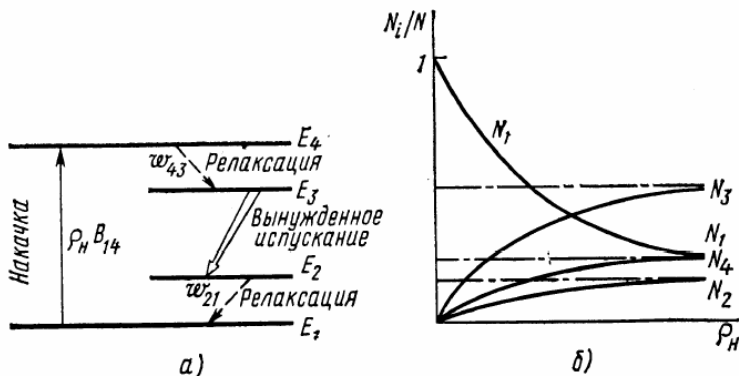


Рисунок 5- Схема четырехуровневой системы (а) и зависимость относительной населенности уровней от плотности накачки (б)

Из рисунка 5(б) следует, что пороговая плотность накачки по инверсии в четырехуровневой системе мала даже при учете потерь в активном веществе. В режиме генерации за счет интенсивных вынужденных переходов происходит насыщение уровня инверсии и коэффициента усиления.

### Оптические резонаторы

В реальных лазерных системах при однократном прохождении луча через инверсную систему достигается весьма небольшое усиление. Поэтому принимаются меры для обеспечения многократного прохождения пучка через активную среду. Это достигается использованием в ОКГ оптического резонатора, при наличии которого за счет многократного прохождения излучения достигается наиболее полное взаимодействие последнего с активной средой. Обеспечивая положительную обратную связь, резонатор влияет на диаграмму направленности и спектральный состав излучения. Важной характеристикой любого резонатора является добротность, представляющая собой отношение энергии, запасенной в резонаторе, к средней энергии, теряемой за период колебаний или в единицу времени. Оптический резонатор является открытым, то есть отражающие стенки его не замкнуты.

В объемном резонаторе могут возбуждаться колебания только с определенными длинами волн, образующие стоячую волну. Частоты

этих колебаний называются резонансными, а колебания - собственными. Собственный тип колебаний резонатора называется модой. Если длина волны излучения составляет 1 мкм, а длина резонатора 1 м, то на его длине будут укладываться  $2 \cdot 10^6$  полуволн. При этом расстояние между двумя ближайшими типами колебаний будет много меньше ширины спектральной линии, то есть в пределах одной спектральной линии укладывается много собственных типов колебаний или мод. Такой резонатор называется многомодовым.

Моды резонатора обозначаются  $TEM_{mnp}$ . Индексы указывают число полуволн, укладываемых в каждом из ребер прямоугольного параллелепипеда. В оптическом резонаторе число полуволн на его длине очень велико и обычно не указывается, а моды резонатора обозначаются  $TEM_{mn}$ . Для аксиальных колебаний  $m = n = 0$ . Неаксиальные моды так же могут иметь место, но их добротность уменьшается с увеличением угла отклонения от оси.

Добротность оптических резонаторов велика и достигает  $10^8$ . От добротности зависит и полуширина линии:

$$\Delta\nu = \nu/Q$$

При этом ширина линии лазерного излучения может быть меньше естественной ширины линии.

Простейший оптический резонатор образуют два плоских зеркала, расположенные строго параллельно друг другу (рисунок 6). Электромагнитные волны, распространяющиеся вдоль оптической оси резонатора, будут отражаться от зеркал и интерферировать между собой. Те из них, для которых выполняется условие резонанса, интерферируют на максимум, образуя в резонаторе стоячую волну, как показано на рисунок 6. За счет многократного прохождения таких волн резко увеличивается эффективность их взаимодействия с активным веществом. Волны, распространяющиеся под не слишком малым углом к оптической оси, после нескольких отражений выходят из резонатора.

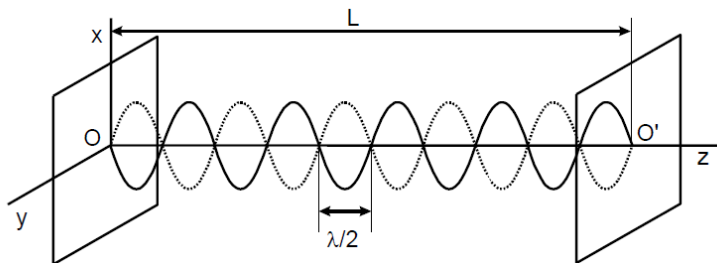


Рисунок 6- Схема плоского оптического резонатора.

Для вывода излучения наружу одно из зеркал резонатора делается полупрозрачным. Это определяет необходимые полезные потери резонатора (потери на излучение). Добротность резонатора, определяемая потерями на излучение, может быть найдена из уравнения:

$$Q = \frac{2\pi L}{\lambda(1-R)},$$

где  $R$  - коэффициент отражения зеркала;  $L$  - длина резонатора. Из других видов потерь отметим следующие:

1. Дифракционные потери, связанные с дифракцией электромагнитной волны на зеркалах, имеющих конечные размеры. Чем меньше поперечные размеры зеркала, тем больше потери. Дифракционные потери минимальны для аксиальных мод и велики для неаксиальных.

2. Потери на несовершенства зеркал обусловлены возможным поглощением в зеркалах, рассеянием на шероховатостях, отклонением геометрии зеркала от заданной и т. д. Для их исключения к зеркалам предъявляются очень высокие требования. Так, погрешность в обработке не должна превышать 0,1 от длины волны.

3. Потери на разъюстировку резонатора. Угол между плоскостями зеркал не должен превышать несколько угловых секунд.

4. Потери в активном веществе связаны с поглощением и рассеянием энергии на различных дефектах в активной среде.

В плоском резонаторе фронт волны на его зеркале практически плоский, что позволяет получить малую расходимость луча.

### Условия самовозбуждения и насыщения усиления

Как было показано выше, условием усиления электромагнитных колебаний является наличие инверсной населенности. Для генерации необходимо, чтобы усиление за один проход в активном веществе превысило все потери, в том числе связанные с выводом излучения наружу, дифракционными и неактивными потерями в рабочем веществе и др. Это может быть обеспечено уровнем инверсии, при котором показатель усиления на данной частоте превысит суммарный показатель потерь.

Показатель усиления связан с населенностью уровней соотношением:

$$\alpha = \frac{h\nu n B_{nm}}{2\pi c} g_v \left( \frac{g_n}{g_m} N_n - N_m \right)$$

Потери в оптическом резонаторе определяются его добротностью:

$$-\delta I/I = \nu n dz/Qc$$

При увеличении интенсивности накачки выше порога генерации происходит насыщение инверсии населенностей и усиления. Характер насыщения усиления в лазере зависит от типа уширения спектральной линии. При однородном уширении контур спектральной линии в режиме насыщения не изменяется. При неоднородном уширении увеличение показателя усиления будет происходить не равномерно по всему контуру, а преимущественно вблизи частоты  $\nu$ , то есть в общем спектре образуется характерный пик. Количественно эффект насыщения описывается формулами

$$\alpha_{\text{одн}} = \frac{\alpha_{\text{одн}}^0}{1 + I/I_s}$$

для однородно уширенной линии и

$$\alpha_{\text{неодн}} = \frac{\alpha_{\text{неодн}}^0}{(1 + I/I_s)^{1/2}}$$

для неоднородно уширенной линии. Здесь  $\alpha_0$  - ненасыщенный показатель усиления или показатель усиления слабого сигнала, когда

интенсивность излучения лазера  $I$  мала. Величина  $I_s$  называется параметром насыщения и зависит от вероятности всех переходов, участвующих в создании инверсии. При достижении порога генерация начинается на одной моде, обладающей наивысшей добротностью и расположенной ближе всех к максимуму спектральной линии. Это режим одномодовой генерации. При увеличении интенсивности накачки появляется генерация и на модах с меньшей добротностью, при этом лазер работает в режиме многомодовой генерации. Для получения одномодовой генерации при высоких мощностях накачки принимают специальные меры для селекции мод.

## Задачи с решениями

### Задача 2.1

Уровни 1 и 2 находятся на таком расстоянии по энергии ( $E_2 - E_1$ ), что частота соответствующего перехода попадает в середину видимого диапазона. Рассчитайте равновесное отношение населенностей этих двух уровней при комнатной температуре.

Решение

Чтобы найти населенность в тепловом равновесии для длин волн между 400 нм и 800 нм воспользуемся уравнением Больцмана

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{G_2}{G_1} \cdot \exp\left(\frac{-(E_2 - E_1)}{k \cdot T}\right),$$

Чтобы найти отношение ( $E_2 - E_1$ ), запишем отношение энергетических уровней

$$(E_2 - E_1) = h \cdot \vartheta,$$

где частота будет равно  $\vartheta = \frac{c}{\lambda} = 5 \cdot 10^{14}$  Гц. Тогда отношение энергетических уровней будет равно  $(E_2 - E_1) = 3,313 \cdot 10^{-19}$  Дж.

Подставим полученные значения в уравнение Больцмана

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{G_2}{G_1} \cdot \exp\left(\frac{-(E_2 - E_1)}{k \cdot T}\right) = 1,82 \cdot 10^{-35}$$

Ответ:  $\frac{N_2}{N_1} = 1,82 \cdot 10^{-35}$ . Таким образом, большинство (или все) атомы находятся в основном состоянии ( $E_1$ ) при тепловом равновесии и комнатной температуре. Если  $k \cdot T \ll h \cdot \vartheta$ , то тепловые вклады не

способствуют выходу атома из основного состояния в возбужденное. Из-за тепловых эффектов атом может возбуждаться на разные уровни переходов в энергетическом элементе  $E_2, E_1$ , поскольку  $k \cdot T \cong \Delta E_i$ , где  $\Delta E_i$  представляет собой разницу в энергии.

## Задача 2.2

Определите добротность резонатора гелий-неонового лазера по отношению к потерям на излучение, если длина активной зоны 40 см, а коэффициент отражения зеркала составляет: а) 0,9; б) 0,6; в) 0,4.

### Решение

Добротность резонатора определяется потерями на излучении, которая определяется выражением

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot L}{\lambda \cdot (1 - R)},$$

где  $R$ - коэффициент отражения,  $L$ - длина резонатора (длина активной зоны). Тогда подставим значения в полученную формулу

а)  $R = 0,9$

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot L}{\lambda \cdot (1 - R)} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,4}{632,8 \cdot 10^{-9} \cdot (1 - 0,9)} = 39,7 \cdot 10^6$$

б)  $R = 0,6$

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot L}{\lambda \cdot (1 - R)} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,4}{632,8 \cdot 10^{-9} \cdot (1 - 0,6)} = 9,92 \cdot 10^6$$

в)  $R = 0,4$

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot L}{\lambda \cdot (1 - R)} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,4}{632,8 \cdot 10^{-9} \cdot (1 - 0,4)} = 6,61 \cdot 10^6$$

Ответ: а)  $R = 0,9$   $Q = 39,7 \cdot 10^6$

б)  $R = 0,6$   $Q = 9,92 \cdot 10^6$

в)  $R = 0,4$   $Q = 6,61 \cdot 10^6$

## Задачи для самостоятельной работы

1. В условиях теплового равновесия при  $T=300$  К отношение населенностей  $\frac{N_2}{N_1}$  некоторой пары уровней равно  $\frac{1}{e}$ .



Рассчитайте частоты перехода между ними. В какой диапазон спектра электромагнитных волн она попадает?

2. Запишите условия, при которых отношение концентраций частиц на верхнем и нижнем уровне в двухуровневой системе будут равны: а) 0,5; б) 1. Как называется состояние среды в последнем случае?

3. В трехуровневой системе активным является переход 2 - 1. Укажите: а) каким должно быть время жизни уровня 2 - большим или малым, б) каким должен быть коэффициент Эйнштейна для перехода 1 - 3 - большим или малым, в) какова должна быть скорость перехода 3 - 2 - большой или малой для создания максимального уровня инверсии.

4. Оцените ширину полосы пропускания рубинового лазера с длиной активного элемента 5 см, плотностью инверсии  $n=5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  и сечением перехода  $\sigma=2,5 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$ . Ширина линии перехода  $\Delta\nu= 330 \text{ ГГц}$  (при  $T=300 \text{ К}$ )

5. Как влияет разность энергий уровней 4 - 3 и 2 - 1 на коэффициент полезного действия четырехуровневой лазерной системы.

6. Как влияет добротность резонатора на пороговую инверсную населенность по генерации?

### 3. СВОЙСТВА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

#### Монохроматичность

Ширина спектра излучения является одной из основных его характеристик. Для оценки ширины спектра пользуются понятием ширины спектральной линии на уровне 0,5 от ее максимума и степени монохроматичности (спектральной чистотой излучения). В случае спектральной линии степень монохроматичности  $\mu$  равна:

$$\mu = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}.$$

Идеально монохроматического излучения с шириной спектра  $\Delta\lambda$  равной нулю не может быть по самой природе излучения, поэтому обычно монохроматическим считается излучение, имеющее достаточно узкий спектральный интервал, который можно охарактеризовать одной длиной волны или частотой. Можно выделить монохроматическую составляющую и из обычного излучения с помощью спектральных приборов. Однако в этом случае степень монохроматичности получается не менее  $10^{-6}$ , в то время как степень монохроматичности лазерного излучения достигает  $10^{-10}$ . Весьма важно отметить, что с помощью спектральных приборов нельзя получить мощное монохроматическое излучение (чем больше монохроматичность излучения, тем меньше мощность). Это связано с тем, что в обычных источниках излучения мощность распределена в широком спектральном диапазоне, а в ОКГ вся излучаемая мощность сосредоточена в одной или нескольких чрезвычайно узких линиях. Очень высокая степень монохроматичности может быть получена в газовых лазерах, работающих в одномодовом режиме.

Теоретический предел ширины спектральной линии определяется тепловыми шумами и шумами спонтанного излучения, причем в оптическом диапазоне последние преобладают. Ширина спектральной моды, выделяемая резонатором, определяется его добротностью:

$$\Delta\nu_c = \nu_0/Q$$

При этом спектральная ширина линии лазерного излучения, имеющей лоренцеву форму, может быть найдена из выражения:

$$\Delta\nu = \frac{2h\nu_0(\Delta\nu_c)^2}{\pi P}$$

где  $P$  - выходная мощность лазерного излучения.

### **Когерентность**

Понятие когерентности в применении к колебаниям относится к связи или согласованности между фазами колебаний в различных точках пространства в один и тот же момент времени или между фазами колебаний в одной и той же точке пространства, но в различные моменты времени. Тепловые источники света не являются когерентными и не могут давать явления интерференции. Однако и от некогерентного источника можно получить почти когерентный пучок конечного сечения, но при этом будет использована только очень малая часть энергии источника (приблизительно в  $10^{13}$  раз меньше плотности излучения источника). В отличие от обычных источников излучение лазеров обладает высокой степенью пространственной и временной когерентностью.

Когерентность характеризуется степенью или функцией когерентности, которая изменяется от 1 (полная когерентность) до 0 (полная некогерентность). Степень когерентности можно определить экспериментально путем наблюдения интерференционной картины, образуемой при расщеплении светового пучка на два и последующего их сложения после прохождения оптических путей разной длины. Контрастность полос интерференционной картины и, следовательно, степень когерентности определяются из выражения:

$$V = \frac{(I_{\max} - I_{\min})}{(I_{\max} + I_{\min})}$$

Когерентность излучения имеет значение в тех применениях лазера, где происходит расщепление и последующее сложение составляющих лазерного пучка. К этим применениям относятся интерферометрическая лазерная дальнометрия, голография. С когерентностью излучения связана "пятнистая" или "зернистая"

картина лазерного излучения при наблюдении его рассеяния от экрана. Это явление обусловлено интерференцией волн, рассеиваемых экраном.

### **Поляризация излучения**

Векторы напряженности электромагнитной световой волны расположены в плоскости, перпендикулярной направлению ее распространения и периодически изменяются по величине и направлению. Поляризация света — это характеристика неравномерности распределения по направлению амплитуд колебаний этих векторов. Если излучение монохроматическое, векторы колеблются с некоторой постоянной частотой и их можно представить, как сумму двух взаимно перпендикулярных составляющих  $X$  и  $Y$ . Если разность фаз колебаний по этим направлениям равна нулю, то суммарный вектор колеблется в одной плоскости. Ситуация, соответствующая разности фаз  $\pi n$ , где  $n$  - целое число, называется линейной поляризацией, а плоскость, перпендикулярная направлению колебаний - плоскостью поляризации.

Если разность фаз по направлениям  $X$  и  $Y$  не равна  $\pi n$ , то конец вектора напряженности электрического поля описывает поверхность эллиптического цилиндра. Этот случай называется эллиптической поляризацией. Частным случаем ее является круговая поляризация, разность фаз при которой составляет  $(2n-1)*\pi/2$ .

В естественном свете направление электрического вектора изменяется случайным образом, и поляризация отсутствует. Лазерное излучение поляризовано. Если угол между преломленным и отраженным лучами прямой, то отраженный свет поляризован полностью. Угол падения света в этом случае называется углом Брюстера, а само явление используется для линейной поляризации света в резонаторе лазера.

Для поляризации света используются поляроиды, поляризационные призмы. Поляроид представляет собой пластину из одинаково ориентированных анизотропных кристаллов. Поляризация света в них происходит за счет поглощения колебаний с определенным направлением электрического вектора. Если входящий свет

поляризован в направлении, составляющем угол  $45^\circ$  с оптической осью, то из-за разницы коэффициентов преломления X и Y составляющих, при выходе из вещества становятся разными фазы их колебаний, а это приводит к изменению поляризации света. Если на выходе разность фаз составит  $90^\circ$ , то линейно поляризованный свет меняет поляризацию на круговую. Плоскопараллельную пластинку анизотропного кристалла, дающую такую разность фаз, называют четвертьволновой.

### **Направленность и возможность фокусирования излучения**

Направленным называют излучение, распространяющееся в пределах очень небольшого телесного угла. Иными словами, направленность характеризуется телесным углом, в котором распространяется большая часть излучения. Обычные источники обладают очень низкой направленностью излучения (в пределах телесного угла от  $2\pi$  до  $4\pi$ ).

От обычных источников можно получить почти параллельные лучи, если на большом расстоянии установить диафрагму или поместить источник в фокальной плоскости коллиматора. Однако энергия такого пучка будет весьма мала. ОКГ излучают в очень небольшом телесном угле. Излучение лазеров является когерентным и поэтому фронт волны представляет собой, как правило, почти плоскость или сферу очень большого радиуса, т.е. лазер можно рассматривать как источник почти параллельных лучей с очень небольшой расходимостью. В принципе эта расходимость определяется дифракцией на выходном отверстии. Причем направленность излучения лазеров достигается не в результате каких-то специальных приемов, а благодаря когерентности излучения. Необходимо отметить, что создание идеально параллельного пучка света невозможно и при помощи лазеров, можно лишь добиться очень малого угла расходения. Нижний предел для расходимости пучка, определяемый дифракцией, может быть оценен из выражения:

$$\theta = \frac{K\lambda}{d},$$

где  $d$  - диаметр отверстия или диаметр пучка в наиболее узкой его части,  $K$  - коэффициент, зависящий от формы пучка. Для плоского пучка  $K = 2,44$ , для гауссова  $K = 1,27$ .

Используя любую оптическую систему, увеличивающую телесный угол пучка, можно получить значительное увеличение плотности излучения. Когерентное излучение ОКГ можно сфокусировать в пятно чрезвычайно малых размеров, где плотность энергии будет очень большой. Теоретическим пределом минимального диаметра лазерного пучка является длина волны. В реальной ситуации этот предел трудно достижим из-за неидеальности пространственных характеристик лазерного пучка и искажений в линзах. Для промышленных лазеров размеры сфокусированного светового пятна составляют 0,001 - 0,01 см. В настоящее время с помощью лазеров достигнуты плотности мощности излучения 1011 Вт/см<sup>2</sup> (плотность излучения Солнца составляет только 7·10<sup>3</sup> Вт/см<sup>2</sup>).

### **Яркость и мощность излучения**

Яркость ( $B$ ) определяется, как мощность на единицу площади и на единицу телесного угла. Для луча круглого сечения радиусом  $R$ , расходимостью  $Q$  и полной мощностью  $P$  имеем:

$$B = \frac{P}{\pi R^2 \theta^2}.$$

Спектральная яркость  $B_\nu = B/\Delta\nu$ , где  $\Delta\nu$  - ширина лазерной линии в Гц. Лазер даже небольшой мощности имеет яркость, которая на несколько порядков превосходит яркость обычных источников. Это свойство является следствием высокой направленности лазерного пучка. Согласно одной из теорем оптики, яркость источника нельзя повысить с помощью оптической системы. Поэтому для повышения яркости необходимо улучшать модовый состав излучения и снижать угловую расходимость пучка. Мощность излучения или лучистый поток представляет собой энергию, переносимую излучением за единицу времени. Если энергия излучается в виде импульсов, то пользуются понятием импульсной и средней мощности. Средняя мощность излучения ОКГ обычно невелика, хотя существуют генераторы, развивающие в непрерывном режиме мощность до

десятков кВт. По своей импульсной мощности и спектральной плотности мощности лазеры значительно превосходят все существующие источники в оптическом диапазоне спектра. Из лазеров, работающих в непрерывном режиме, наибольшую мощность имеют CO<sub>2</sub>-лазеры (десятки киловатт для промышленных образцов). Очень высокие уровни мощности имеют импульсные твердотельные лазеры на неодимовом стекле (до 10<sup>11</sup> - 10<sup>13</sup> Вт при наносекундной длительности импульса).

### Задачи с решениями

Задача 3.1.

Определить соотношения максимальной и минимальной интенсивности интерференционных полос, соответствующих степени когерентности излучения 1; 0,8; 0,5.

Решение

Запишем уравнение степени когерентности

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$$

При  $V = 1$

$$1 = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$$

$$I_{min} = 0$$

При  $V = 0,8$

$$\frac{4}{5} = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$$

$$I_{max} = 9 \cdot I_{min}$$

При  $V = 0,5$

$$\frac{1}{2} = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$$

$$I_{max} = 3 \cdot I_{min}$$

Ответ:  $I_{min} = 0$ ,  $I_{max} = 9 \cdot I_{min}$ ,  $I_{max} = 3 \cdot I_{min}$ .

### Задача 3.2.

Определить теоретически возможную ширину спектральной линии и степень монохроматичности излучения гелий-неонового лазера на длине волны 632,8 нм, если мощность излучения составляет 1 мВт, добротность резонатора  $10^8$ .

Решение

Добротность резонатора выражается уравнением

$$Q_p = \frac{\vartheta_o}{\Delta\vartheta_p},$$

Где  $\vartheta_o$  - центральная частота, которая равна  $\vartheta_o = \frac{c}{\lambda_o}$  и  $\Delta\vartheta_p$  - ширина резонансного пика резонатора. Выразим из уравнения добротности ширину резонансного пика резонатора

$$\Delta\vartheta_p = \frac{\vartheta_o}{Q_p},$$

Тогда центральная частота равна  $\vartheta_o = \frac{c}{\lambda_o}$ . По формуле Таунса ширина спектральной линии выражается

$$\begin{aligned} \Delta\vartheta_{\text{сп}} &= 8 \cdot \pi \cdot \Delta\vartheta_p^2 \cdot \frac{h \cdot \vartheta}{P} = 8 \cdot \pi \cdot \frac{h}{P} \cdot \frac{c^3}{\lambda^3 \cdot Q^2} = \\ &= 8 \cdot 3,14 \cdot \frac{27 \cdot 10^{24}}{253,6 \cdot 10^6 \cdot 10^{-27} \cdot 10^{16}} \cdot \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{10^3} \\ &= \frac{4,5 \cdot 10^3 \cdot 10^{24} \cdot 10^{-34} \cdot 10^3}{253,6 \cdot 10^6 \cdot 10^{-27} \cdot 10^{16}} = 0,018 \cdot 10^1 = 0,18 \text{ Гц} \end{aligned}$$

Ответ:  $\Delta\vartheta_{\text{сп}} = 0,18 \text{ Гц}$

### Задачи для самостоятельной работы

1. Вычислите дифракционный предел расходимости плоского и гауссова пучка излучения гелий - неоновом лазера диаметром 3 мм.

2. Оцените минимально возможное сечение сфокусированного пучка лазерного излучения с длиной волны 500, 1060 и 10600 нм.



3. Оцените угол расхождения пучка основного типа колебаний конфокального резонатора. Для оценок принять  $\lambda=1$  мкм, расстояние между зеркалами  $d=R_1=-R_2=2$  м. Апертурный размер зеркал велик и дифракционные эффекты пренебрежимо малы.

4. Доказать, что при угле падения, равном углу Брюстера, угол между отраженным и преломленным лучами равен  $\pi/2$ .

5. Определить теоретическую дифракционную расходимость излучения различных лазеров, считая распределение интенсивности равномерным в пределах заданного диаметра пучка для Cu, Nd:YAG, N<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub>-лазеров и гауссовым для He-Ne лазера, по следующим данным:

а) Nd:YAG  $\lambda = 1,06$  мкм  $D = 5$  мм;

б) He-Ne  $\lambda = 0,63$  мкм  $D = 0,3$  мм;

в) Cu  $\lambda = 0,5$  мкм  $D = 3$  мм;

г) N<sub>2</sub>  $\lambda = 0,34$  мкм  $D = 0,3$  мм;

д) CO<sub>2</sub>  $\lambda = 10,6$  мкм  $D = 5$  мм, где  $\lambda$  – длина волны излучения,  $D$  – диаметр лазерного пучка на выходе лазера. Решение оформить в виде таблицы.

6. Пучок лазера на рубине ( $\lambda=694$  нм) после прохождения телескопа с диаметром 1 м направляют на Луну. Рассчитайте примерный диаметр пятна на поверхности Луны, что пучок обладает полной пространственной когерентностью.

#### 4. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ЛАЗЕРОВ

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: твердотельные лазеры; газовые лазеры, включая газодинамические, химические и эксимерные; полупроводниковые лазеры; лазеры на красителях. Хотя полупроводниковые лазеры по агрегатному состоянию твердотельные, их целесообразно рассмотреть отдельно из-за специфики в механизмах генерации.

##### **Твердотельные лазеры**

Активными центрами в лазерах этого типа являются ионы, введенные в кристаллическую среду. Активные элементы (кристаллическая основа + активные ионы) изготавливаются в виде стержней с отполированными торцевыми поверхностями, с нанесенными зеркальными покрытиями и также с обработанной поверхностью для эффективного введения излучения накачки.

Излучение накачки создается в импульсном или непрерывном режиме с помощью ламп различной формы и газового наполнения, а также с помощью лазера. Накачка с помощью лазера особенно эффективна. В качестве источников накачки применяются: ксеноновые лампы, криптоновые лампы, ртутные лампы высокого давления, галогенные лампы. Используемые для накачки импульсные лампы имеют стержневую ( $l = 10 - 50$  мм,  $d = 5 - 20$  мм) или спиральную форму.

Различные твердотельные лазеры генерируют излучение в широкой спектральной области: 0.3 - 3 мкм в импульсном режиме; 0.69 - 2.6 мкм в непрерывном режиме. Излучение происходит в виде одиночных спектрально относительно узких линий, которые не являются перестраиваемыми. Само излучение характеризуется малой длиной когерентности  $L$  (менее одного метра); большими колебаниями интенсивности излучения; слаборегулярным распределением интенсивности по поперечному сечению пучка. Более высокое

качество пучка возможно в непрерывном режиме при возбуждении моды TEM<sub>00</sub>.

Для излучения импульсного лазера характерны пиковые режимы. При работе в импульсном режиме длительность импульса накачки равна примерно 5 мс. Генерация лазерного излучения начинается после примерно 0.5 мс. Длительность пиков примерно 1 мс. Многие из твердотельных лазеров работают по четырехуровневой схеме. Поскольку нижний уровень почти не заселен, этот тип лазеров обладает низкой пороговой мощностью (т.е. минимально возможная выходная мощность). Из указанных лазеров особо следует выделить рубиновый, Nd-ИАГ и лазеры на неодимовом стекле.

### **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.

Активная среда находится в пределах лазерной трубки, длина зоны возбуждения достигает от нескольких сантиметров до 200 м (типично 0.3 - 1.5 м), а диаметр лазерной трубки 0.1 - 50 см (типично 0.1 - 2 см), наполнение газа стационарное или в проточной системе. Охлаждение газа, т. е. отвод тепловых потерь, происходит с помощью воздушного охлаждения при малой мощности; водяного охлаждения при средней и высокой мощности; быстрой замены газа при очень высокой мощности. По сравнению с твердотельным лазером, газовый лазер, благодаря лучшей однородности активной среды и более узкой ширине лазерной линии, имеет более высокие параметры излучения относительно длины когерентности, стабильности интенсивности

излучения, расходимости пучка и однородности по поперечному сечению.

Спектральные свойства лазерного излучения в основном определяются сильным неоднородным (доплеровским) уширением. При этом изменение доплеровской ширины в зависимости от длины волны равно:

$$\Delta\nu = 50 \text{ МГц для } \lambda = 10.6 \text{ мкм (CO}_2\text{-лазер);}$$

$$\Delta\nu = 1.5 \text{ ГГц для } \lambda = 0.633 \text{ мкм (He-Ne-лазер);}$$

$$\Delta\nu = 3.5 \text{ ГГц для } \lambda = 0.448 \text{ мкм (Ar}^+\text{-лазер).}$$

Неоднородное уширение приводит к тому, что газовый лазер излучает на большом числе собственных мод и в результате образуется спектрально относительно широкая линия. Одномодовый режим работы лазера может быть достигнут, наряду с применением частотно-селективных элементов, с помощью коротких резонаторов.

### **Атомные лазеры**

Самым распространенным лазером на атомных переходах является He-Ne-лазер. Этот лазер может работать в непрерывном режиме с малыми выходными мощностями. Он отличается небольшими размерами, простой и надежной конструкцией. 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, которые возбуждаются при столкновениях с электронами.

Свойства He-Ne-лазера типичны для газовых лазеров и характеризуются большой длиной когерентности, высокой монохроматичностью, хорошим качеством пучка. Мощность гелий - неоновых лазеров обычно составляет 0,5 - 50 мВт и их использование связано, в основном, с измерительной техникой, голографией и т.д.

### **Химические лазеры**

В химических лазерах генерация электромагнитного излучения происходит в результате протекания химических реакций. Так при

взаимодействии фтора и водорода (дейтерия), активированном нагретым в дуговом разряде азотом, создается инверсная населенность возбужденных молекул HF или DF, обеспечивающая лазерное излучение на длинах волн 2,6 - 3,5 или 3,6 - 5 мкм. В хемолазерах с переносом энергии возбужденные молекулы фтористого водорода или дейтерия передают свою энергию молекулам углекислого газа, и наблюдается лазерное излучение последних на длине волны 10,6 мкм. Известны химические лазеры, работа которых инициируется ударной или взрывной волной, а так же электрическим разрядом.

Фотодиссоционные лазеры так же являются частным случаем химических лазеров. Основным процессом, приводящим к появлению инверсной заселенности в хемолазере является химическая реакция, в результате которой образуются атомы, молекулы или радикалы в возбужденном состоянии. Наиболее известный хемолазер - на фотодиссоциации молекул CF<sub>3</sub>J.

### **Жидкостные лазеры**

В жидкостных лазерах вынужденное излучение возникает на флуоресцентном переходе в молекулах органического красителя. Концентрация красителя составляет 0,005 - 0,0001 моль/л. лазеров.

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).

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.

Достоинства жидкостных лазеров: возможность перестройки частоты; малая расходимость излучения; высокая степень пространственной когерентности.

Недостатки: малый КПД; малая монохроматичность; низкая степень временной когерентности. Большая ширина линии генерации может быть отнесена и к достоинствам с точки зрения использования их в режиме синхронизации мод: таким образом, получены световые импульсы длительностью около 1 пс.

### Задачи с решениями

#### Задача 4.1.

Определить мощность и энергию импульсов излучения  $N_2$ -лазера длительностью  $\tau=10^{-8}$  с, необходимые для достижения плотности мощности излучения в фокусе  $q_0=10^7$  Вт/см<sup>2</sup>, если расходимость пучка 1 мрад, а фокусное расстояние оптической системы 3 см.

Решение

Мощность импульсов лазерного излучения определяется выражением

$$P_0 = q_0 \cdot S,$$

где  $S = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4}$  - площадь пятна в фокальной плоскости.

Определим, чему равен диаметр пятна в фокусе, по следующей формуле:

$$d_0 = \theta \cdot f = 30 \text{ мкм}$$

Вычислим мощность импульсов излучения:

$$P_0 = q_0 \cdot \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} = 70 \text{ Вт},$$

а энергия импульсов излучения равно  $W = P \cdot \tau = 7 \cdot 10^{-7}$  Дж.

Ответ:  $P_0 = 70$  Вт,  $W = 7 \cdot 10^{-7}$  Дж.

#### Задача 4.2.

Лазер на рубине излучает в импульсе длительностью  $\tau = 0,5 \cdot 10^{-3}$  с энергию  $W = 1$  Дж в виде почти параллельного пучка с площадью сечения  $S = 0,8 \text{ см}^2$ . Длина волны  $\lambda = 0,694 \text{ мкм}$ . Определить плотность потока фотонов в пучке и давление света на площадку, расположенную перпендикулярно пучку. Коэффициент отражения  $\rho = 0,6$ .

Решение

Плотность потока определяется выражением

$$j = \frac{N}{S \cdot \tau},$$

где  $N = \frac{W}{h \cdot \nu}$  - число фотонов,  $S$  - площадь сечения,  $\tau$  - длительность импульса. Следовательно, плотность потока равна

$$j = \frac{W \cdot \lambda}{h \cdot c \cdot S \cdot \tau} = \frac{1 \cdot 0,694 \cdot 10^6}{6,6256 \cdot 10^{-27} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 0,00008 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} = 872,8 \cdot 10^{28}$$

Давление света выражается формулой

$$p = \frac{I}{c} \cdot (1 - k + g),$$

где  $I = \frac{W}{S \cdot \tau}$  - интенсивность излучения,  $c$  - скорость света,  $k$  - коэффициент пропускания ( $k = 0$ ),  $g$  - коэффициент отражения ( $g = 0,6$ ).

Поставляя полученные значения, давление света будет равно

$$p = \frac{W}{c \cdot S \cdot \tau} \cdot (1 + g) = \frac{1}{3 \cdot 10^8 \cdot 0,00008 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} \cdot (1 + 0,6) = 0,13 \text{ Па}$$

Ответ:  $j = 872,8 \cdot 10^{28}$ ,  $p = 0,13 \text{ Па}$ .

#### Задачи для самостоятельной работы

1. Определить во сколько раз изменится диаметр пучка в фокусе линзы, если перед ней поставить телескопическую систему с увеличением  $b^x$ .

2. Рубиновый лазер за время  $\tau = 2 \cdot 10^{-3}$  с излучает  $N = 2 \cdot 10^{19}$  квантов на длине волны  $\lambda = 690 \text{ нм}$ . Найдите мощность  $P$  лазера.

Постоянная Планка  $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  Дж·с; скорость света в вакууме  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

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

4. Жидкий лазер, работающий в импульсном режиме, за один импульс, длящийся 1 мкс, излучает 0,1 Дж лучистой энергии. Расходимость излучения 2 мрад. Найти плотность потока излучения Солнца, падающего на Землю, равного  $1,36$  кВт/м<sup>2</sup>.

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

6. 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 1с?

## 5. СПИСОК ТЕМ ДЛЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ДОКЛАДОВ

Для ознакомления и расширения знаний, полученных из курса «Основы квантовой электроники» предоставлен список тем докладов:

1. Эксимерный лазер;
2. Лазер на красителях;
3. Твердотельные лазеры;
4. Лазер на свободных электронах;
5. Лазеры на парах металлов;
6. Полупроводниковый лазер.

Проанализируйте литературу по одной из тем, представленных из списка. Доклад представляется в виде интерактивной лекции, время



проведения 45-50 минут. Доклад можно готовить группой студентов из 2-3 человек.

## **6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. В чем отличия между спонтанным и вынужденным излучением?
2. Как связаны друг с другом коэффициенты спонтанного и вынужденного излучения и поглощения?
3. Что называется инверсной населенностью и почему она необходима для получения усиления в квантовой системе?
4. От каких факторов зависит пороговая инверсная населенность для излучения?
5. Чем характеризуется усиление сигнала в инверсной среде?
6. От каких факторов зависит ширина спектральной линии?
7. Как оценить естественную ширину спектральной линии?
8. Назовите основные элементы лазера.
9. Назовите и кратко охарактеризуйте основные способы накачки.
10. Каким методом можно получить инверсную населенность в двухуровневой системе?
11. Сформулируйте условия получения максимального уровня инверсии в трехуровневой системе.
12. Почему в четырехуровневой системе можно получать инверсную населенность при минимальном уровне накачки?
13. Укажите условия возникновения генерации излучения в квантовой системе.
14. Что такое насыщение усиления и как оно проявляется?
15. Что такое добротность оптического резонатора?
16. Укажите виды потерь энергии в резонаторе. Какие виды потерь являются полезными.
17. Укажите основные методы модуляции добротности.
18. Что такое когерентность излучения, и для каких областей применения лазеров она важна?
19. Как можно экспериментально наблюдать когерентность излучения лазера?

20. Какими факторами определяется расходимость лазерного излучения?
21. Что является минимальным пределом диаметра лазерного пучка?
22. Почему плотность мощности излучения лазеров может достигать очень больших величин?
23. Укажите активные ионы в лазерах на рубине, алюмоиттриевом гранате и неодимовом стекле.
24. Чем отличаются лазеры на алюмоиттриевом гранате и неодимовом стекле?
25. Укажите функции гелия в гелий-неоновом лазере.
26. Почему активная среда лазера на углекислом газе содержит азот и гелий?
27. Укажите, в смесях каких газов при разряде могут образовываться эксимерные молекулы.
28. Сформулируйте принцип работы полупроводникового лазера.
29. С чем связаны трудности создания полупроводниковых лазеров в синей области спектра?
30. В чем состоит основное достоинство жидкостных лазеров?

## **7. ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ**

Каждый студент самостоятельно решает 4 задачи из каждого раздела 1-4 методических указаний. Выполненная самостоятельная работа оценивается по 5-ти бальной шкале:

при правильном решении 50 % задач- оценка «3»;

при 65 % решенных задач- «4»;

при 80 % решенных задач- «5».

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ

1. Захаров, В. П. Лазерная техника [Текст] : учеб. пособие для вузов / В. П. Захаров, Е. В. Шахматов ; Федер. агентство по образованию, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева. - Самара : Изд-во СГАУ, 2006. – 311 с. - ISBN 5-7883-0468-7
2. Карлов, Н. В. Лекции по квантовой электронике [Текст] : учеб. руководство / Н. В. Карлов. - М. : Наука Глав. ред. физ.-мат. лит., 1988. - 336 с.. - ISBN 5-02-013855-X
3. Смирнов, А. Г. Квантовая электроника и опто-электроника [Текст] : учеб. пособие для вузов по специальности "Автоматика и электроника" / А. Г. Смирнов. - Минск : Вышэйш. шк., 1987. - 196 с.
4. Звелто, О. Принципы лазеров [Текст] / Пер. с англ. Д. Н. Козлова, С. Б. Созинова, К. Г. Адамович; под науч. ред. Т. А. Шмаонова. - М.: Краснодар, 2008. - 720 с.
5. Пихтин, А.Н. Оптическая и квантовая электроника [Текст] : учеб. пособие для вузов / А.Н. Пихтин. - М.: Высшая школа, 2001. - 573 с.
6. Паршаков, А. Н. Введение в квантовую физику [Текст] : учеб. пособие для вузов по техн. направлениям подгот. и специальностям / А. Н. Паршаков. - СПб. - М.: Краснодар : Лань, 2010. - 351 с.. - ISBN = 978-5-8114-0982-2.

*Учебное издание*

**СБОРНИК ЗАДАЧ ПО ОСНОВАМ КВАНТОВОЙ  
ЭЛЕКТРОНИКЕ**

*Методические указания к практическим работам*

Составители: Захаров Валерий Павлович  
Артемьев Дмитрий Николаевич

Самарский государственный национальный университет  
имени академика С.П. Королева» (Самарский университет)  
443086 Самара, Московское шоссе, 34