

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна

Должность: проректор по учебной работе

Дата подписания: 03.09.2021 17:58:39

Уникальный программный код:

0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabff73e943df6a4851fda566d089

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
О.Г. Локтионова
« 2 » _____ 2021 г.
(ЮЗГУ)



УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ 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.Н. Шевцов, А. А. Гуламов

Рецензент

Доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор
кафедры *В.Г. Андронов*

Устройство и принцип работы лазеров / Юго-Зап. гос. ун-т;
сост.: А.А. Гуламов, А.Н. Шевцов. - Курск, 2018. – с. 25: ил. 11 –
Библиогр.: с. 25.

Методические указания по выполнению практической работы предназначенные для студентов, обучающихся по специальности 10.05.02 содержат необходимые теоретические положения по устройству и принципам работы лазеров, а также ряд заданий для закрепления теоретического материала.

Методические указания соответствуют требованиям рабочей программы дисциплины «Квантовая и оптическая электроника», утверждённой методическими комиссиями 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 в системе высшего образования.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано печать 02.10.18. Формат 60x841/16.

Усл. печ. л. 1,45 .Уч.-изд. л. 1,31 .Тираж 100 экз. Заказ 2103 Бесплатно

Юго-Западный государственный университет.

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

1 Цели работы

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

2 Краткие теоретические сведения

Лазеры или оптические квантовые генераторы – это современные источники когерентного излучения, обладающие целым рядом уникальных свойств. Хотя первый оптический квантовый генератор был построен сравнительно недавно (1960г.), современную жизнь уже невозможно представить без лазеров. К настоящему времени создано большое количество лазеров с различными характеристиками – газовых, твердотельных, полупроводниковых, излучающих свет в различных оптических диапазонах.

Лазеры могут работать в импульсном и непрерывном режимах. Мощность излучения лазеров может изменяться в пределах от долей милливатта до 10^{12} – 10^{13} Вт (в импульсном режиме). Они находят широкое применение в военной технике, в технологии обработки материалов, в медицине, оптических системах навигации, связи и локации, в прецизионных интерференционных экспериментах, в химии, просто в быту. Информация с CDи DVDдисков считывается при помощи полупроводникового лазера, в военном деле, строительстве - лазерные нивелиры и дальномеры (лазерные рулетки).

Термин «лазер» означает («Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation») – усиление света стимулированным (вынужденным) лучеиспусканием. Одним из важнейших свойств лазерного излучения является очень высокая степень его монохроматичности, недостижимая в излучении другими световыми источниками. Это и все другие уникальные свойства лазерного излучения возникают в результате согласованного, кооперативного испускания световых квантов многими атомами рабочего вещества.

Чтобы понять принцип работы лазера, нужно более внимательно изучить процессы поглощения и излучения атомами квантов света. Атом может находиться в дискретных энергетических состояниях с энергиями E_1 , E_2 и т.д. (теории Бора). Стабильным состоянием, в котором атом в отсутствие внешних возмущений может находиться бесконечно долго, является только состояние с наименьшей энергией. Это состояние называют основным. Все другие состояния возбужденные или нестабильные. Возбужденный атом может пребывать в этих состояниях лишь очень короткое время, порядка 10^{-8} с, после этого он самопроизвольно переходит в одно из низших состояний, испуская квант света, частоту которого можно определить из второго постулата Бора $h\nu = E_2 - E_1$. Излучение, испускаемое при самопроизвольном переходе атома из одного состояния в другое, называют спонтанным. На некоторых энергетических уровнях атом может пребывать значительно большее время, порядка 10^{-3} с. Такие уровни называются метастабильными.

Переход атома в более высокое энергетическое состояние может происходить при резонансном поглощении фотона, энергия которого равна разности энергий атома в конечном и начальном состояниях. Переходы между энергетическими уровнями атома не обязательно связаны с поглощением или испусканием фотонов. Атом может приобрести или отдать часть своей энергии и перейти в другое квантовое состояние в результате взаимодействия с другими атомами или столкновений с электронами. Такие переходы называются безизлучательными.

Рассмотрим простейшую двухуровневую систему, в которой активная среда имеет уровень E_1 – основное состояние и уровень E_2 – возможное возбужденное состояние (рисунок 1). 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 .

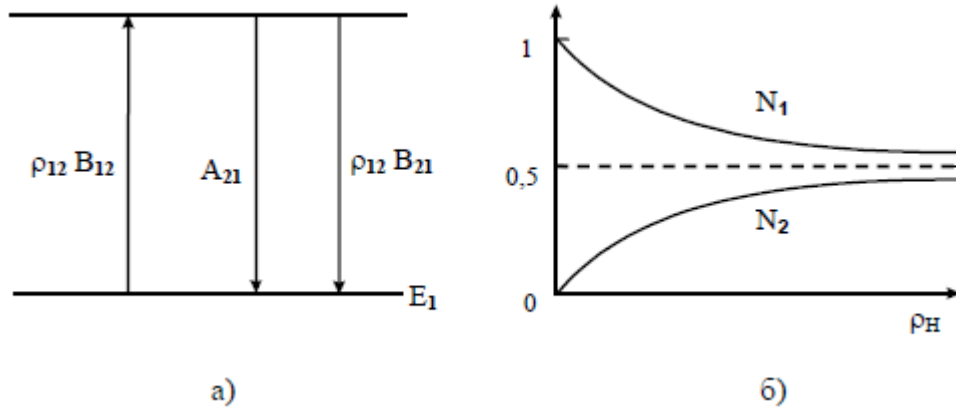


Рисунок 1 – Схема энергетических состояний двухуровневой квантовой системы (а) и зависимость относительной населенности рабочих уровней от плотности накачки (б).

В стационарном состоянии скорости населения и расселения уровня E_1 равны и уравнение баланса можно записать следующим образом:

$$\rho \cdot e_{12} \cdot N_1 = (\rho \cdot e_{21} + A_{21}) N_2$$

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

$$N_2 = \frac{\rho \cdot e_{21}}{A_{21} + 2\rho \cdot e_{21}} N, \quad N_1 = \frac{A_{21} + \rho \cdot e_{21}}{A_{21} + \rho \cdot e_{21}} N,$$

где ρ_n – 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.

Трехуровневые системы накачки

На рисунке 2 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.

Кинетические уравнения для стационарного случая будут иметь вид:

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

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

$$N_1 + N_2 + N_3 = N$$

где S – частота релаксации при излучательных и безизлучательных переходах, s^{-1} .

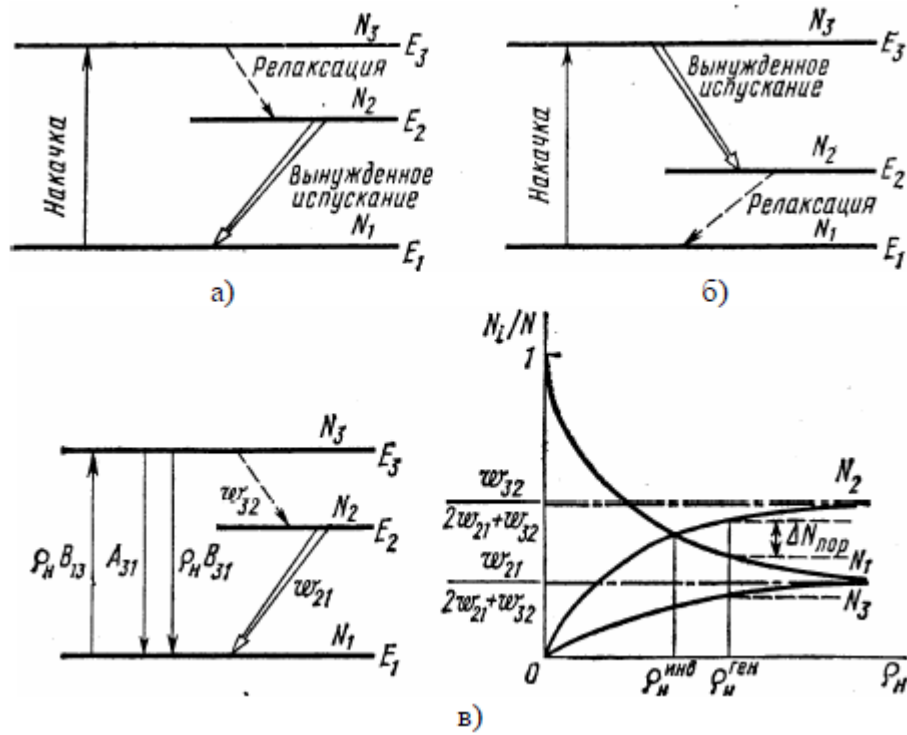


Рисунок 2 - Трехуровневые схемы первого (а) и второго (б) типов и зависимость относительной населенности уровней от плотности накачки (в)

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

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

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

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

Зависимость относительной населенности уровней от плотности накачки показана на рисунке 3,в. При больших плотностях накачки населенности основного и верхнего состояний выравниваются и стремятся к:

$$\lim N_1 = \lim N_3 = \frac{S_{21}}{2S_{21} + S_{32}} N,$$

а населенность уровня E_2 при $\rho \rightarrow \infty$ стремится к

$$\lim N_2 = \frac{S_{32}}{2S_{21} + S_{32}} N.$$

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. Приравнявая выражения для концентраций N_1 и N_2 , получим выражение для пороговой плотности накачки по инверсии:

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

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 система накачки

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 2. 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 рисунке 3,б. Сами балансные уравнения из-за их громоздкости не приводятся.

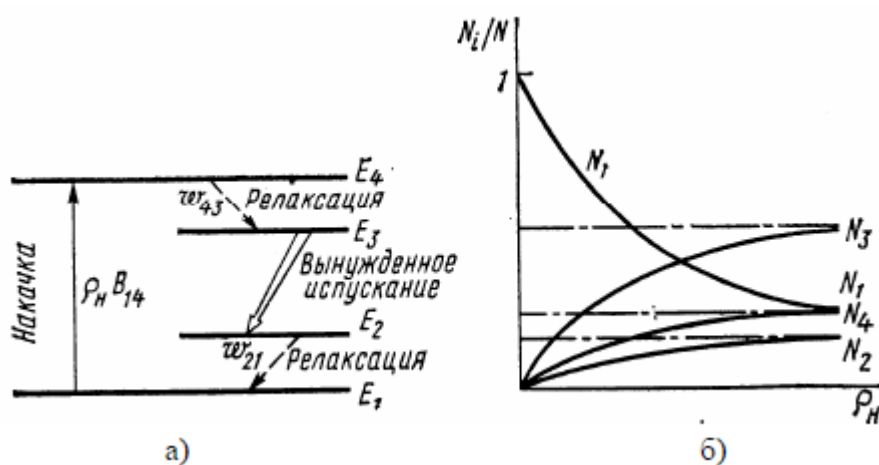


Рисунок 3 – Схема четырехуровневой системы (а) и зависимость относительной населенности уровней от плотности накачки (б)

Из рисунка 3б 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.

В заключение отметим ряд моментов, относящихся и к трех-, и к четырехуровневым системам.

1. Для исключения термического заселения необходимо, чтобы разности энергий между уровнями $E_4 - E_3$ и $E_2 - E_1$ были больше kT . Но следует иметь в виду, что при увеличении указанных разностей энергий уменьшается коэффициент полезного действия системы.

2. Для исключения самопоглощения, приводящего к переходам $E_1 - E_2$ и $E_3 - E_4$, желательно расселение уровней E_2 и E_4 путем безизлучательных переходов.

3. Вероятность безизлучательных переходов с верхнего лазерного уровня должна быть минимальной.

В 1916 году А. Эйнштейн предсказал, что переход электрона в атоме с верхнего энергетического уровня на нижний может происходить под влиянием внешнего электромагнитного поля, частота которого равна собственной частоте перехода. Возникающее при это излучение называют вынужденными индцированным. Вынужденное излучение обладает удивительным свойством. Оно резко отличается от спонтанного излучения. В результате взаимодействия возбужденного атома с фотоном атом испускает еще один фотон той же самой частоты, распространяющийся в том же направлении. На языке волновой теории это означает, что атом излучает электромагнитную волну, у которой частота, фаза, поляризация и направление распространения точно такие же, как и у первоначальной волны. С точки зрения квантовой теории, в результате взаимодействия возбужденного атома с фотоном, частота которого равна частоте перехода, появляются два совершенно одинаковых фотона-близнеца. Именно индцированное излучение является физической основой работы лазеров. На рисунке 4 схематически представлены возможные механизмы переходов между двумя энергетическими состояниями атома с поглощением или испусканием кванта света.

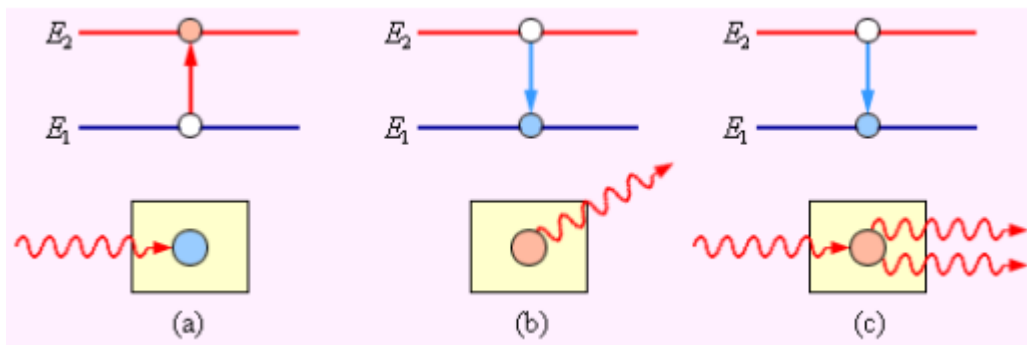


Рисунок 4 – Условное изображение процессов: а –поглощения; б– спонтанного испускания; с –индуцированного испускания кванта

В обычном состоянии число атомов, находящихся на возбужденных энергетических уровнях, определяется распределением Больцмана:

$$N = N_0 e^{(-E/kT)} \quad (1)$$

здесь N – число атомов, находящихся в возбуждённом состоянии с энергией E ; N_0 – число атомов, находящихся в основном состоянии; k –постоянная Больцмана; T –температура среды. Число атомов, находящихся в возбужденном состоянии меньше, чем в основном, поэтому вероятность того, что фотон, распространяясь по среде, вызовет вынужденное излучение, мала по сравнению с вероятностью его поглощения. Поэтому электромагнитная волна, проходя по веществу, расходует свою энергию, в основном, на возбуждение атомов. Интенсивность излучения при этом падает по закону Бугера

$$I = I_0 e^{(-\alpha_1 l)} \quad (2)$$

Здесь I_0 – начальная интенсивность; I – интенсивность излучения, прошедшего расстояние l в веществе; α_1 –показатель поглощения вещества. Поскольку зависимость экспоненциальная, излучение очень быстро поглощается. В том случае, когда число возбужденных атомов больше, чем невозбужденных (в состоянии инверсии населенностей), ситуация прямо противоположна. Акты

вынужденного излучения преобладают над поглощением, и излучение усиливается по закону:

$$I = I_0 e^{(-\alpha_2 l)} \quad (3)$$

где α_2 – коэффициент квантового усиления.

Рассмотрим слой прозрачного вещества, атомы которого могут находиться в состояниях с энергиями E_1 и $E_2 > E_1$. Пусть в этом слое распространяется излучение резонансной частоты перехода $\nu = \Delta E / h$. Согласно распределению Больцмана, при термодинамическом равновесии большее количество атомов вещества будет находиться в нижнем энергетическом состоянии. Некоторая часть атомов будет находиться и в верхнем энергетическом состоянии, получая необходимую энергию при столкновениях с другими атомами. Обозначим населенности нижнего и верхнего уровней, соответственно, через N_1 и $N_2 < N_1$. При распространении резонансного излучения в такой среде будут происходить все три процесса, изображенные на рисунке 1. Эйнштейн показал, что процесс (а) поглощения фотона невозбужденным атомом и процесс (с) индуцированного испускания кванта возбужденным атомом имеют одинаковые вероятности. Так как $N_2 < N_1$ поглощение фотонов будет происходить чаще, чем индуцированное испускание. В результате прошедшее через слой вещества излучение будет ослабляться. Излучение, возникающее в результате спонтанных переходов, некогерентно, распространяется во всевозможных направлениях и не дает вклада в проходящую волну. Что бы проходящая через слой вещества волна усиливалась, нужно искусственно создать условия, при которых $N_2 > N_1$, т.е., создать инверсную населенность уровней. Такая среда является термодинамически неравновесной. Идея использования неравновесных сред для получения оптического усиления впервые была высказана В.А. Фабрикантом в 1940 году. В 1954 году русские физики Н.Г. Басов, А.М. Прохорови независимо от них американский ученый Ч. Таунс использовали явление индуцированного испускания для создания микроволнового

генератора радиоволн с длиной волны $\lambda=1,27\text{см}$ (лазер). За разработку нового принципа усиления и генерации радиоволн в 1964 году все трое были удостоены Нобелевской премии.

Среда, в которой создана инверсная населенность уровней, называется активной. Она может служить резонансным усилителем светового сигнала. Для того чтобы возникала генерация света, необходимо использовать обратную связь. Для этого активную среду нужно расположить между двумя высококачественными зеркалами, отражающими свет назад так, чтобы он многократно прошел через активную среду, вызывая лавинообразный процесс индуцированной эмиссии когерентных фотонов. При этом в среде должна поддерживаться инверсная населенность уровней, когда в возбужденном состоянии число атомов больше, чем в основном. Создание инверсной населенности в лазерной физике принято называть накачкой.

Существуют различные способы получения среды с инверсной населенностью уровней. В рубиновом лазере используется оптическая накачка, атомы возбуждаются за счет поглощения света. Но для этого недостаточно только двух уровней. Каким бы мощным не был свет лампы – накачки, число возбужденных атомов не будет больше числа невозбужденных. В рубиновом лазере накачка производится через вышерасположенный третий уровень (рисунок 5).

После вспышки мощной лампы, расположенной рядом с рубиновым стержнем, многие атомы хрома, входящего в виде примеси в кристалл рубина (около 0,05%), переходят в состояние с энергией E_3 , а через промежуток $\tau \approx 10^{-8}$ сони переходят в состояние с энергией E_2 . Перенаселенность возбужденного уровня E_2 по сравнению с невозбужденным уровнем E_1 возникает из-за относительно большого времени жизни уровня E_2 . Уровень E_2 – метастабильный. Переход между уровнями E_3 и E_2 безизлучательный. Лазерный переход осуществляется между уровнями E_2 и E_1 . В кристалле рубина уровни E_1 , E_2 и E_3 принадлежат примесным атомам хрома.

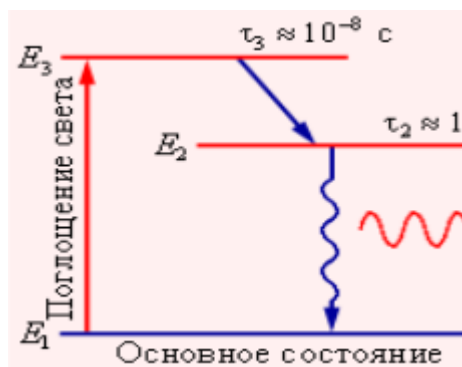


Рисунок 5 - Трехуровневая схема оптической накачки. Указаны «времена жизни» уровней E_2 и E_3

Начало лавинообразному процессу в такой системе при определенных условиях может положить случайный спонтанный акт, при котором возникает излучение, направленное вдоль оси системы. Через некоторое время в такой системе возникает стационарный режим генерации. Лазерное излучение выводится наружу через одно из зеркал, обладающее частичной прозрачностью. На рисунке 6 схематически представлено развитие лавинообразного процесса.

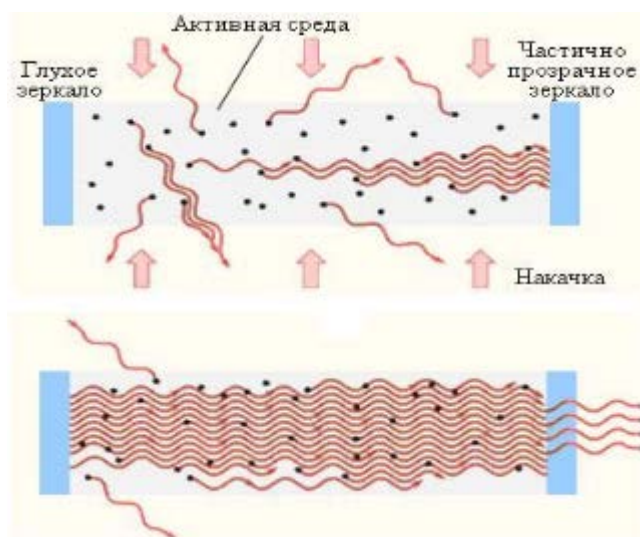


Рисунок 6 - Развитие лавинообразного процесса генерации в лазере

Лазер обязательно имеет три основных компонента: 1) активную среду, в которой создаются состояния с инверсией населенностей; 2) систему накачки (устройство для создания инверсии в активной среде);

3) оптический резонатор (параллельные зеркала).

Лазер на рубине работает в импульсном режиме на длине волны 694 нм, мощность излучения может достигать 10^6 – 10^9 Вт в импульсе. В настоящее время одним из самых распространенных является газовый лазер на смеси гелия и неона. Общее давление в смеси составляет порядка 10^2 Па при соотношении компонент He и Ne примерно 10:1.

Активным газом, на котором в непрерывном режиме возникает генерация на длине волны 632,8 нм (ярко-красный свет), является неон. Гелий –буферный газ, он участвует в механизме создания инверсной населенности одного из верхних уровней неона. Излучение He–Ne лазера обладает непревзойденной монохроматичностью. Расчеты показывают, что спектральная ширина линии генерации He–Ne лазера составляет примерно $\Delta\nu \approx 5 \cdot 10^{-3}$ Гц. Это чрезвычайно малая величина. Время когерентности такого излучения оказывается порядка $\tau \approx 1/\Delta\nu \approx 2 \cdot 10^3$ с.

На практике многие технические причины мешают реализовать столь узкую спектральную линию He–Ne лазера. Путем тщательной стабилизации всех параметров лазерной установки удается достичь относительной ширины $\Delta\nu/\nu$ порядка 10^{-14} – 10^{-15} , что примерно на 3–4 порядка хуже теоретического предела. Но и реально достигнутая монохроматичность излучения He–Ne лазера делает этот прибор совершенно незаменимым при решении многих научных и технических задач. Первый гелий-неоновый лазер был создан в 1961 году. На рисунке 7 представлена упрощенная схема уровней гелия и неона и механизм создания инверсной населенности лазерного перехода.

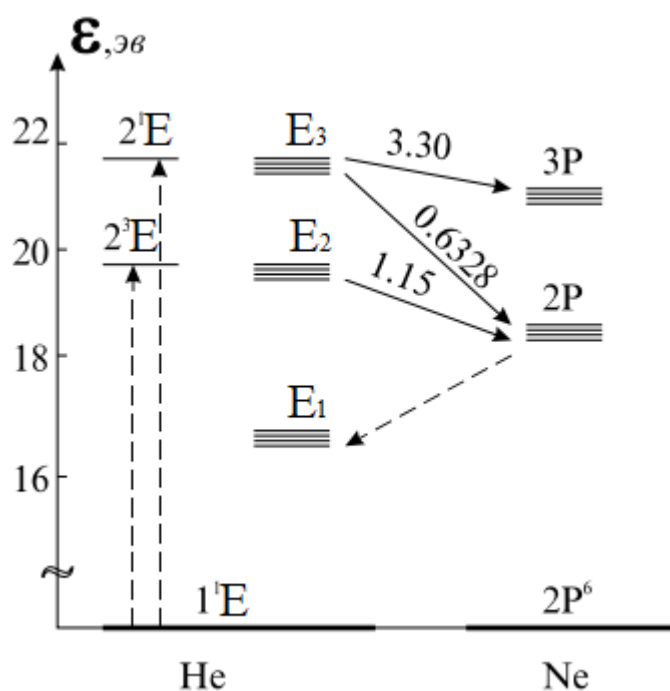


Рисунок 7 - Механизм накачки He–Ne лазера. Прямыми стрелками изображены спонтанные переходы в атомах неона

Накачка лазерного перехода в неоне осуществляется следующим образом. В высоковольтном электрическом разряде вследствие соударений с электронами значительная часть атомов гелия переходит в верхнее метастабильное состояние E_2 . Возбужденные атомы гелия неупруго сталкиваются с атомами неона, находящимися в основном состоянии, и передают им свою энергию. Уровень E_4 неона расположен на 0,05 эВ выше метастабильного уровня E_2 гелия. Недостаток энергии компенсируется за счет кинетической энергии соударяющихся атомов. На уровне E_4 неона возникает инверсная населенность по отношению к уровню E_3 , который сильно обедняется за счет спонтанных переходов на нижерасположенные уровни. При достаточно высоком уровне накачки в смеси гелия и неона начинается лавинообразный процесс размножения идентичных когерентных фотонов. Если кювета со смесью газов помещена между отражающими зеркалами, то возникает лазерная генерация. На рисунке 8 изображена схема гелий-неонового лазера.

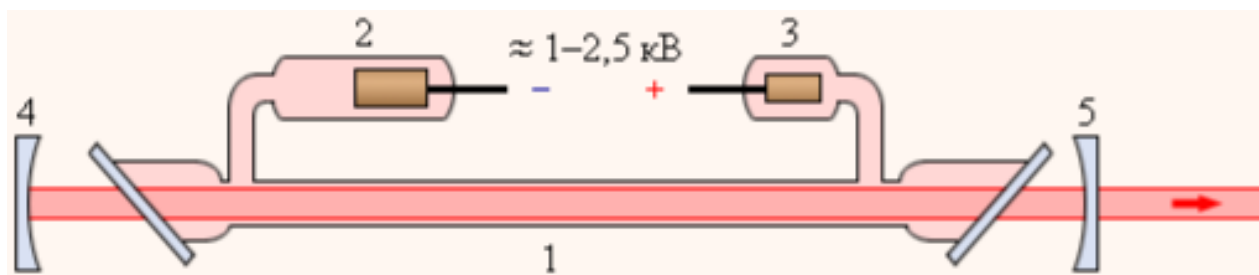


Рисунок 8 – Схема гелий-неонового лазера: 1 – стеклянная кювета со смесью гелия и неона; 2 – катод; 3 – анод; 4 – сферическое зеркало с пропусканием менее 0,1%; 5 – сферическое зеркало с пропусканием 1–2%

Современные высокостабильные гелий-неоновые лазеры производятся в моноблочном исполнении. Для этого используется стеклообразное вещество – ситалл, обладающий практически нулевым температурным коэффициентом расширения. В куске ситалла в форме прямоугольного параллелепипеда просверливается канал, к торцам которого на оптическом контакте приклеиваются лазерные зеркала. Канал заполняется смесью гелия и неона. Катод и анод вводятся через дополнительные боковые каналы. Такая моноблочная конструкция обеспечивает высокую механическую и тепловую стабильность.

Полупроводниковым называется лазер, активной средой которого является полупроводниковый кристалл, а точнее, область р-п перехода. Помимо компактности, полупроводниковые лазеры обладают высоким кпд (до 50%). А большой выбор современных полупроводниковых материалов обеспечивает генерацию в широком спектральном диапазоне (от 0,3 мкм до 30 мкм). Эти качества обеспечили полупроводниковым лазерам широкое применение в различных областях современной деятельности человека.

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, описанной выше, поэтому имеет сравнительно низкую пороговую мощность накачки. Алюмо-иттриевый гранат является уникальным лазерным материалом, так как обладает высокой теплопроводностью, большой твердостью и хорошими оптическими 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%.

Возбуждение среды происходит с помощью оптической накачки: в импульсном режиме – ксеноновыми импульсными лампами с цилиндрическим отражателем; в непрерывном режиме – галогенными лампами и криптоновыми дуговыми лампами с эллиптическими отражателями. В последние годы активно используется полупроводниковая лазерная накачка. Пороговая энергия составляет менее 5 Дж. Максимальная мощность лазерного излучения в импульсном режиме достигает 10^9 Вт, в непрерывном режиме – 500 Вт. КПД составляет примерно 1%. В кристаллах ИАГ однородное уширение составляет примерно 0,7 нм.

Оптические умножители частоты позволили существенно расширить область применения лазеров. Эффект генерации оптических гармоник широко используется для преобразования излучения длинноволновых лазеров в излучение коротковолновых диапазонов. Промышленность многих стран выпускает оптические умножители частоты на неодимовом стекле или на алюмоиттриевом гранате с примесью неодима ($\lambda = 1,06$ мкм), позволяющие получить мощное когерентное излучение на волнах $\lambda = 0,53$ мкм (2-я гармоника), $\lambda = 0,35$ мкм (3-я гармоника) и $\lambda = 0,26$ мкм (4-я гармоника).

Области применения неодимовых лазеров на гранате и стекле существенно различны. В силу большей теплопроводности и однородности гранатовые лазеры легко работают в непрерывном и импульсно-периодическом режимах. Достигнуты средние

мощности $\sim 10^2$ Вт. Неодимовое стекло в силу больших объёмов и более высокой концентрации активатора хорошо накапливает энергию. Поэтому именно стекло служит активной средой импульсных лазеров высокой энергии. Достигнуты значения импульсной энергии в десятки кДж.

Неодимовые лазеры работают в широком диапазоне режимов генерации, от непрерывного до существенно импульсного с длительностью, достигающей 0,5 пс. Последняя достигается методом синхронизации мод в широкой линии усиления, характерной для лазерных стёкол.

При создании неодимовых лазеров реализованы все характерные методы управления параметрами лазерного излучения, разработанные квантовой электроникой. В дополнение к свободной генерации, продолжающейся в течение практически всего времени существования импульса накачки, широкое распространение получили режимы модулированной добротности и синхронизации (самосинхронизации) мод.

В режиме свободной генерации длительность импульсов излучения составляет $0,1 \cdot 10^{-10}$ мс, энергия излучения в схемах усиления мощности достигает многих кДж. Характерная длительность импульсов модулируемой добротности составляет около 10 нс при использовании для модуляции добротности электронно-оптических устройств. Дальнейшее укорочение импульсов генерации достигается применением просветляющих фильтров как для модуляции добротности ($0,1 \cdot 10^{-10}$ нс), так и для синхронизации мод (1-10 пс). Области применения неодимовых лазеров - технология, медицина, метеорология, дальнометрия, лазерный термоядерный синтез, физические исследования.

Волоконные лазеры были разработаны сравнительно недавно, в 1980-х годах прошлого столетия. В настоящее время известны модели волоконных технологических лазеров мощностью до 30 кВт. Эти устройства имеют невысокую стоимость, компактны, удобны для сопряжения с магистральным волокном при минимуме вносимых потерь. Сегодня эти устройства достигли уровня характеристик, в первую очередь, мощности, надежности, позволяющих с успехом использовать их для решения различных

задач лазерной обработки материалов. Они представляют собой практически идеальные преобразователи световой энергии лазерных диодов накачки в лазерное излучение с рекордным эффективным КПД, достигающим 65 %.

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. Волокно в разрезе представлено на рисунок 9.

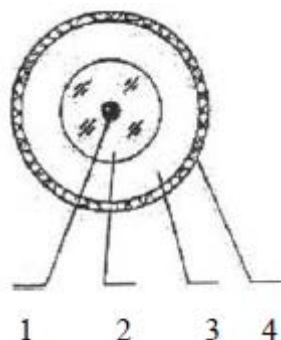


Рисунок 9 – Сечение волокна:

1 - сердцевина, легированная редкоземельным элементом; 2 - кварцевое волокно; 3 - полимерная оболочка; 4 - внешнее защитное покрытие

Внутреннее волокно 1, содержащее активные ионы (например, ионы иттербия), имеет диаметр несколько десятков мкм и находится внутри кварцевого (центрального) волокна 2 диаметром 400-600 мкм. Внутренние стенки волокна покрыты светоотражающим слоем, поэтому движущийся поток квантов претерпевает многократное отражение.

Все световые волны, многократно отражаясь, накладываются, тем самым образуя стоячую волну.

Длина волны излучения определяется типом легирующих ионов, а ширина спектра генерации зависит от материала, в который они введены. Используя различные редкоземельные элементы в качестве добавок и подбирая состав волокна, можно

получить большой набор генерируемых длин волн, в том числе 1,3 и 1,5 мкм, а также перспективный в будущем диапазон среднего ИК-излучения – 2-3 мкм. Для увеличения мощности излучения волоконных лазеров следует увеличивать концентрацию ионов легирующей примеси.

В волоконном лазере накачка осуществляется лазерными полупроводниковыми диодами с одномодовым излучением. Схема конструкции волоконного лазера приведена на рисунок 10.

Излучение лазерных диодов накачки (8) вводится в кварцевое волокно (2), через которое осуществляется накачка активных ионов, на которых происходит генерация лазерного излучения. На торцах волокна размещен оптический резонатор (два зеркала, одно из которых полупрозрачное). Через полупрозрачное зеркало выходит идеальный одномодовый лазерный пучок с весьма равномерным распределением мощности, что позволяет сфокусировать излучение в пятно малого размера.

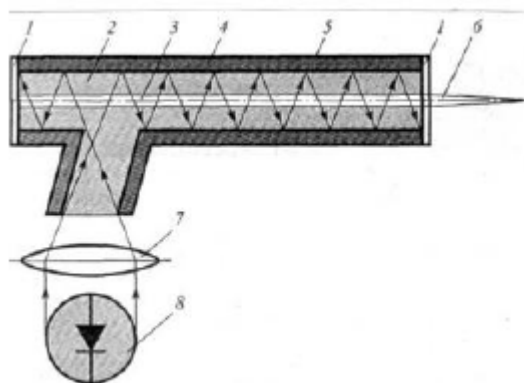


Рисунок 10 – Схема волоконного лазера:

- 1 – торцевое зеркало; 2 – оптическое кварцевое волокно; 3 – активированное световедущее волокно; 4 – светоотражающее покрытие; 5 – защитная оболочка; 6 – лазерный луч; 7 – фокусирующая линза; 8 – светодиоды

Главная особенность этого лазера состоит в том, что излучение здесь рождается в тонком, диаметром всего 68 мкм, волокне (сердцевине), которое находится внутри кварцевого волокна диаметром 400 - 600 мкм. Излучение лазерных диодов накачки вводится в кварцевое волокно и распространяется вдоль

всего сложного составного волокна, имеющего в длину несколько десятков метров.

В отличие от лазеров других типов, в полупроводниковых лазерах используются излучательные квантовые переходы между разрешенными энергетическими зонами, а не между дискретными уровнями энергии. Инверсная населенность создается с помощью инжекции через p-n переход неравновесных носителей тока, путем приложения внешнего напряжения в прямом направлении. Наряду с генерацией неравновесных носителей существует обратный процесс – рекомбинация электронов и дырок – переход электронов из зоны проводимости в валентную зону, в результате чего происходит исчезновение электронов и дырок. Рекомбинация может сопровождаться излучением фотонов, что и лежит в основе работы полупроводниковых светодиодов и лазеров. Если для этих фотонов создать обратную положительную связь в виде оптического резонатора, то в области p-n перехода при протекании тока в прямом направлении можно получить лазерную генерацию.

На рисунке 11 схематично представлена конструкция полупроводникового лазера. В таком лазере резонатор создается полировкой двух диаметрально противоположных сторон кристалла, перпендикулярных плоскости p-n перехода. Эти плоскости делаются параллельными и полируются с высокой степенью точности. Выходную поверхность можно рассматривать как щель, через которое проходит излучение. Угловая расходимость излучения лазера определяется дифракцией излучения на этой щели. При толщине p-n перехода в 20 мкм и ширине – 120 мкм угловая расходимость соответствует приблизительно 30 в плоскости XZ и 10– в плоскости YZ.

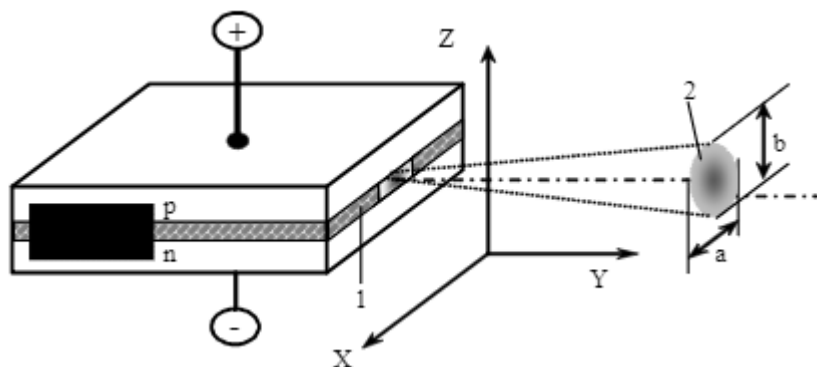


Рисунок 11 – Принципиальная схема лазера на p-n переходе: 1– активный слой; 2–сечение лазерного пучка в плоскости XY

В современных полупроводниковых лазерах широко используются так называемые полупроводниковые гетероструктуры, в разработку которых значительный вклад внес академик РАН Ж.И. Алферов (Нобелевская премия 2000 года). Лазеры на основе гетероструктур обладают лучшими характеристиками, например, большей выходной мощностью и меньшей расходимостью.

3. Задание на практическую работу.

1. Определить мощность и энергию импульсов излучения N2– лазера при длительности $\tau = 10^{-8}$ с, необходимые для достижения плотности мощности излучения в фокусе $q_0 = 10^7$ Вт/см², если расходимость пучка 1 мрад, а фокусное расстояние оптической системы 3 см.

2. Привести соотношения между импульсной и средней мощностью излучения, плотностью энергии и плотностью мощности. Привести характерную зависимость порогов разрушения (плотности мощности) от длительности воздействия.

3. Определить плотность мощности лазерного излучения на обрабатываемой поверхности в центре облученной области, если известна мощность излучения P и распределение плотности мощности излучения

а) гауссово - $q = q_0 e^{-(r/r_0)^2}$

б) постоянное в пределах облученной области

$$q = \begin{cases} q_0 & \text{при } r \leq r_0, \\ 0 & \text{при } r > r_0. \end{cases}$$

4. Определить распределение интенсивностей в многолучевой лазерной системе для случайного и постоянного сдвига фаз φ излучения отдельных лазеров, если излучение каждого из них поляризовано в одной и той же плоскости и колебания их

электрического поля описываются формулой

$$E_i = E_0 \cos(\omega t + \varphi_i)$$

5. Рассмотреть различные методы обеспечения импульсного режима воздействия (режимы свободной генерации, модуляции добротности и синхронизации мод) и сравнить их по следующим параметрам: КПД, энергия импульса, длительность импульса, средняя и импульсная мощность, частота следования импульсов.

6. Рассчитать длину l_0 и диаметр d_0 световой трубки, образующейся при фокусировке пучка лазерного излучения диаметром D_0 и расходимостью θ линзой с фокусным расстоянием f .

7. Определить расходимость излучения лазера, обеспечивающую пятно диаметром 0.5 мм на поверхности Фобоса, если лазер удален от его поверхности на расстояние 100 м. Предложить оптическую схему.

8. Рассчитать пространственно - геометрические характеристики лазерных пучков (одномодового, многомодового, дифракционно - ограниченного и теоретические): угол расходимости, размер фокального пятна и глубину резкости.

9. Построить рабочее поле в сканирующей системе по значениям допустимых отклонений $\Delta d = 200$ мкм размера фокального пятна $d = 50$ мкм в плоскости обработки для YAG:Nd-лазера. Фокусное расстояние оптической системы 60 см, расстояние от центра зеркала до обрабатываемой поверхности – 50 см.

10. Дать размерные и энергетические характеристики микропроекционной оптической схемы. Сравнить с условиями обработки в схеме без осветительной системы, без проекционной системы.

4. Контрольные вопросы

1. Расскажите про основные отличия лазерного излучения от излучений других типов?

2. Какие основные области применения лазеров?

3. Расскажите про процессы поглощения, спонтанного и индуцированного испускания кванта?

4. Какие из возбужденных уровней называются метастабильными?

5. Что такое инверсная населенность уровней и как она создается?

6. Из каких основных компонент состоит лазер?

7. Что представляет собой оптический резонатор и его назначение?

8. Чем объясняется высокая монохроматичность и направленность лазерного излучения?

5 Список литературы

1. Квантовая и оптическая электроника [Текст] : учебное пособие / Г. Л. Киселев. - Изд. 2-е, испр. и доп. - СПб. [и др.] : Лань, 2011. - 320 с. : ил. - ISBN 978-5-8114-11 14-6.

2. Квантовая и оптическая электроника [Электронный ресурс] : учебное пособие / Л. И. Шангина. - Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. - 303 с.

3. Дудкин, В.И., Пахомов Л.Н. Квантовая электроника. Приборы и их применение : учеб. пособие для вузов. - М. : Техносфера, 2006. - 432 с. – ISBN 5-94836-076-8

4. Пихтин А.Н. Оптическая и квантовая электроника: Учеб. Для вузов/ А.Н. Пихтин.- М: Высш. Шк., 2001.- 573 с.: ил. ISBN 5-06-002703-1

5. Светцов, В.И. Оптическая и квантовая электроника: учеб. пособие / В.И. Светцов; Иван. гос. хим.-техн. ун-т; - 2-е изд., исправл. и доп. - Иваново, 2010. 196 с. ISBN 978-5-9616-0386-6