

Министерство образования и науки РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

ВВЕДЕНИЕ В ЛАЗЕРНУЮ ТЕХНИКУ
сборник учебно-методических материалов
для направления подготовки
03.03.02 – Физика

Благовещенск 2017

*Печатается по решению
редакционно-издательского совета
инженерно-физического факультета
Амурского государственного
Университета*

Составитель: Верхотурова И.В.

Введение в лазерную технику: сборник учебно-методических материалов для направления подготовки 03.03.02.– Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2017.

© Амурский государственный университет, 2017

© Кафедра физики, 2017

© Верхотурова И.В., составление

ВВЕДЕНИЕ

Первые выдающиеся достижения в создании оптических квантовых генераторов – лазеров – открыли новую, невероятно перспективную область технологических решений, широко используемых теперь в науке и технике. И поэтому никого не удивляет последовавшее быстро прогрессирующее развитие как фундаментальной науки, посвященной физическим основам генерации лазерного излучения, так и самой лазерной техники. Широта современных возможностей лазеров впечатляет. К настоящему времени трудно представить область деятельности человека, в которой не использовались бы лазеры.

В рамках изучения дисциплины у студентов формируется уровень знаний соответствующий современному состоянию вопросов теории лазерной генерации и устройства приборов квантовой электроники и их возможностей.

Для формирования умений и навыков в учебной программе дисциплины предусмотрены лекции, практические занятия, а также самостоятельная работа студентов, роль которой в настоящее время в системе высшего образования значительно возросла и является формой самообразования.

В процессе обучения происходит закрепление и систематизация знаний, углубление теоретических знаний, развитие умений работать с различными источниками информации и как результат – освоения основных компетенций.

1 КРАТКИЙ КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

1.1 Общие рекомендации по организации работы на лекции

В высшем учебном заведении лекция является важной формой учебного процесса и представляет собой в основном устное систематическое и последовательное изложение материала по какой-либо проблеме, методу, теме вопроса и т. д.

Основные функции, которые осуществляет вузовская лекция – это информативная, ориентирующая и стимулирующая, методологическая, развивающая и воспитывающая, поскольку на лекции студенты получают глубокие и разносторонние знания, развивают свои творческие способности.

Лекции могут быть вводными, обзорными, тематическими (лекции по изучению нового материала), итоговыми.

Вводные лекции подготавливают студента к восприятию данной дисциплины или ее модуля. На вводной лекции излагаются цели и задачи дисциплины, ее актуальность, практическая значимость, методы научного исследования и т.д. для того, чтобы дать целостное представление о дисциплине и вызывать интерес к предмету.

Тематические лекции посвящены глубоко осмысленному и методически подготовленному систематическому изложению содержания курса (дисциплины).

Итоговая лекция содержит основные идеи и выводы по курсу, выводы о достижении поставленных учебных целей.

На обзорных лекциях рассматриваются наиболее сложные, проблемные вопросы курса или новейшие достижения в данной области, что позволит установить взаимосвязь учебного материала с производством и новейшими научными достижениями.

Подготовка к самостоятельной работе над лекционным материалом должна начинаться на самой лекции. На лекции студент должен совместить два момента: внимательно слушать лектора, прикладывая максимум усилий для понимания излагаемого материала и одновременно вести его осмысленную запись. И как бы внимательно студент не слушал лекцию, большая часть информации вскоре после восприятия будет забыта. Поэтому при изучении дисциплины студентам рекомендуется составлять подробный конспект лекций, так как это обеспечивает полноценную систематизацию и структурирование материала, подлежащего изучению. Конспект лекций должен отражать специфику данного курса, которая состоит в обобщении

физической теории, рассматривающей процессы обмена энергией в макроскопических системах, на случай сложных, полифункциональных систем.

Очень важным является умение правильно конспектировать лекционный материал и работать с ним. Ниже приведены *рекомендации по конспектированию лекций и дальнейшей работе с записями*.

1. Конспект лекций должен быть в отдельной тетради. Ее нужно сделать удобной, практичной и полезной, ведь именно она является основным информативным источником при подготовке к различным отчетным занятиям, зачетам, экзаменам. Возможно ее сочетание с записями по практическим занятиям, иллюстрирующим применение теоретических законов и соотношений в решении практических задач.

2. Конспект должен легко восприниматься зрительно (чтобы максимально использовать «зрительную» память), поэтому он должен быть аккуратным. Выделяйте заголовки, отделите один вопрос от другого, соблюдайте абзацы, подчеркните термины.

3. При прослушивании лекции обращайтесь внимание на интонацию лектора и вводные слова «таким образом», «итак», «необходимо отметить» и т.п., которыми он акцентирует наиболее важные моменты. Не забывайте пометить это при конспектировании.

4. Не пытайтесь записывать каждое слово лектора, иначе потеряете основную нить изложения и начнете писать автоматически, не вникая в смысл. Не нужно просить лектора несколько раз повторять одну и ту же фразу для того, чтобы успеть записать. Лекция не должна превращаться в своеобразный урок-диктант. Техника прочтения лекций преподавателем такова, что он повторяет свою мысль два-три раза. Постарайтесь вначале понять ее, а затем записать, используя сокращения.

Конспектируйте только самое важное в рассматриваемом параграфе: формулировки определений и законов, выводы основных уравнений и формул, то, что старается выделить лектор, на чем акцентирует внимание студентов.

Старайтесь отфильтровывать и сжимать подаваемый материал. Научитесь в процессе лекции разбивать текст на смысловые части и заменять их содержанием короткими фразами и формулировками. Более подробно записывайте основную информацию и кратко – дополнительную.

5. По возможности записи ведите своими словами, своими формулировками. Используйте общепринятую в данном разделе физики аббревиатуру и систему сокращений. Придумайте собственную систему сокращений, аббревиатур и символов, удобную только вам (но не

забудьте сделать словарь, иначе существует угроза не расшифровать текст). Однако при дальнейшей работе с конспектом символы лучше заменить обычными словами для быстрого зрительного восприятия текста.

6. Конспектируя лекцию, надо оставлять поля, на которых позднее, при самостоятельной работе с конспектом, можно сделать дополнительные записи, отметить непонятные места. Полезно после каждой лекции оставлять одну страницу свободной, она потребуется при самостоятельной подготовке. Сюда можно будет занести дополнительную информацию по данной теме, полученную из других источников: чертежи, графики, схемы, и т.п.

7. После прослушивания лекции необходимо проработать и осмыслить полученный материал. Насколько эффективно студент это сделает, зависит и прочность усвоения знаний, и, соответственно, качество восприятия предстоящей лекции, так как он более целенаправленно будет её слушать. В процессе изучения лекционного материала рекомендуется использовать опорные конспекты, учебники и учебные пособия.

1.2 Краткое содержание курса лекций

ТЕМА 1. ИСХОДНЫЕ КОНЦЕПЦИИ

План лекции:

Спонтанное и вынужденное излучение, поглощение. Усиление и генерация электромагнитного излучения. Принцип действия и устройство лазера. Схемы накачки. Классификация лазеров .

Спонтанное и вынужденное излучение, поглощение. Усиление и генерация электромагнитного излучения.

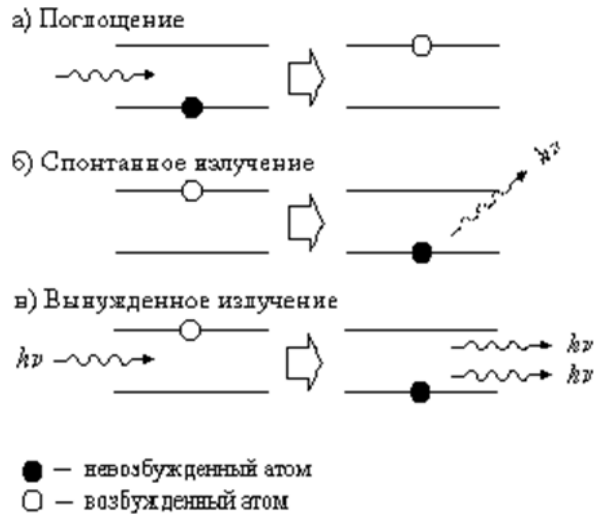
В лазере используются три фундаментальных явления, происходящих при взаимодействии электромагнитных волн с веществом, а именно процессы спонтанного и вынужденного излучения и процесс поглощения.

Рассмотрим в некоторой среде два энергетических уровня с энергиями E_m и E_n ($E_n < E_m$) (удобно принять уровень n за основной).

Пусть атом или молекула находятся в возбужденном состоянии на уровне m и обладает энергией E_m , такое возбужденное состояние не устойчивое. Спустя некоторое время частица самостоятельно переходит в нижнее не возбужденное состояние n , при этом излучается квант энергии:

$$h\nu = E_m - E_n$$

Такой переход называется самопроизвольный (спонтанный). Спонтанный переход – это излучение некогерентное и неполяризованное.



Уравнение для скорости спонтанного излучательного перехода:

$$\left(\frac{dN_m}{dt} \right)_s = -AN_m$$

Число фотонов в спонтанном излучении:

$$Z_{mn}^c = A \cdot N_m$$

Пусть атом или молекула находится на нижнем уровне n , на него падает внешнее излучение в результате чего он совершает переход на высший уровень, поглощая квант энергии - этот процесс называется вынужденным поглощением (поглощением).

Уравнение для скорости вынужденного поглощательного перехода:

$$\left(\frac{dN_n}{dt} \right) = -B_{nm} N_n$$

Количество поглощенных квантов:

$$Z_{nm}^e = B_{nm} \rho N_n$$

Если атом или молекула находится на высшем уровне m и на систему падает внешнее излучение, частотой ν , то под действием излучения атом переходит на нижний уровень n , излучая квант энергии.

Уравнение для скорости вынужденного излучательного перехода:

$$\left(\frac{dN_m}{dt} \right)_i = -B_{mn} N_m$$

Число квантов, излученных под действием излучения:

$$Z_{mn}^e = B_{mn} \rho N_m$$

Излученный фотон идентичен фотону, падающему на этот атом, говорят, что вторичный фотон является точной копией первичного, поэтому эти фотоны когерентны.

Коэффициенты A_{mn} , B_{nm} , B_{mn} – называются коэффициентами Эйнштейна.

Принцип детального равновесия – это закон сохранения по количеству переходов:

$$Z_{mn}^c + Z_{mn}^e = Z_{nm}^e$$

В обычных условиях населенность уровня m всегда меньше населенности уровня n , поэтому проходя через среду излучение ослабляется. Если на уровне m будет больше чем n , то при прохождении через эту среду излучение усиливается: $g_m N_n < g_n N_m$.

Принцип действия и устройство лазера.

Для создания усиливающих сред необходимо достижения неравновесного состояния или так называемого состояния с инверсной заселённостью, для которой справедливо соотношение $N_n < N_m$. Среда, в которой удаётся добиться инверсной заселённости, называется активной средой. Наличие усиливающей среды является первым необходимым, но не единственным условием для создания оптического квантового генератора.

Второе условие для создания ОКГ – резонанс – совпадение частоты падающего света с одной из частот спектра атома активной среды.

Третье условие – наличие положительной обратной связи. В лазере обратную связь обычно получают размещением активной среды между двумя зеркалами с высоким коэффициентом отражения. Такую систему обратной связи называют резонатором Фабри-Перо.

Четвертое условие - в лазере генерация излучения начинается тогда, когда усиление активной среды компенсирует потери в нем.

Когда инверсия населенностей приближается к некоторому критическому значению достигается порог. Разность населенностей $(N_2 - N_1)_{kr}$ называется критической инверсией и определяется соотношением:

$$(N_2 - N_1)_{kr} = -\frac{\ln(R_1 R_2)}{2B\ell}$$

Как только достигнута критическая инверсия, генерация разовьётся из спонтанного излучения.

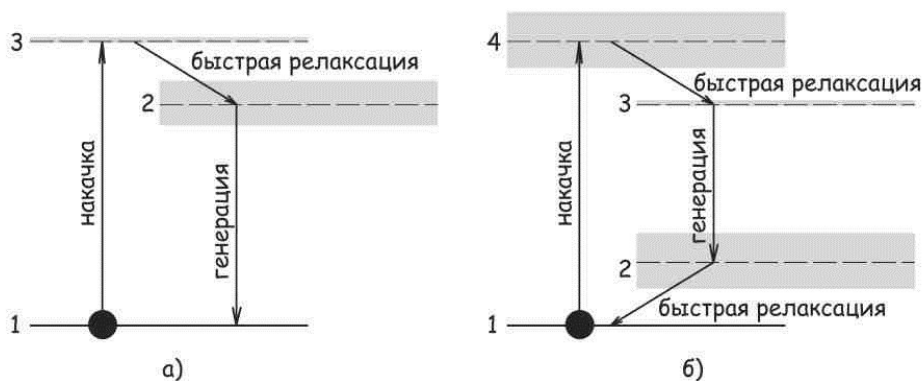


Схемы накачки.

Невозможно обеспечить инверсию заселённости, используя 2-х уровневую схему накачки. Даже при интенсивной накачке активной среды волной с высокой плотностью энергии в момент, когда наступят условия, при которых населенности уровней окажутся одинаковыми ($N_2 = N_1$), процессы вынужденного излучения и поглощения начнут компенсировать друг друга, и среда станет прозрачной. В такой ситуации обычно говорят о двухуровневом насыщении.

Таким образом, используя только два уровня, невозможно получить инверсию населенностей.

Подобное обстоятельство позволяет создать инверсную заселённость энергетических уровней, используя трёх- или четырёхуровневую схему накачки.



В четырёхуровневом лазере инверсию получить гораздо легче. По возможности следует искать активные среды, работающие по четырёхуровневой схеме.

Классификация лазеров

1. По физическому состоянию активной среды:

- твердотельные;
- жидкостные;
- газовые;
- на свободных электронах.

2. По длине волны генерируемого излучения:

- инфракрасного диапазона;
- видимого диапазона;
- ультрафиолетового диапазона;
- рентгеновского диапазона.

3. По типу генерации:

- импульсный;
- непрерывный.

4. По длительности импульса:

- фемтосекундные;
- пикосекундные;
- наносекундные;
- миллисекундные.

5. По мощности:

- милливаттные;
- мегаваттные;
- терраваттные.

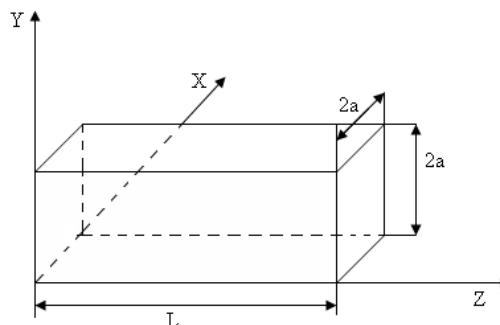
ТЕМА 2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ С АТОМАМИ И ИОНАМИ

План лекции:

Основы теории излучения черного тела. Спонтанное излучение. Поглощение и вынужденное излучение. Механизмы уширения линий. Безызлучательные переходы и передача энергии. Насыщение. Люминесценция в оптически плотной среде.

Основы теории излучения черного тела.

Рассмотрим замкнутую полость с малым отверстием, которая заполнена однородной и изотропной диэлектрической средой, стенки полости поддерживаются при постоянной температуре T .



Определим типы стоячих волн электромагнитного поля, которые могут существовать в данной полости.

Напряженность электрического поля $E(x, y, z, t)$ должна удовлетворять волновому уравнению:

$$\nabla^2 \vec{E} - \left(\frac{1}{c^2} \right) \left(\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \right) = 0$$

Напряженность электрического поля должна удовлетворять граничному условию на каждой из стенок полости: $\vec{E} \times \vec{n} = 0$

Решение волнового уравнения в виде:

$$\vec{E}(x, y, z, t) = E_0 \vec{u}(x, y, z) \exp j(\omega t + \varphi)$$

Решение такого типа называется электромагнитной модой полости.

Из уравнений Максвелла вытекает другое условие, которому должно удовлетворять электрическое поле, а именно $\nabla \cdot \vec{u} = 0$

Спонтанное излучение.

Предположим, что некоторый атом, первоначально находившийся в возбужденном состоянии 2 с энергией E_2 , переходит, со спонтанным излучением, в состояние 1 с энергией E_1 . В процессе перехода $2 \rightarrow 1$ атома его волновая функция может быть представлена в виде :

$$\psi = a_1(t) \psi_1 + a_2(t) \psi_2$$

В соответствии с квантово-механическим подходом электрический дипольный момент атома

$$\mu = - \int e \vec{r} |a_1|^2 |u_1| u_1 + j e \vec{r} |a_2|^2 |u_2| u_2 + \int e \vec{r} [a_1 a_2^* \cdot u_1 u_2^* \exp j(\omega_0 t) + a_2 a_1^* \cdot u_2 u_1^* \exp(-j(\omega_0 t))] dV$$

$$\omega_0 = (E_2 - E_1) / h$$

Из данного выражения видно, что μ содержит величину μ_{osc} с частотой ω_0

$$\mu_{osc} = \text{Re} [2a_1 a_2^* \cdot \mu_{21} \exp j(\omega_0 t)]$$

Из выражения для μ_{osc} видно, что в процессе перехода $2 \rightarrow 1$ атом приобретает дополнительный дипольный момент μ_{osc} , осциллирующий с частотой ω_0 , амплитуда которого пропорциональна μ_{21} . Согласно классической электродинамике такой осциллирующий диполь испускает в окружающее пространство излучение.

Согласно полуклассического подхода:

1. Временная эволюция величины $|a_2(t)|^2$ описывается функцией гиперболического тангенса, однако при слабом возбуждении (т. е. при $|a_2|^2 \ll 1$) она следует экспоненциальному закону .

2. Когда атом в начальный момент времени находится в возбужденном состоянии, то это его состояние является равновесным (неустойчиво), и спонтанного излучения не происходит.

В рамках квантового описания явление спонтанного излучения объясняется:

1. Временная эволюция величины $|a_2(t)|^2$ всегда с достаточной точностью описывается экспоненциальной функцией.

2. Излучательное время жизни состояния и в случае квантового описания определяется тем же соотношением, что и в полуклассическом подходе.

Согласно квантовой электродинамике атом на верхнем уровне не находится в неустойчиво-равновесном состоянии, это может иметь место, только если атом подвержен воздействию некоторого возмущения, происхождение которого указано. Возмущение, необходимое для описания явления спонтанного излучения с позиции квантового-электродинамического подхода, обусловлено флуктуациями электромагнитного поля моды полости.

Поглощение и вынужденное излучение.

Рассмотрим процессы поглощения и вынужденного излучения, происходящие в двухуровневой системе, для случая, когда с монохроматической электромагнитной волной взаимодействует одиночный атом.

Рассмотрим случай поглощения и предположим, что при $t \geq 0$ на атом падает монохроматическая электромагнитная волна, так что волновая функция атома описывается соотношением $\psi = a_1(t)\psi_1 + a_2(t)\psi_2$ при начальных условиях $|a_1(0)|^2 = 1$ и $|a_2(0)|^2 = 0$.

В результате взаимодействия с электромагнитной волной атом приобретает дополнительную энергию взаимодействия H' , обусловленную внешним электрическим полем: $H' = \mu \cdot \vec{E} = -e \cdot \vec{r} \cdot E_0 \cdot \sin \omega t$

При квантовомеханическом описании эта осциллирующая во времени величина рассматривается как гамильтониан взаимодействия $H'(t)$, который подставляется в зависящее от времени уравнение Шредингера.

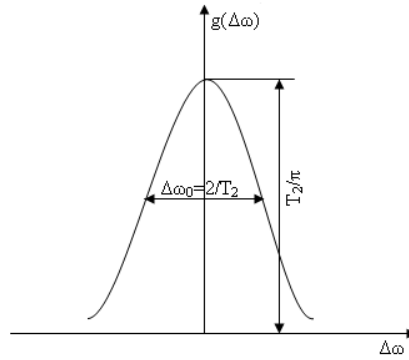
Поскольку $\omega \equiv \omega_0$, то этот гамильтониан взаимодействия вызывает переход атома с одного уровня на другой.

Это означает, что при $t > 0$ величина $|a_1(t)|^2$ уменьшается по сравнению со своим начальным значением $|a_1(0)|^2 = 1$, а $|a_2(t)|^2$ соответственно увеличивается.

Вероятность перехода с поглощением излучения, или вероятность поглощения для атома:

$$W_{12}^{sa} = \frac{2\pi^2}{3n^2\epsilon_0 h^2} |\mu_{12}|^2 \rho g(\nu - \nu_0)$$

Вид функции $g(\nu - \nu_0)$, лоренцева линия. Максимум функции находится $\nu = \nu_0$ при этом ее значение $g(0) = 2/\pi\Delta\nu_0$



В случае вынужденного излучения волновая функция двухуровневой системы и энергия взаимодействия H' остаются при этом теми же самыми поэтому уравнение, описывающие эволюцию во времени величин $|a_2(t)|^2$ остается неизменным. Однако, изменяются начальные условия $|a_2(0)|^2 = 1$ и $|a_1(0)|^2 = 0$.

Т.о. выражение для вероятности вынужденного излучательного перехода атома, или вероятности вынужденного излучения для перехода получается из выражения для W_{12}^{sa} путем перестановки двух индексов

$$W_{12}^{sa} = W_{21}^{sa}$$

показывающее, что вероятности поглощения и вынужденного излучения в рассматриваемом случае равны.

Вынужденные, так и спонтанные переходы должны подчиняться одним и тем же правилам отбора. Таким образом, вынужденный переход за счет электрического дипольного взаимодействия может происходить только между состояниями с волновыми функциями, имеющими противоположную четность – разрешенный электрическим дипольным переходом.

Механизмы уширения линий.

1. Уширение называется однородным, если механизм, за счет которого оно происходит, приводит к одинаковому уширению линии перехода каждого из атомов.

А. Столкновительное уширение. Предположим, что скачок при каждом столкновении испытывает фаза напряженности электрического поля, а не фаза дипольного момента атома. В результате, напряженность электрического поля не может более считаться синусоидально изменяющейся во времени величиной, а будет иметь вид, представленный на рис., где каждый скачкообразный сдвиг фазы связан со столкновением.

При таких условиях атом уже не воспринимает электромагнитную волну как монохроматическую. Полная вероятность перехода по всему спектру частот излучения:

$$W_{12} = \frac{2\pi^2}{3n^2\epsilon_0 h^2} |\mu_{21}|^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \rho_{\nu} \delta(\nu' - \nu_0) d\nu'$$

Вид функции:

$$g(\nu - \nu_0) = 2\tau_c \frac{1}{\left[1 + 4\pi^2\tau_c (\nu - \nu_0)^2\right]}$$

Таким образом, получаем функцию лоренцевой формы, в котором значение в максимуме равно теперь $2\tau_c$, параметр $\Delta\nu_0 = 1/\pi\tau_c$ является столкновительной шириной линии.

Б. Естественное или собственное уширение. Квантово-электродинамическая теория спонтанного излучения показывает, что спектральная функция $g(\nu - \nu_0)$ представляет собой лоренцев контур, вид которого

$$g(\nu - \nu_0) = 2\tau_{sp} \frac{1}{\left[1 + 8\pi^2\tau_{sp} (\nu - \nu_0)^2\right]}$$

τ_{sp} излучательное времени жизни.

Естественная ширина перехода: $\Delta\nu_0 = 1/\pi\tau_{sp}$

2. Уширение называется неоднородным, если соответствующий механизм приводит к распределению резонансных частот атомов по некоторому спектральному интервалу.

А. За счет эффекта Штарка. Активные ионы в кристаллах или стеклах испытывают воздействие локального электрического поля, наведенного неоднородностями среды. Такие вариации локального поля вызывают, локальные вариации энергии уровней и, следовательно, частот переходов в ионах.

При случайных вариациях локального поля оказывается, что соответствующее распределение частот переходов $g^*(\nu - \nu_0)$ имеет гауссову форму контура, и выражается соотношением.

$$g_i = g^*(v - v_0) = \left[\frac{2}{\Delta v_0^*} \left(\frac{\ln 2}{\pi} \right)^{1/2} \right] \exp \left\{ - \left[\frac{4(v - v_0)^2}{\Delta v_0^*} \ln 2 \right] \right\}$$

Ширина линии Δv_0^* определяется величиной разброса изменений частот переходов в среде и, следовательно, степенью неоднородности поля в кристалле или стекле.

Б. Допплеровское уширение. Соответствующая форма контура линии задается распределением:

$$g^*(v'_0 - v_0) = \frac{1}{v_0} \left(\frac{Mc^2}{2\pi k_B T} \right)^{1/2} \exp \left\{ - \left[\frac{Mc^2}{2k_B T} \frac{(v'_0 - v_0)^2}{v_0^2} \right] \right\}$$

Таким образом, опять приходим к гауссовой форме контура, полная ширина которого

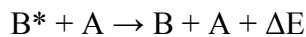
$$\Delta v_0^* = 2v_0 \left[\frac{2k_B T \ln 2}{Mc^2} \right]^{1/2} \text{ доплеровская ширина линии.}$$

Форма контура однородно уширенной линии всегда является лоренцевой, а неоднородно уширенной гауссовой. Когда уширение линии обусловлено вкладами двух механизмов, форма результирующего контура всегда определяется сверткой соответствующих спектральных функций. Свертка двух лоренцевых функций с ширинами контуров Δv_1 и Δv_2 имеет также лоренцев контур, ширина которого равна сумме $\Delta v = \Delta v_1 + \Delta v_2$. Свертка двух гауссовых функций с ширинами контуров Δv_1 и Δv_2 также имеет гауссов контур, на этот раз — с шириной $\Delta v = (\Delta v_1 + \Delta v_2)^{1/2}$.

Безызлучательные переходы и передача энергии.

Механизмы безызлучательных переходов.

1. Столкновительная дезактивация. Процесс столкновительной дезактивации, в котором энергия возбужденной частицы B^* выделяется в виде кинетической энергии сталкивающейся с ней частицы A , может быть представлен в виде реакции:



Этот процесс называют также сверхупругим столкновением, или столкновением второго рода.

Скорость изменения населенности возбужденного состояния частиц B (скорость дезактивации) может быть записана в виде:

$$\frac{dN_{B^*}}{dt} = -k_{B^*A} \cdot N_{B^*} \cdot N_A$$

2. Передача энергии за счет диполь-дипольного взаимодействия. В этом случае внутренняя энергия совершающей переход возбужденной частицы передается, в результате диполь-дипольного взаимодействия, другой, близко расположенной к ней, частице, энергия возбуждения которой примерно равна энергии, теряемой первой частицей.

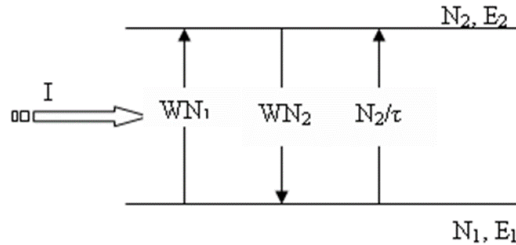
3. Совместные проявления спонтанных излучательных и безызлучательных процессов. Если принять во внимание как спонтанные излучательные, так и безызлучательные переходы, то для зависящей от времени населенности N_2 возбужденного состояния получаем уравнение:

$$\frac{dN_2}{dt} = -\left(\frac{N_2}{\tau_r} + \frac{N_2}{\tau_{nr}}\right)$$

$$N_2(t) = N_2(0) \exp(-t / \tau)$$

Насыщение.

Рассмотрим изменение параметров перехода с поглощением или испусканием излучения (на частоте ν_0) в присутствии мощной электромагнитной волны с интенсивностью I и частотой $\nu \equiv \nu_0$.



1. Насыщение поглощения (однородно уширенная линия). Скорость изменения населенности верхнего уровня N_2 за счет происходящих одновременно процессов поглощения и вынужденного излучения, а также спонтанных излучательных и безызлучательных переходов может быть записана как

$$\frac{d(\Delta N)}{dt} = -\Delta N(1/\tau + 2W) + N_1/\tau$$

В стационарных условиях, т. е. когда $(d\Delta N/dt) = 0$, получаем:

$$\Delta N = N_1 / (1 + 2W\tau)$$

Для поддержания заданной разности населенностей ΔN требуется, чтобы в единице объема среды из падающего излучения поглощалась мощность (dP/dV) , которая при насыщении поглощения, т. е. при $W\tau \gg 1$, достигает величины

$$(dP/dV)_s = (h\nu)N_1/2\tau$$

$$\frac{dP/dV}{(dP/dV)_s} = \frac{I/I_s}{1+(I/I_s)}$$

$$I_s = hv / 2\sigma\tau \text{ интенсивность насыщения.}$$

Он является параметром, зависящим от свойств данной среды и частоты падающей электромагнитной волны.

При этих условиях коэффициент поглощения в отсутствие насыщающей волны на частоте ν – ненасыщенный коэффициент поглощения

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1+(I/I_s)}$$

2. Насыщение усиления (однородно уширенная линия).

Скорость изменения населенности

$$N_2 = N_{20} / [1+(I/I_s)]$$

$$I_s = hv / \sigma\tau$$

Коэффициент усиления

$$g = g_0 / [1+(I/I_s)]$$

3. Неоднородно уширенная линия. Когда контур линии уширен неоднородно эффект насыщения проявляется более сложным образом. Предположим контур линии складывается под действием однородного и неоднородного механизмов уширения, так что форма контура линии описывается функцией $g_t(\nu - \nu_0)$, которая является сверткой однородных вкладов $g(\nu - \nu'_0)$ различных атомов.

Люминесценция в оптически плотной среде.

В реальной ситуации атом окружен множеством других атомов, некоторые из которых находятся в основном, а некоторые — в возбужденном состояниях. В оптически плотной среде могут наблюдаться новые явления, поскольку переходы могут быть обусловлены одновременным протеканием как спонтанных, так и вынужденных процессов.

1. Захват излучения. Если доля атомов, находящихся в возбужденном состоянии, очень мала и среда является оптически плотной, то важную роль может играть явление, называемое захватом, или пленением, излучения. В рассматриваемой ситуации фотон, спонтанно испущенный одним атомом, может поглотиться другим атомом, который в результате оказывается в возбужденном состоянии. Таким образом, захват излучения проявляется в уменьшении эффективной вероятности данного спонтанного излучательного перехода. Эффект

захвата излучения может оказаться особенно существенным при переходах в УФ-диапазоне, для которых сечение велико. Он может привести к возрастанию величины эффективного излучательного времени жизни вплоть до нескольких порядков.

2. Усиленное спонтанное излучение. Если доля атомов, находящихся в возбужденном состоянии, достаточно велика, и среда снова является оптически плотной, то весьма существенную роль может играть так называемое усиленное спонтанное излучение (УСИ). Если на одном из концов активной среды поместить полностью отражающее зеркало ($R = 1$) (рисунок, б), то излучение будет выходить только в одном направлении. Оно и будет являться усиленным спонтанным излучением.

В отличие от обычного спонтанного излучения, УСИ по своим специфическим характеристикам имеет некоторое сходство с лазерным излучением:

- в определенной степени УСИ обладает свойством направленности;
- его спектр значительно уже, чем спектр спонтанного излучения;
- его проявление характеризуется слабо выраженным порогом;
- пучок УСИ может иметь достаточную интенсивность.

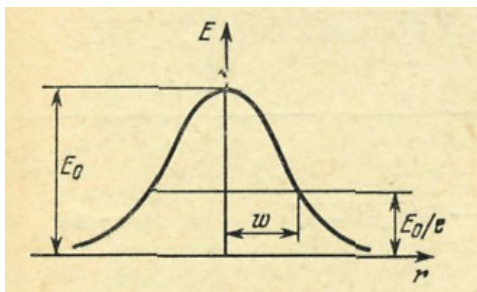
ТЕМА 3. ФОРМИРОВАНИЕ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ ОПТИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ И СИСТЕМАМИ

План лекции:

Специфические особенности лазерного излучения. Волновая, геометрическая и матричная оптика применительно к пучку лазерного излучения. Расчет преобразования пучков с помощью лучевых матриц.

Специфические особенности лазерного излучения.

Лазерные пучки во многих отношениях ведут себя как однородные плоские волны. Однако распределение интенсивности в них неоднородно (наибольшего значения интенсивность достигает на оси распространения) и волновой фронт обладает небольшой кривизной. При излучении на основной моде TEM_{00} изменение амплитуды лазерного пучка в любом поперечном сечении описывается гауссовой экспонентой.



$$E = E_0 \exp\left(-\frac{r^2}{\omega^2}\right)$$

Ширина пучка характеризуется его радиусом ω , определяемым как расстояние, на котором амплитуда поля уменьшается в e раз по сравнению с амплитудой на оси пучка.

Гауссов пучок имеет минимальный диаметр $2\omega_0$ в «перетяжке» пучка, где волновой фронт плоский. По мере удаления от перетяжки пучок расширяется по закону:

$$\omega^2(z) = \omega_0^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right]$$

z – расстояние от перетяжки.

Зависимость $\omega(z)$ показана на рисунке. Расходимость пучка в дальней зоне: $\theta = \frac{\lambda}{\pi \omega_0}$.

Радиус кривизны волнового фронта изменяется следующим образом:

$$R(z) = Z \left[1 + \left(\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda z} \right)^2 \right]$$

Волновая, геометрическая и матричная оптика применительно к пучку лазерного излучения.

Рассмотрим монохроматическую волну в так называемом скалярном приближении, когда электромагнитные поля считаются поляризованными.

Напряженность электрического поля волны может быть тогда описана скалярной величиной, имеющей вид:

$$E(x, y, z, t) = \tilde{E}(x, y, z) \exp(i\omega t)$$

где комплексная амплитуда должна удовлетворять волновому уравнению в скалярной форме. Решение уравнения для напряженности электрического поля в интегральной форме:

$$\tilde{E}(x, y, z) = \frac{1}{\lambda} \iint_S \tilde{E}(x_1, y_1, z_1) \frac{\exp(-ikr)}{r} \cos \theta dx_1 dy_1$$

Видно, что выше представленное уравнение фактически выражает в математическом форме принцип Гюйгенса.

$\tilde{E}(x_1, y_1, z_1) \frac{\exp(-ikr)}{r}$ - представляет собой элементарную волну, испущенную элементом площади $dx_1 dy_1$ в точке P_1 .

Напряженность электрического поля в точке P получается суммированием вкладов волн, приходящих ото всех точек, лежащих в плоскости $Z = Z_l$.

Рассмотрим решения уравнений для напряженности электрического поля, либо в дифференциальной, либо в интегральной формах, в приближении параксиальных волн, когда предполагается, что волна распространяется вдоль оси z , а углы θ малы. В этом случае можно записать:

$$\tilde{E}_{\perp}(r, z) = u(x, y, z) \exp(-ikz)$$

В параксиальном приближении подстановка данного выражения в решение уравнения для напряженности электрического поля в дифференциальной форме дает:

$$\nabla_{\perp}^2 u - 2ik \frac{\partial u}{\partial z} = 0$$

- волновое уравнение в параксиальном приближении.

Данное уравнение определяет напряженность электрического поля, в приближении параксиальных волн, в дифференциальной форме.

Рассмотрение, в параксиальном приближении распространение волны через обобщенную оптическую систему, описываемую некоторой ABCD-матрицей, дает нам выражение определяющее напряженность электрического поля $u(x, y, z)$ как суперпозицию элементарных волн, испущенных элементами плоскости $Z = Z_l$ и прошедших через систему.

$$u(x, y, z) = \frac{1}{\lambda B} \iint_S u(x_1, y_1, z_1) \exp \left\{ -ik \left[\frac{A(x_1^2 + y_1^2) + D(x^2 + y^2) - 2x_1x - 2y_1y}{2B} \right] \right\} dx_1 dy_1$$

Данное уравнение является обобщением выше стоящего уравнения, поскольку оно в него переходит при распространении через свободное пространство.

Рассмотрим некоторую обобщенную оптическую систему, характеризуемую соответствующей ABCD-матрицей, а также предположим, что в плоскости $z_l = 0$ нет ограничивающей апертуры.

В этом случае собственное решение обобщенного уравнения имеет вид:

$$u(x, y, z) = \frac{1}{A + B/q_1} \exp \left\{ -ik \left[\frac{x^2 + y^2}{2q} \right] \right\}$$

$q = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D}$ - закон ABCD распространения гауссовых пучков, которое показывает, каким образом радиус кривизны фронта сферической волны трансформируется при ее прохождении через оптическую систему.

Гауссов пучок можно рассматривать как сферическую волну с комплексным радиусом кривизны волнового фронта, равным q .

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{R} - i \frac{\lambda}{\pi \omega^2}$$

где R – радиус кривизны волнового фронта гауссова пучка;

ω – характеризует размеры пучка в поперечном направлении – размер пятна (при данной координате z).

Расчет преобразования пучков с помощью лучевых матриц.

Преобразование величины x_n и θ_n через x_0 и θ_0 выражается:

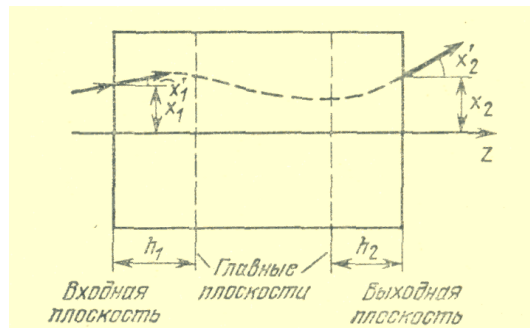
$$\begin{pmatrix} x_n \\ \theta_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ \theta_0 \end{pmatrix} \quad \begin{cases} x_n = Ax_0 + B\theta_0 \\ \theta_n = Cx_0 + D\theta_0 \end{cases}$$

Лучевая матрица $\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$ – матрица передачи связывает параметры x_0 и θ_0 входящего луча с параметрами выходящего x_n и θ_n .

Матрицей передачи описывается распространение параксиальных лучей через линейную оптическую систему.

Параксиальными называются лучи, образующие малые углы с оптической осью системы.

Матричные элементы обычно удовлетворяют соотношению $AD-BC=1$ и связаны с фокусным расстоянием системы и координатами ее главных плоскостей.



$$f = -\frac{1}{C}; \quad h_1 = \frac{(D-1)}{C}; \quad h_2 = \frac{(A-1)}{C}$$

h_1, h_2 – расстояния главных плоскостей системы от входной и выходной плоскостей.

Рассмотрим матрицы передачи для систем простейших оптических систем:

1) матрица передачи - $\begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ – описывает распространение лучей на расстояние d в свободном пространстве.

2) матрица передачи - $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix}$ - прохождение лучей через тонкую линзу с фокусным

расстоянием f . Входной и выходной плоскостями в этом случае являются вертикальные плоскости, проходящие через крайние левую и правую точки линзы.

3) матрица передачи - $\begin{pmatrix} 1 & d \\ -1/f & 1-d/f \end{pmatrix}$ - является произведением матриц 2 и 1 и

описывает последовательное прохождение лучей сначала через свободное пространство, а затем через тонкую линзу. При обратном ходе лучей диагональные матричные элементы меняются местами.

4) матрица передачи - $\begin{pmatrix} 1-d_2/f_1 & d_1+d_2-\frac{d_1d_2}{f_1} \\ -\frac{1}{f_1}-\frac{1}{f_2}+\frac{d_2}{f_1f_2} & 1-\frac{d_1}{f_1}-\frac{d_2}{f_2}-\frac{d_1}{f_2}+\frac{d_1d_2}{f_1f_2} \end{pmatrix}$ - описывает

последовательное прохождение лучей через две системы предыдущего типа.

5) матрица передачи - $\begin{pmatrix} \cos \sqrt{\frac{n_2}{n_0}} & \frac{1}{\sqrt{n_0n_2}} \sin d \cdot \sqrt{\frac{n_2}{n_0}} \\ -\sqrt{n_0n_2} \sin d \cdot \sqrt{\frac{n_2}{n_0}} & \cos d \cdot \sqrt{\frac{n_2}{n_0}} \end{pmatrix}$ - описывает прохождение

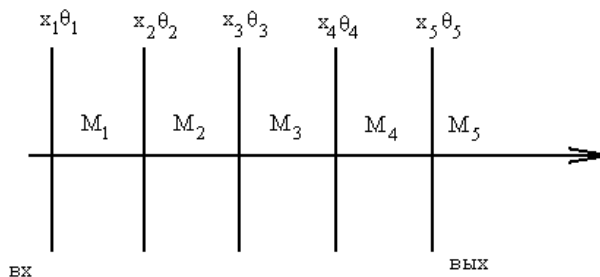
лучей через фокусирующую среду протяженностью d . Показатель преломления этой среды в радиальном направлении изменяется по квадратичному закону.

6) матрица передачи - $\begin{pmatrix} 1 & d/n \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$ - описывает прохождение лучей через слой однородного

диэлектрика с показателем преломления n .

В последних двух случаях – параметры лучей определяются на входной и выходной плоскостях, расположенных вне диэлектрика.

В случае когда есть проход через разные системы:



ВЫХОД ВХОД

$$\begin{pmatrix} x^* \\ \theta^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \\ \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix}$$

Расчет обобщенной матрицы начинается с системы перед выходными системами.

$$\begin{pmatrix} x^* \\ \theta^* \end{pmatrix} = M_5 \cdot \begin{pmatrix} x_5 \\ \theta_5 \end{pmatrix} = \dots = M_5 \cdot M_4 \cdot M_3 \cdot M_2 \cdot M_1 \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix},$$

где $M_5 \cdot M_4 \cdot M_3 \cdot M_2 \cdot M_1 = M^*$

$$\begin{pmatrix} x^* \\ \theta^* \end{pmatrix} = M^* \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix}$$

ТЕМА 4. ОПТИЧЕСКИЕ РЕЗОНАТОРЫ

План лекции:

Назначение резонатора. Типы резонаторов. Время жизни фотона и добротность резонатора. Критерий устойчивости резонатора. Устойчивые резонаторы. Неустойчивые резонаторы.

Назначение резонатора.

Под оптическими резонаторами понимают замкнутую полость, состоящую из отражающих поверхностей и содержащую внутри себя однородную, изотропную и пассивную диэлектрическую среду.

Мода резонатора - стационарная конфигурация электромагнитного поля, которая удовлетворяет как уравнениям Максвелла, так и граничным условиям.

Лазерные резонаторы характеризуются следующими двумя главными особенностями:

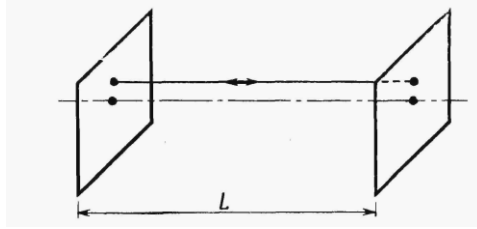
- 1) они, как правило, бывают открытыми, т. е. не имеют боковой поверхности,
- 2) их размеры намного превышают длину волны лазерной генерации.

Данные особенности оказывают значительное влияние на его характеристики.

Если резонатор будет открытым, то это означает существование неизбежных потерь для любой моды резонатора. Эти потери, связанные с дифракцией электромагнитного поля, которая приводит к тому, что часть энергии покидает резонатор, называются дифракционными. В открытом резонаторе лишь очень немногие моды, соответствующие суперпозиции волн, распространяющихся почти параллельно оси резонатора, будут иметь достаточно низкие потери, чтобы стала возможной генерация. Все остальные моды резонатора соответствуют волнам, которые после одного прохода резонатора почти полностью затухают. Это главная причина, почему в лазерах применяется открытый резонатор.

Типы резонаторов.

Плоскопараллельный резонатор (или резонатор Фабри—Перо).



Этот резонатор состоит из двух плоских зеркал, расположенных параллельно друг другу. В первом приближении моды такого резонатора можно представить себе как суперпозицию двух плоских электромагнитных волн, распространяющихся в противоположных направлениях вдоль оси резонатора.

В рамках этого приближения нетрудно получить резонансные частоты, если наложить условие, что длина резонатора L должна быть равной целому числу полуволен. Такое условие является необходимым для того, чтобы на обоих зеркалах электрическое поле электромагнитной стоячей волны было равным нулю.

Предполагая, что $(l, m) \ll n$, резонансные частоты плоскопараллельного резонатора :

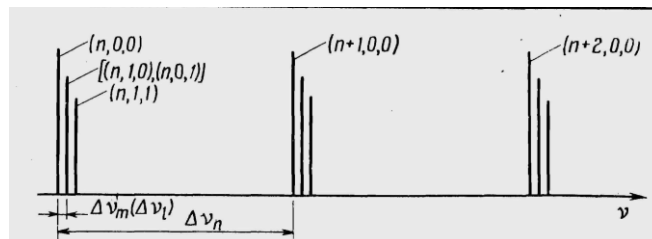
$$\nu \approx \frac{c}{2} \cdot \left[\frac{n}{L} + \frac{(l^2 + m^2)L}{8na^2} \right]$$

Из этого выражения можно сразу получить, что разность частот, соответствующих двум модам, с одними и теми же значениями l и m , но с n , отличающимися на 1, равна:

$$\Delta \nu_n = \frac{c}{2L}$$

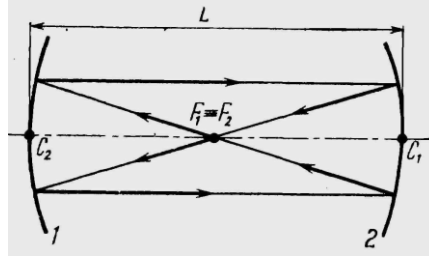
Эти две моды отличаются одна от другой лишь распределением поля вдоль оси z . Поэтому $\Delta \nu_n$ нередко называют разностью частот между двумя последовательными продольными модами. Разность частот между двумя модами, отличающимися только значениями m на 1 (т. е. разность частот между соседними поперечными модами):

$$\Delta \nu_m = \frac{cL(m + 1/2)}{8na^2}.$$



Конфокальный резонатор.

Он состоит из двух сферических зеркал, имеющих одинаковые радиусы кривизны R и расположенных на расстоянии L друг от друга таким образом, что фокусы зеркал F_1 и F_2 совпадают. Отсюда следует, что центр кривизны C одного зеркала лежит на поверхности второго зеркала (т. е. $L = R$).



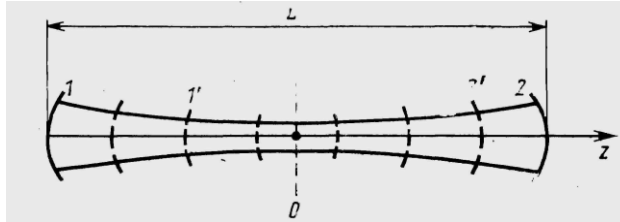
Резонансные частоты для конфокального резонатора:

$$\nu = c \cdot [2n + (1 + m + l)] / 4L$$

Следует заметить, что моды, характеризующиеся одним и тем же значением суммы $2n + m + l$, имеют одинаковые резонансные частоты, хотя их пространственные конфигурации различны. Говорят, что эти моды являются частотно-вырожденными.

Кроме того, следует заметить, что в отличие от случая плоских волн межмодовое расстояние в частотной области теперь равно $c/4L$. Однако разность частот между двумя соседними продольными модами, равна $c/2L$, т. е. такая же, как и для резонатора с плоскими зеркалами.

Если центр резонатора расположить в начале координат,



то диаметр пучка $\omega(z)$:

$$\omega(z) = \omega_0 \cdot \left[1 + \left(\frac{2z}{L} \right)^2 \right]^{1/2}$$

где ω_0 — диаметр пятна в центре резонатора, определяемый выражением:

$$\omega_0 = \left(L\lambda / 2\pi \right)^{1/2}$$

В плоскости $z = 0$ размер пятна является минимальным. Поэтому величину ω_0 называют размером пятна в перетяжке пучка.

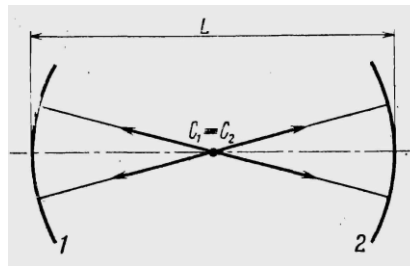
Размер пятна на зеркалах в $\sqrt{2}$ раз больше, чем в центре резонатора. (зеркала стремятся сфокусировать пучок в центре резонатора.)

Фаза волны и радиус кривизны:

$$\phi(z) = \operatorname{arctg}\left(\frac{2z}{L}\right),$$

$$R(z) = z \cdot \left[1 + \left(\frac{L}{2z}\right)^2\right].$$

Обобщенный сферический резонатор.



Этот резонатор состоит из двух сферических зеркал, имеющих одинаковые радиусы R_1 и R_2 и расположенных друг от друга на расстоянии L , центры кривизны зеркал C_1 и C_2 совпадают (т.е. $L=2R$).

Поскольку величины R_1 и R_2 могут принимать любые значения (либо положительные, либо отрицательные), можно будет составить такую комбинацию зеркал, которая приведет к неустойчивой конфигурации резонатора. В связи с этим необходимо определить условия устойчивости в случае обобщенного сферического резонатора. Введем две безразмерные величины:

$$g_1 = 1 - \frac{L}{R_1} \text{ и } g_2 = 1 - \frac{L}{R_2}$$

Для того чтобы вычислить распределение поля, представим себе, что на место синфазных поверхностей I' и $2'$, поместим два зеркала, радиусы кривизны зеркал и синфазных поверхностей совпадают. (т.е. резонатор образован зеркалами I' и $2'$ и распределение поля внутри резонатора не изменится). Соответственно размер пятна и синфазные поверхности как внутри, так и вне резонатора останутся теми же самыми, что и на рисунке. Следует заметить, что синфазные поверхности I' и $2'$ уже не являются конфокальными. Следовательно, Для того чтобы найти моды резонатора, образованного зеркалами I' и $2'$, нам необходимо прежде всего

вычислить координаты двух соответствующих конфокальных поверхностей 1 и 2. При этом задача сводится к задаче об эквивалентном конфокальном резонаторе.

Координаты этого резонатора найдем, заменив в нем L на L_e (длину эквивалентного конфокального резонатора). Задавая радиусы кривизны R_1 и R_2 зеркал 1 и 2 и расстояние между ними L , можно вычислить расстояние от перетяжки пучка до одного из двух зеркал и длину L_e эквивалентного конфокального резонатора. Таким образом, для сферического резонатора:

$$\omega = \omega_0 \left[1 + \left(\frac{2z}{L_e} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad \omega_0 = \left(\frac{L_e \lambda}{2\pi} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad R(z) = z \left[1 + \left(\frac{L_e}{2z} \right)^2 \right], \quad \phi = \arctan \left(\frac{2z}{L_e} \right).$$

Особый интерес представляет случай когда $R_2 = -R_1 = R$ (симметричный резонатор):

$$L_e^2 = (2R - L)L$$

Размер пятна на зеркале:

$$\omega_s = \left(\frac{\lambda L}{2\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{4R^2}{(2R - L)L} \right]^{\frac{1}{4}}$$

Резонансные частоты:

$$\nu = \frac{c}{2L} \cdot \left(n + (l + m + 1)\pi^{-1} \cdot \arccos(g_1 g_2) \right)^{\frac{1}{2}}$$

Необходимо заметить, что частотное выражение, которое наблюдается в конфокальном резонаторе, в сферическом снимается.

Время жизни фотона и добротность резонатора.

Энергия, которую запасена в резонаторе можно выразить следующим образом. Учитывая, что с течением времени она убывает.

$$W = W_0 e^{-\frac{\omega t}{\theta}},$$

где W_0 – энергия в начальный момент времени, ω – частота (модовый состав), θ – добротность – величина, которая помогает удерживать энергию в резонаторе.

$$\left| \frac{dW}{dt} \right| = W_0 \frac{\omega}{\theta} e^{-\frac{\omega t}{\theta}}, \quad \text{отсюда} \quad \left| \frac{dW}{dt} \right| = W \frac{\omega}{\theta}, \quad \Rightarrow \quad \theta = W \left(\frac{\omega}{\left| \frac{dW}{dt} \right|} \right) - \text{физическое определение}$$

добротности: добротность прямо пропорциональна отношению энергии запасенной в резонаторе к энергии теряемой в единицу времени умноженной на частоты.

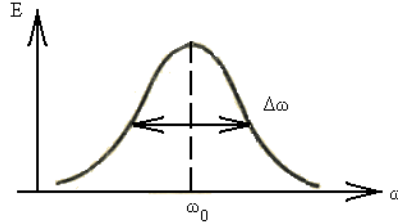
Добротность также характеризует скорость потерь энергии.

Обозначим через τ – время в течении которого энергия в резонаторе убывает в e раз.

$$W = W_0 e^{-\frac{\omega \tau}{\theta}} = \frac{W_0}{e} \Rightarrow \frac{\omega \tau}{\theta} = 1, \Rightarrow \tau = \frac{\theta}{\omega}.$$

τ – время жизни фотона в резонаторе.

Из оптики: каждый переход характеризуется спектральной кривой распределения:



$\Delta\omega_{рез}$ – ширина спектральной линии.

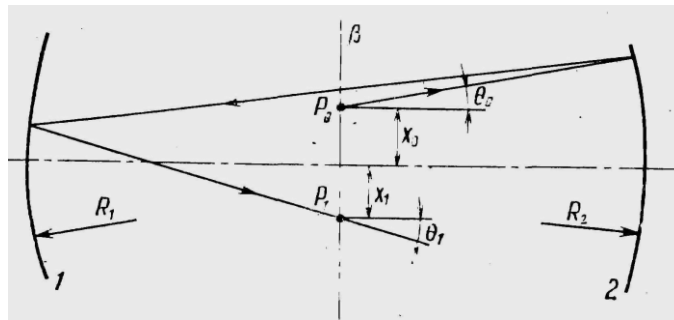
$$\tau = \frac{1}{\Delta\omega_{рез}}; \frac{1}{\omega_{рез}} = \frac{\theta}{\omega}, \Rightarrow \theta = \frac{\omega}{\omega_{рез}}.$$

$$R = \frac{\lambda}{d\lambda} = \frac{\omega}{d\omega} - \text{разрешающая способность в резонаторе.}$$

Критерий устойчивости резонатора. Устойчивые резонаторы.

Условие устойчивости сферического резонатора можно получить исходя из приближения геометрической оптики.

Рассмотрим луч, выходящий из точки P_0 некоторой главной плоскости β расположенной внутри резонатора. Этот луч, после того как он отразится от зеркал 1 и 2 , пересечет плоскость β в точке P_1 .



Пусть X_0 и X_1 – координаты точек P_0 и P_1 , отсчитываемые от оси резонатора, а через θ_0 и θ_1 —углы, которые соответствующие лучи образуют с осью резонатора. Луч, выходящий из точки $P_1(x_1, \theta_1)$, после двух отражений пересечет плоскость β в точке $P_2(x_2, \theta_2)$, координаты которой определяются выражением:

$$\begin{vmatrix} x_2 \\ \theta_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix}^2 \cdot \begin{vmatrix} x_0 \\ \theta_0 \end{vmatrix}$$

Где матричные элементы A , B , C и D определяются только геометрией резонатора. Таким образом, после n полных проходов луча через резонатор координаты точки $P_n(x_n, \theta_n)$ запишутся следующим образом:

$$\begin{vmatrix} x_n \\ \theta_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A & B^n \\ C & D \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} x_0 \\ \theta_0 \end{vmatrix}$$

Для того чтобы резонатор был устойчивым, необходимо, чтобы для любой точки (x_0, θ_0) точка (x_n, θ_n) не удалялась на бесконечно большое расстояние от оси, когда n увеличивается. Это означает, что с ростом n матрица:

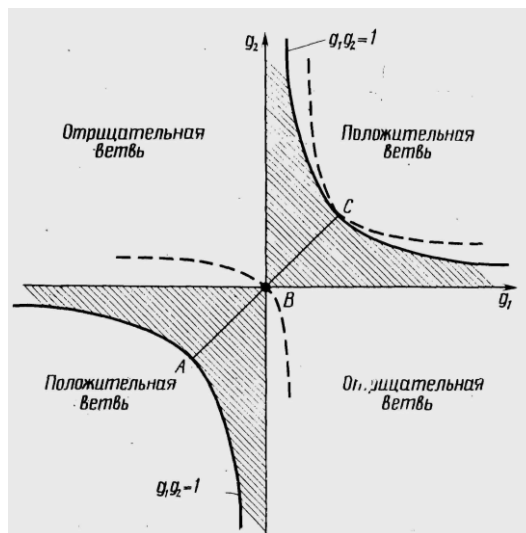
$$\begin{vmatrix} A & B^n \\ C & D \end{vmatrix}$$

не должна расходиться.

Матрица не расходится при выполнении условия:

$$-1 < \frac{(A+D)}{2} < 1 \quad \text{или} \quad 0 < g_1 \cdot g_2 < 1.$$

Диаграмма устойчивости на плоскости $g_1 - g_2$ для сфер резонатора.



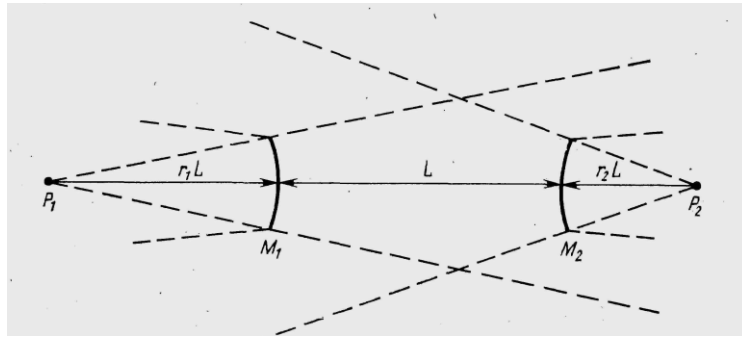
Область устойчивости соответствует заштрихованным частям. Штриховые кривые соответствуют возможным конфигурациям конфокальных резонаторов

Особый интерес представляет класс сферических резонаторов, которым на диаграмме соответствуют точки на прямой AC , составляющей угол 45° с осями g_1 и g_2 . Точки A , B , C – соответствуют концентрическим (сферическим), конфокальным и плоским резонаторам.

Неустойчивые резонаторы.

Неустойчивые резонаторы представляют интерес для лазерной техники. В первую очередь потому, что в случае неустойчивых резонаторов поле не стремится сосредоточиться вблизи оси и в режиме одной поперечной моды можно получить большой модовый объем. Однако при работе с неустойчивыми резонаторами возникает другая проблема, связанная с тем, что лучи стремятся покинуть резонатор. Поэтому соответствующие моды имеют значительно большие потери, чем моды устойчивого резонатора. Тем не менее данное обстоятельство можно использовать даже в качестве преимущества, если лучи, которые теряются на выходе из резонатора, включить в полезное выходное излучение лазера.

Рассмотрим общий случай неустойчивого резонатора, показанный на рисунке:



Предположим, что мода образована суперпозицией двух сферических волн постоянной интенсивности. Центры P_1 и P_2 , из которых исходят эти волны, не совпадают с центрами кривизны зеркал M_1 и M_2 , но их координаты нетрудно вычислить, используя соотношение самосогласованности: сферическая волна, исходящая из точки P_1 , после отражения от зеркала M_2 должна давать сферическую волну, выходящую из точки P_2 , и наоборот. Таким образом, координаты точек P_1 и P_2 можно получить из непосредственных вычислений, основанных на геометрической оптике:

$$r_1 = g_2 \cdot \left\{ \left[g_1 g_2 \cdot (g_1 g_2 - 1) \right]^{1/2} + g_1 g_2 - g_2 \right\}^{-1};$$

$$r_2 = g_1 \cdot \left\{ \left[g_1 g_2 \cdot (g_1 g_2 - 1) \right]^{1/2} + g_1 g_2 - g_1 \right\}^{-1},$$

После того, как пучок пройдет от одного зеркала до другого, размер пятна от каждой сферической волны увеличивается в M раз, причем:

$$M = g + (g^2 - 1)^{1/2}, \text{ - однопроходный коэффициент увеличения.}$$

К основным преимуществам неустойчивого резонатора можно отнести следующие:

- а) большой контролируемый объем моды,
- б) хорошую селекцию поперечных мод,

в) используется только отражательная оптика.

Основными недостатками этих резонаторов являются:

- 1) Поперечное сечение излучаемого пучка имеет форму кольца (т. е. в центре пучка находится темное пятно).
- 2) Распределение интенсивности в пучке неоднородно и имеет вид нескольких дифракционных колец.
- 3) Резонатор более чувствителен к возмущениям.

В соответствии с перечисленными достоинствами и недостатками неустойчивые резонаторы находят применение в лазерах с высоким коэффициентом усиления, особенно в ИК-области спектра и в случае, когда требуется получить пучки высокой мощности.

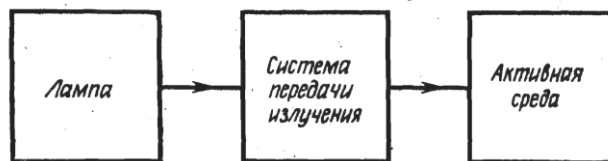
ТЕМА 5. СПОСОБЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ АКТИВНЫХ СРЕД

План лекции:

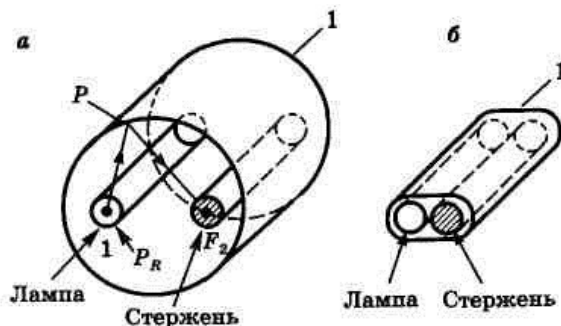
Оптическая накачка некогерентным источником света. Накачка лазерным излучением. Накачка в электрическом разряде.

Оптическая накачка некогерентным источником света.

Оптическая накачка некогерентным источником света - накачка непрерывным или импульсным светом, излучаемым мощной лампой;



Наиболее часто применяемые конфигурации накачки с использованием одной лампы. В обоих случаях активная среда имеет вид цилиндрического стержня, диаметр и длина которого близки к соответствующим параметрам лампы. Лампа помещена вдоль одной из двух фокальных осей F_1 зеркально отражающего цилиндра эллиптического сечения (обозначенного цифрой 1 на рисунке и обычно называемого осветителем)



Используются и другие виды упаковок:

- плотная упаковка - стержень и лампа размещены настолько возможно близко и плотно окружены цилиндрическим отражателем;
- система двух двухламповых осветителей- зеркально отражающий цилиндр имеет форму двух эллипсов, имеющих общий фокус;
- система высокой мощности - многоламповые конфигурации, в которых активная среда представляет собой пластину или плиту или несколько пластин.

Для импульсных лазеров используются Хе или Кг импульсные лампы-вспышки от среднего до высокого давления (500 ÷ 1500 Торр).

Импульс излучения накачки получают при разряде через лампу электрической энергии, запасенной батареей конденсаторов, заряженной подходящим источником питания. Для ограничения скорости развития тока разряда в электрическую цепь часто последовательно включают катушку индуктивности L . Разряд можно инициировать путем предыонизации газа в лампе с помощью поджигающего импульса высокого напряжения, приложенного к дополнительному электроду, размещенному вокруг лампы (параллельный поджиг).

Накачка лазерным излучением.

Излучение лазеров может применяться для накачки других лазеров, как, например :

- Ag^+ лазеры широко используются для накачки непрерывных лазеров на красителях и на титане с сапфиром ($Ti^{3+}:Al_2O_3$);
- излучение Nd:YAG лазера и его вторая гармоника используются для накачки непрерывных и импульсных лазеров на красителях и твердотельных лазеров (в том числе, лазеров на центрах окраски).

Однако особую важность накачка лазерным излучением приобрела после появления и широкого распространения диодных лазеров с высокими КПД и мощностью.

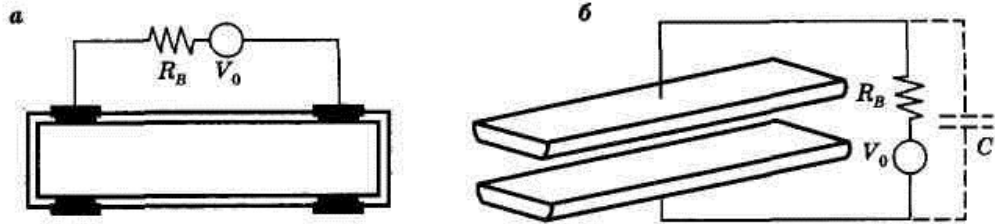
Существует четыре типа излучателей, используемых в системах накачки на основе диодных лазеров. Перечислим их в порядке увеличения выходной мощности:

- 1) однополосковый диодный лазер;
- 2) линейка однополосковых диодных лазеров;
- 3) блок линеек диодных лазеров;
- 4) сборка блоков линеек.

Накачка в электрическом разряде.

Электрическая накачка используется в газовых и полупроводниковых лазерах. Ограничимся здесь рассмотрением газовых лазеров.

Газовый лазер накачивается электрическим разрядом при пропускании через газовую смесь тока — постоянного, радиочастотного (СВЧ) или импульсного. Обычно ток протекает через газовую среду либо вдоль оси лазера (продольный разряд, рис. а), либо перпендикулярно ей (поперечный разряд, рис. б).



В данном случае накачка осуществляется путем пропускания соответствующего тока через газ. При этом в газе образуются ионы и свободные электроны. Ускоряясь в электрическом поле, они приобретают дополнительную кинетическую энергию и при столкновениях способны перевести нейтральный атом в возбужденное состояние. Для такого ударного возбуждения движение ионов обычно играет менее существенную роль, чем движение электронов. По истечении некоторого короткого промежутка времени среди электронов устанавливается равновесие, которое можно характеризовать средней электронной температурой T_e .

Электрическая накачка газа осуществляется с помощью одного из следующих двух процессов.

1) Электронный удар.

В газе, состоящем только из одного сорта частиц: $e + X \rightarrow X^* + e$ — столкновения 1-го рода.

2) В газе состоящем из двух компонентов A и B , возбуждение атомов может осуществляться при столкновении атомов одного сорта друг с другом так и при столкновении атомов различных компонентов благодаря процессу резонансной передачи энергии. Этот процесс накачки атомов B является особенно эффективным, если заранее верхнее состояние атомов A является метастабильным. В этом случае, как только при возбуждении электронным ударом атомы A перейдут на свой верхний уровень, они и будут оставаться на нем в течении довольно длительного времени, образуя тем самым резервуар энергии для возбуждения атомов сорта B .

Процесс такого типа называется столкновением второго рода: $A^* + B \rightarrow A + B^* + \Delta E_r$

ТЕМА 6. СВОЙСТВА, ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

План лекции:

Энергетические, временные спектральные и пространственные характеристики лазерного излучения. Спектральная ширина (модовая структура) лазерного излучения. Эксплуатационные параметры лазерного излучения.

Энергетические, временные спектральные и пространственные характеристики лазерного излучения.

Лазерное излучение ОКГ отличается от существующих электромагнитных излучений оптического диапазона и имеет некоторые специфические свойства, присущие только ОКГ.

Лазерное излучение обладает свойствами как волн, так и частиц.

Основными свойствами лазерного излучения являются:

- монохроматичность,
- высокая когерентность,
- чрезвычайно малая расходимость луча,
- высокая плотность мощности излучения.

Высокая степень монохроматичности лазерного излучения объясняется тем, что стимулированное излучение представляет собой резонансный процесс и вследствие этого привязано к центру полосы частот больше, чем излучение, спонтанно испускаемое обычными источниками излучения.

Лазерное излучение не идеально монохроматично, а лишь квазимонохроматично

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} \ll 1$$

Для любой электромагнитной волны можно определить два независимых понятия когерентности, а именно пространственную и временную когерентность.

Идеальные электромагнитные колебания, если бы они были в природе, то представляли собой колебания точно на одной и той же частоте. В реальных условиях любой генератор электромагнитных колебаний (в оптическом диапазоне атом или молекула) испытывают отклонение частоты ν на некоторую величину $\Delta\nu$. Интервал времени, в течение которого это отклонение не сменится другим отклонением частоты, определяется значением $\Delta\tau = 1/\Delta\nu$ и называется временем когерентности. При $\Delta\nu \rightarrow 0$ $\Delta\tau \rightarrow \infty$.

Пространственно когерентными считают источники которые излучают колебания с одинаковыми фазами или с постоянной разностью фаз.

Пространственная когерентность волн обеспечивает получение концентрации энергии в поперечном сечении лазерного луча, а временная когерентность позволяет все преимущества монохроматического лазерного излучения использовать для передачи информации с помощью передающих и приемных устройств лазерной связи.

Благодаря свойству пространственной когерентности лазерного излучения возможно создать высокоэффективные мощные лазерные устройства с огромной выходной мощностью излучения.

Важным свойством лазерного излучения является его направленность, характеризуемая расходимостью излучения. Под расходимостью пучка излучения понимают плоский или телесный угол при вершине конуса, внутри которого распространяется заданная доля энергии или мощности пучка излучения. Лазеры обладают острой направленностью излучения, а обычные излучатели света имеют слабую направленность.

Лазерное излучение, обладающее исключительно высокой направленностью, имеет следующие преимущества перед излучением обычных источников света:

- дает возможность получить значительную концентрацию энергии в луче;
- имеет очень малые потери энергии при передаче ее на большие расстояния (влияние атмосферы не учитывается);
- высокая угловая разрешающая способность позволяет распознать объекты на расстоянии.

Длительность определяется конструкцией лазера. Можно выделить следующие типичные режимы распределения излучения во времени:

- непрерывный режим;
- импульсный режим, длительность импульса определяется при этом длительностью вспышки лампы накачки, типичная длительность $\Delta\tau_n \sim 10^{-3}$ с;
- режим модуляции добротности резонатора (типичная длительность лежит в интервале $10^{-9} - 10^{-8}$ с);
- режим синхронизации и продольных мод в резонаторе (длительность импульса излучения 10^{-11} с);
- различные режимы принудительного укорочения импульсов излучения (10^{-12} с).

Лазерное излучение может быть сконцентрировано в узконаправленном луче с большой плотностью мощности. Плотность мощности в луче лазера достигает больших величин вследствие сложения энергии огромного множества когерентных излучений отдельных атомов, приходящих в выбранную точку пространства в одинаковой фазе.

Спектральная ширина (модовая структура) лазерного излучения.

Выражение для напряженности поля:

$$u(x, y, z) = \frac{\omega_0}{\omega} \exp\left\{-\frac{x^2 + y^2}{\omega^2}\right\} \exp\left\{-ik \left[\frac{x^2 + y^2}{2R}\right]\right\} \exp i\varphi$$

Из выражения видно, что эта функция является произведением:

- амплитудного сомножителя

$$\frac{\omega_0}{\omega} \exp\left\{-\frac{x^2 + y^2}{\omega^2}\right\}$$

который показывает, что пучок по мере распространения (как при $z > 0$, так и при $z < 0$) сохраняет свою гауссову форму, но размер его пятна изменяется в соответствии с соотношением для $\omega^2(z)$.

- поперечного фазового сомножителя

$$\exp\left\{-ik \left[\frac{x^2 + y^2}{2R}\right]\right\}$$

он показывает, что при распространении в области $z > 0$ пучок имеет приблизительно сферический волновой фронт с радиусом кривизны R .

- продольного фазового сомножителя

$$\exp(i\varphi)$$

помимо фазы $-kz$ плоской волны гауссов пучок имеет дополнительный вклад $\varphi(z)$, изменяющийся от $-(\pi/2)$ до $(\pi/2)$ при распространении пучка из области $z \ll -z_R$ в область $z \gg z_R$.

Другим решением обобщенного уравнения определяющего напряженность электрического поля, в параксиальном приближении, в интегральной форме является набор собственных решений представленных в виде произведения полиномов Эрмита и функции Гаусса:

$$u_{\ell m}(x, y, z) = \frac{\omega}{\omega_0} H_{\ell} \left(\frac{\sqrt{2}x}{\omega} \right) H_m \left(\frac{\sqrt{2}y}{\omega} \right) \exp\left\{-\frac{x^2 + y^2}{\omega^2}\right\} \exp\left\{-ik \left[\frac{x^2 + y^2}{2R}\right] + i[1 + \ell - m] \varphi\right\}$$

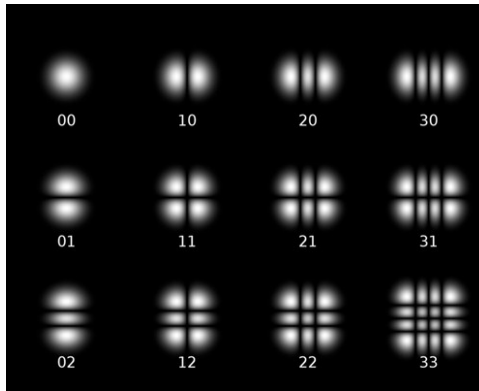
Из данного выражения полагая, что $\ell = m = 0$, можно получить распределение напряженности поля в моде низшего порядка – это решение называют модой TEM_{00} .

Индексы 00 обозначают полиномы нулевого порядка как для H_{ℓ} так и для H_m .

Радиальный профиль интенсивности гауссовой моды TEM_{00} при произвольной координате z определяется выражением

$$I_{00}(x, y) \propto \left\{ \frac{2(x^2 + y^2)}{\omega^2} \right\}$$

Он зависит только от радиальной координаты $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$. Таким образом, этой моде соответствует круглое пятно. Распределение напряженности электрического поля в ближайшей моде более высокого порядка можно получить, полагая $\ell=1$ и $m = 0$ (или $\ell=0$ и $m = 1$) или другим числам.



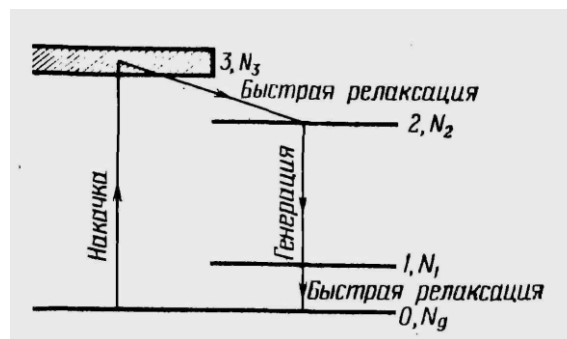
ТЕМА 7. НЕПРЕРЫВНЫЙ И НЕСТАЦИОНАРНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ЛАЗЕРА

План лекции:

Скоростные уравнения. Пороговые условия и выходная мощность. Оптимальная связь на выходе лазера. Перестройка частоты и генерации лазера. Причины возникновения многомодовой конфигурации. Одномодовый режим генерации. Затягивание частоты и предел монохроматичности. Флуктуации частоты генерации и стабилизация частоты лазера. Шум и интенсивность излучения и методы его уменьшения. Релаксационные колебания.

Скоростные уравнения. Пороговые условия и выходная мощность. Оптимальная связь на выходе лазера.

Рассмотрим четырехуровневый лазер имеющий одну полосу поглощения накачки (полоса 3).



Предполагая, что переходы между уровнями 3 и 2 и уровнями 1 и 0 являются быстрыми, можно положить $N_1 \approx N_3 \approx 0$. Таким образом, мы можем написать следующие скоростные уравнения:

$$N_g + N_2 = N_t$$

$$\dot{N}_2 = W_p N_g - Bq N_2 - \frac{N_2}{\tau},$$

$$\dot{q} = V_a Bq N_2 - \frac{q}{\tau_c}$$

Следует заметить, что в данных выражениях пренебрегалось слагаемым, учитывающим спонтанное излучение. Генерация возникает за счет спонтанного излучения, поэтому следует ожидать, что эти уравнения не дают правильного описания возникновения генерации. Если в уравнении нужно учесть спонтанное излучение, то слагаемое $V_a Bq N_2$ следует заменить на $V_a B(q + 1)N_2$. Все это выглядит так, как будто члену, отвечающему вынужденному излучению, мы добавили «дополнительный фотон». Однако лучше вместо дополнительного фотона, связанного со спонтанным излучением, а вместо этого предположим, что в начальный момент времени в резонаторе уже присутствует некоторое небольшое число фотонов q_i , которое необходимо для возникновения генерации.

Уравнения скоростные в совокупности с выражениями для B и τ_c описывают непрерывный и нестационарный режимы работы четырехуровневого лазера. Следует заметить, что обычно уравнения принято записывать, используя не населенность верхнего уровня N_2 , а инверсную населенность:

$$N = N_2 - N_1.$$

Т.к. предполагали, что релаксация с уровня 1 является быстрой, имеем $N=N_2$ и скоростные уравнения сводятся к двум уравнениям в переменных $N(t)$ и $q(t)$:

$$\dot{N} = W_p \cdot (N_t - N) - BqN - \frac{N}{\tau} \quad (4)$$

$$\dot{q} = \left[V_a B N - \frac{1}{\tau_c} \right] \cdot q \quad (5).$$

Это уравнения Стаца де Марса.

Для количественного описания работы лазера необходимо решить эти уравнения с учетом соответствующих начальных условий. Если, например, накачка включается в момент времени $t = 0$, то начальные условия: $N(0) = 0$ и $q(0) = q_i$, где q_i — очень небольшое число

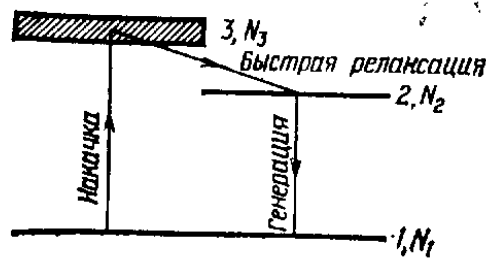
первоначально присутствующих фотонов, которые позволяют учесть эффект спонтанного излучения.

Если $q(t)$ известно, то нетрудно вычислить выходную мощность, излучаемую через одно из двух зеркал резонатора:

$$P_1 = \frac{\gamma_1 l}{2L'} h \omega q$$

γ_1 - потери за проход, обусловленные пропусканием зеркал.

В случае трехуровневого лазера рассмотрение является таким же, как и для четырехуровневого.



При этом скоростные уравнения:

$$N_1 + N_2 = N_t$$

$$\dot{N}_2 = W_p N_1 - Bq(N_2 - N_1) - \frac{N_2}{\tau},$$

$$q = V_a Bq(N_2 - N_1) - \frac{q}{\tau_c}$$

Сводим эти уравнения к двум:

$$\dot{N} = W_p \cdot (N_t - N) - 2BqN - \frac{(N_t + N)}{\tau}$$

$$\dot{q} = \left(V_a BN - \frac{1}{\tau_c} \right) q$$

Эти уравнения описывают как непрерывный, так и нестационарный режим работы трехуровневого лазера.

В данном вопросе изучили работу лазера при стационарной накачке (т.е. когда скорость накачки W_p не зависит от времени). Следовательно, это можно рассматривать как непрерывный режим работы лазера.

При фиксированной скорости накачки существует некоторое значение коэффициента пропускания T выходного зеркала, при котором достигается максимальная выходная мощность.

Физически существование такого оптимума связано с тем, что с увеличением T имеют место два следующих эффекта: с одной стороны, выходная мощность должна возрастать из-за увеличения пропускания выходного зеркала, а с другой — она должна уменьшаться, поскольку с увеличением пропускания возрастают внутррезонаторные потери, что приводит к уменьшению числа фотонов в резонаторе.

Если предположить для простоты, что $W_{cp} = N_c/N_i\tau$, то мощность:

$$P_1 = \left[A_e \cdot I_s \cdot \left(\gamma_i + \frac{\gamma_1}{2} \right) \right] \cdot S \cdot \left(\frac{x_{мин}}{S+1} - 1 \right)$$

A_e – площадь поперечного сечения активной среды лазера, занимаемая генерируемой модой.

I_s – интенсивность при которой в четырехуровневом лазере происходит насыщение усиления.

$$S = \frac{\gamma_1}{\gamma_1 + 2\gamma_i}$$

$x_{мин}$ – отношение фактической скорости накачки W_p к минимальному значению скорости накачки (т.е. скорости накачки, необходимой для достижения порога при несущественных потерях).

Полагая $dP_1/dS = 0$, получаем:

$$S_{opt} = (x_{мин})^{1/2} - 1.$$

При этом:

$$P_{opt} = \left[A_e I_s \cdot \left(\gamma_i + \frac{\gamma_1}{2} \right) \right] \cdot \left[(x_{мин})^{1/2} - 1 \right]^2$$

Уменьшение мощности, обусловленное неоптимальным набором условий генерации, оказывается особенно важным вблизи порога генерации (т. е. когда $x_{мин} \approx 1$). Однако, когда генерация происходит в условиях с большим превышением над порогом, выходная мощность становится практически не чувствительной к изменению связи на выходе вблизи ее оптимального значения.

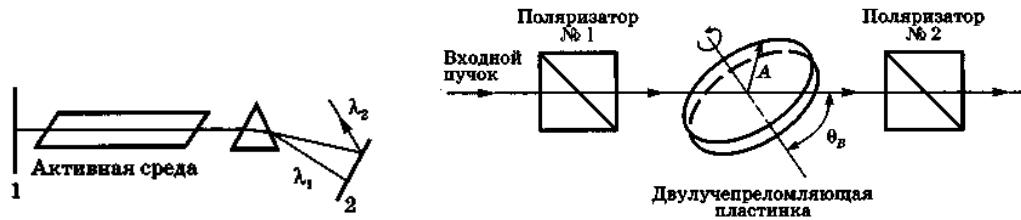
Перестройка частоты и генерации лазера.

Сви́пирование – перестройка частоты генерации лазера или управление спектром лазерного излучения. Применительно к ОКГ генерирующим на двух и более частотах.

Средний ИК-диапазон – дифракционная решетка по схеме Литтроу



Для видимого и ближнего ИК-диапазонов – дисперсионные оптические резонаторы; двулучепреломляющий фильтр, помещенный внутрь резонатора.



Режимы свипирования частоты:

- 1) статический – перестройка происходит в паузах между импульсами излучения;
- 2) динамический – перестройка происходит во время генерации импульса.

Достоинства второго режима:

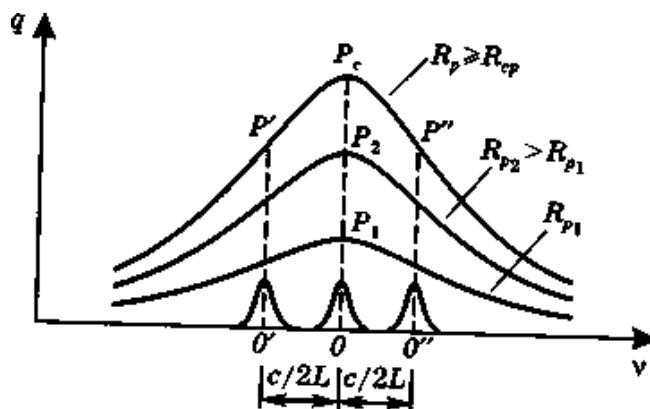
- позволяет упорядочить временные характеристики излучения лазера и модовый состав;
- сузить общую ширину спектра генерации лазера;
- повышает энергетический КПД лазера за счет работы активных центров, не участвующих в генерации в обычном одночастотном режиме;
- позволяет исследовать спектральную структуру однородно и неоднородно уширенных полос люминесценции.

Причины возникновения многомодовой конфигурации. Одномодовый режим генерации.

Лазеры, как правило, генерируют в многомодовом режиме. Это обусловлено тем, что межмодовое расстояние обычно меньше ширины контура усиления.

Рассмотрим кривую контура усиления в зависимости от частоты при различных возрастающих значениях R_p . Можно сказать, что выходное излучение представляет собой цуг нерегулярных во времени импульсов со случайными амплитудами (нерегулярные пички). Кроме того, генерация не переходит в нестационарный режим. Такое поведение объясняется тем, что при переходе от одного пичка к другому или от одного цуга пичков к другому происходит изменение генерируемых мод. Данное явление называется «перескоком мод». В этом случае

выходная мощность лазерного излучения не является регулярной и воспроизводимой во времени.



Однако при некоторых условиях многомодовый лазер может все же работать в режиме регулярных пичков. Это происходит при одновременной генерации большого числа мод со случайными фазами соответствующих электрических полей. Такая ситуация реализуется когда:

- 1) межмодовое расстояние очень мало по сравнению с шириной линии лазерного перехода;
- 2) потери каждой моды велики, а ширины линий сравнимы или больше межмодового расстояния;
- 3) потери для всех мод примерно одинаковы. Однако в этом случае понятие моды резонатора почти не имеет физического смысла и резонатор следует рассматривать как систему с нерезонансной обратной связью.

Флуктуации частоты генерации и стабилизация частоты лазера.

Механизмы смещения частоты моды:

- 1) долговременные флуктуации;
- 2) кратковременные флуктуации.

Методы активной стабилизации длины резонатора:

- 1) одно из зеркал резонатора, устанавливается на пьезометрическом преобразователе;
- 2) использование частотных дискриминаторов с высоким параметром резкости;
- 3) метод Паунда-Древера.

Шум и интенсивность излучения и методы его уменьшения.

Спонтанное излучение и флуктуации длины резонатора приводят к возникновению только частотных шумов и, таким образом, амплитуда поля выходного пучка может рассматриваться как не зависящая от времени. Однако в лазере существуют прочие возмущения,

которые могут быть причиной возникновения амплитудных флуктуации или шумов интенсивности.

Причины шумов интенсивности:

- для газовых лазеров — флуктуации электрического тока в источнике питания, нестабильность электрического разряда в газе, а также разъюстировка зеркал вследствие механических вибраций;

- для лазеров на красителях — флуктуации плотности в потоке красителя, а также наличие в нем пузырьков воздуха;

- для твердотельных лазеров — флуктуации в процессах накачки (как для ламповой, так и для накачки лазерными диодами), разрегулировка резонатора;

- для полупроводниковых лазеров — флуктуации тока смещения, амплитудные флуктуации, вызванные спонтанным излучением и рекомбинационными шумами.

В лазере могут иметь место и долговременные флуктуации выходной мощности, которые обычно обусловлены температурными перепадами в резонаторе лазера, а также деградацией зеркал, выходных окон и других оптических элементов, включая активную среду.

Релаксационные колебания.

Описание нестационарного режима работы лазера можно разделить на две категории:

- релаксационные колебания, модуляция добротности, модуляция усиления и разгрузка резонатора, т. е. механизмы, которые могут быть описаны в рамках модели скоростных уравнений в применении к одномодовым лазерам;

- случаи, когда имеет место моноמודовая генерация, например синхронизация мод, т. е. механизмы, при рассмотрении которых необходимо использовать самые разные подходы либо через описание полей всех генерирующих мод (представление в частотной области), либо в рамках описания распространения самосогласованных импульсов в резонаторе (описание во временной области).

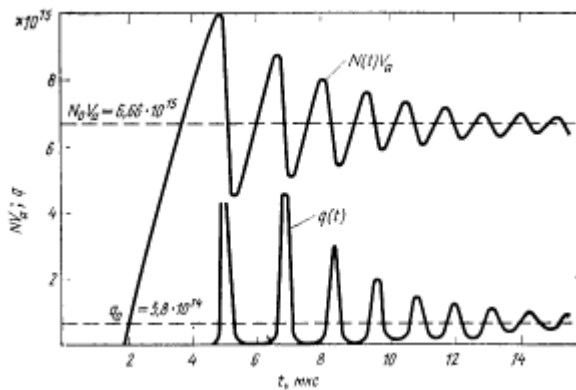
Для того чтобы изучить нестационарный режим работы четырехуровневого и трехуровневого лазеров, необходимо решить соответственно уравнения системы Стаца де Марса для этих лазеров. При этом для данной временной зависимости скорости накачки $W_p(t)$ мы найдем временные зависимости $q(t)$ и $N(t)$, если заданы начальные условия.

Ниже будет рассмотрено нестационарный режим работы.

Уравнения описывающие нестационарный режим, являются нелинейными относительно переменных $q(t)$ и $N(t)$.

Рассмотрим случай, когда скорость накачки описывается ступенчатой функцией. Таким образом, предположим, что $W_P=0$ при $t<0$ и $W_P(t) =W_P$ при $t > 0$. Предположим, что лазер генерирует на одной моде, поскольку лишь при этом условии справедливы уравнения Стаца де Марса.

Пример временной зависимости полной инверсии $N(t)V_a$ и числа фотонов $q(t)$ в трехуровневом лазере.



Численные расчеты в случае трехуровневого лазера типа рубинового.

При расчете использовались начальные условия: $N(0) = -N_i$, $q(0) = q_i$.

Особенности кривых на рисунке:

- 1) число фотонов $q(t)$ в резонаторе описывается регулярной последовательностью уменьшающихся по амплитуде пиков (пичков) с временным интервалом между ними, равным нескольким микросекундам;
- 2) инверсия населенностей $N(t)$ осциллирует относительно стационарного значения N_0 ;
- 3) в соответствии с скоростными уравнениями как $N(t)$, так и $q(t)$ и конечном счете достигают своих стационарных значений. Осциллирующий характер кривых $N(t)$ и $q(t)$ объясняется тем, что, после того как изменилась инверсия населенностей, число фотонов изменяется не сразу, а с некоторой задержкой.

Таким образом, когда $N(t)$ проходит впервые через значение N_0 , достигается пороговое условие и лазер может начать генерировать. При этом в течение некоторого времени число фотонов в резонаторе возрастает относительно своего начального значения, определяемого спонтанным излучением, и благодаря продолжающемуся процессу накачки инверсия населенностей $N(t)$ в течение этого времени может непрерывно нарастать выше значения N_0 . Однако, когда $q(t)$ достигнет достаточно большого значения, $N(t)$ начнет уменьшаться из-за высокой скорости вынужденного излучения. В момент времени, когда $q(t)$ достигает максимума, $N(t)$ спадает до значения N_0 . Вследствие все еще большой скорости вынужденного излучения

населенность $N(t)$ продолжает уменьшаться после значения N_0 . При этом лазер оказывается в условиях ниже пороговых и генерация должна прекратиться. Затем благодаря накачке $N(t)$ снова возрастает до тех пор, пока не достигнет порогового значения, когда в резонаторе число фотонов может вновь нарастать и т.д. Следует заметить, что поскольку в конце концов достигаются стационарные решения определяемые скоростными уравнениями, численный расчет подтверждает, что эти решения соответствуют устойчивому режиму работы.

Теоретическое рассмотрение многомодового режима генерации становится существенно более сложным. В этом случае недостаточно просто определить полное число фотонов, просуммированное по всем генерируемым модам. Действительно, чтобы учесть временную и пространственную интерференцию мод, необходимо записать столько уравнений для электрических полей электромагнитных волн, сколько генерируется мод.

Можно сказать, что выходное излучение представляет собой цуг нерегулярных во времени импульсов со случайными амплитудами (нерегулярные пички). Кроме того, генерация не переходит в нестационарный режим. Такое поведение объясняется тем, что при переходе от одного пичка к другому или от одного цуга пичков к другому происходит изменение генерируемых мод. Данное явление называется «перескоком мод». В этом случае выходная мощность лазерного излучения не является регулярной и воспроизводимой во времени.

Однако при некоторых условиях многомодовый лазер может все же работать в режиме регулярных пичков. Это происходит при одновременной генерации большого числа мод со случайными фазами соответствующих электрических полей. Такая ситуация реализуется когда:

- 4) межмодовое расстояние очень мало по сравнению с шириной линии лазерного перехода;
- 5) потери каждой моды велики, а ширины линий сравнимы или больше межмодового расстояния;
- 6) потери для всех мод примерно одинаковы. Однако в этом случае понятие моды резонатора почти не имеет физического смысла и резонатор следует рассматривать как систему с нерезонансной обратной связью.

ТЕМА 8. УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Способы получения одномодового и одночастотного излучения. Схемы и устройства селекции продольных и поперечных мод лазерного излучения. Модуляция добротности. Режим синхронизации мод.

Способы получения одномодового и одночастотного излучения. Схемы и устройства селекции продольных и поперечных мод лазерного излучения.

1) Селекция отдельной поперечной моды:

- увеличение длины конфокального сферического резонатора,
- увеличение длины полуконфокального резонатора,
- введение в резонатор диафрагм,
- введение в резонатор двух линз и диафрагмы.

2) Селекция отдельной продольной моды

- использование коротких резонаторов,
- селекция мод с пьезоэлектрическим управлением,
- введение внешнего фильтра,
- введение внутреннего фильтра,
- введение поглощающей пленки,
- введение газовой ячейки с нелинейным поглощением.

Модуляция добротности.

Метод модуляции добротности позволяет получать лазерную генерацию в виде коротких импульсов (длительностью от нескольких наносекунд до нескольких десятков наносекунд) с высокой пиковой мощностью (от нескольких мегаватт до нескольких десятков мегаватт).

Принцип работы лазера в режиме добротности модуляции состоит в следующем. Предположим, что в резонатор лазера помещен затвор. Если затвор закрыт, то генерация возникнуть не может и инверсия населенностей может достичь значения, которое намного превышает пороговое, имеющее место в отсутствие затвора. Если теперь резко открыть затвор, то усиление в лазере существенно превысит потери и накопленная энергия выделится в виде короткого и интенсивного светового импульса. Поскольку при этом происходит переключение добротности резонатора от низкого к высокому значению, то данный метод называется модуляцией добротности. При условии что затвор открывается за время, которое является коротким по сравнению с временем линейного развития лазерного импульса, выходное излучение состоит из одиночного гигантского импульса. В случае же медленного открывания затвора в генерации может возникнуть несколько импульсов. В самом деле, энергия, накопленная в активной среде до момента полного открывания затвора, высвечивается в виде последовательных порций, каждая из которых соответствует излучению импульса. Каждый импульс приводит к тому, что усиление становится ниже мгновенного порогового значения и

подавляет тем самым генерацию до тех пор, пока продолжающееся открывание затвора не приведет к уменьшению потерь в резонаторе лазера u_l , следовательно, не понизит порог генерации.

Для модуляции добротности наиболее широко используются следующие устройства.

1) Электрооптические затворы. Эти затворы основаны на электрооптическом эффекте, обычно на эффекте Поккельса, устройство в котором при приложении к нему постоянного электрического напряжения возникает двойное лучепреломление.

2) Механические затворы. Модуляции добротности осуществляется механически, т.е. вращением одного из зеркал лазерного резонатора вокруг оси, перпендикулярной оси резонатора. (скорость вращения очень большая).

3) Затворы на основе насыщающегося поглотителя. Затвор представляет собой кювету, наполненную некоторым насыщающимся поглотителем, который поглощает свет, и длина которого совпадает с длиной волны лазерного излучения. Используют раствор органического красителя.

4) Акустооптические модуляторы добротности. Оптически прозрачное вещество, в котором с помощью пьезоэлектрического преобразователя возбуждается ультразвуковая волна, которая приводит к тому, что это вещество работает как фазовая решетка.

Режимы генерации.

Лазеры с модулированной добротностью могут работать в импульсном режиме или импульсно-периодическом режимах.

При импульсном режиме скорость накачки $W_p(t)$ имеет форму импульса определенной длительности. До момента включения добротности инверсия населенностей $N(t)$ нарастает до максимального значения, а затем спадает. Добротность резонатора включается в момент времени, когда $N(t)$ становится максимальной. С этого момента времени ($t > 0$) начинает увеличиваться число фотонов, что приводит к возникновению импульса генерации, максимум которого имеет место в некоторый момент времени t_d после включения добротности резонатора. Увеличение числа фотонов приводит к уменьшению инверсии населенностей $N(t)$ от некоторого начального значения N_i до конечного значения N_f , которое достигается после того, как импульс генерации закончится.

Затворы - электрооптические, механические, насыщающиеся.

Импульсно-периодический режим с модуляцией добротности при непрерывной накачке. Этот режим осуществляется при непрерывной накачке лазера и периодическом переключении

потерь резонатора до низкого уровня. При этом выходное излучение лазера представляет собой непрерывный цуг световых импульсов, а инверсия периодически изменяется от начального значения N_i до конечной величины N_f .

Затворы - электрооптические, акустооптические.

Режим синхронизации мод.

Метод синхронизации мод позволяет получить генерацию лазерных импульсов сверхкороткой длительности (от нескольких десятков фемтосекунд до нескольких десятков пикосекунд) и очень высокой пиковой мощности. Синхронизация мод соответствует условию генерации, при котором моды резонатора генерируют с примерно одинаковыми амплитудами и синхронизованными фазами.

Рассмотрим частотное распределение амплитуд мод лазера с синхронизованными модами:

Однородное распределение



Гауссово распределение в полосе шириной $\Delta\omega_{ген}$, измеряемой на полувысоте.



Условие синхронизации фаз φ_l :

$$\varphi_l - \varphi_{l-1} = \varphi$$

φ – постоянная величина.

1) электрическое поле электромагнитной волны можно записать в виде:

$$E(t) = A(t) \cdot \exp(i\omega_0 t), \text{ где } A(t) = \frac{E_0 \cdot \sin\left[(2n+1) \cdot \frac{(\Delta\omega t + \varphi)}{2}\right]}{\sin\left[\frac{(\Delta\omega t + \varphi)}{2}\right]}; \Delta\omega = \frac{\pi \cdot c}{L}.$$

$E(t)$ представляет собой несущую синусоидальную волну на центральной частоте ω_0 с амплитудой $A(t)$.

При выполнении условия синхронизации фаз моды интерферируют, что приводит к образованию коротких световых импульсов.

Два соседних импульса разделены между собой временным интервалом:

$$\tau_p = \frac{2\pi}{\Delta\omega}$$

Это время, необходимое для полного прохода резонатора. Следовательно, генерацию можно представить себе также в виде импульса, распространяющегося в резонаторе туда и обратно.

Ширина: $\Delta\tau \approx 1/\Delta\nu_{ген}$, $\Delta\tau_{ген} = (2n+1) \cdot \Delta\omega / 2\pi$ - полная ширина спектра генерируемого излучения.

Таким образом, можно видеть, что для получения очень коротких импульсов требуется большая ширина генерируемого спектра.

2) Гауссово распределение описывается выражением:

$$E(t) = A(t) \cdot \exp(i\omega_0 t)$$

$$A(t) = \int E_l \exp \cdot i(l \cdot \Delta\omega t) \cdot dl - \text{Фурье образ спектральной амплитуды.}$$

Длительность импульса $\Delta\tau_p$, определяемая на полувысоте, дается выражением:

$$\Delta\tau_p = 0,441 \cdot \Delta\nu_{ген}$$

После рассмотрения этих двух примеров синхронизации мод, можно в заключение сделать вывод, что при выполнении условия синхронизации мод амплитуда поля оказывается пропорциональной фурье-образу спектральной амплитуды. Длительность импульса $\Delta\tau_p$ связана с шириной спектральной интенсивности $\Delta\nu_{ген}$ соотношением $\Delta\tau_p = k/\Delta\nu_{ген}$, где k — числовой множитель (порядка единицы), который зависит от конкретного вида распределения спектральной интенсивности. Такой импульс называют импульсом, длительностью которого определяется обратной шириной спектра.

Наиболее широкое применение нашли следующие два метода синхронизации мод:

- 1) синхронизация мод, осуществляемая активным модулятором, управляемым внешним сигналом (активная синхронизация мод),
- 2) синхронизация мод с помощью соответствующей-нелинейной оптической среды (пассивная синхронизация мод).

Лазеры с синхронизацией мод могут работать либо с импульсной, либо с непрерывной накачкой.

В импульсном режиме общая длительность $\Delta\tau_p'$ огибающей цуга импульсов с синхронизованными модами в некоторых случаях определяется длительностью накачки.

Однако в ряде других случаев наличие насыщающегося поглотителя приводит одновременно как к модуляции добротности, так и к синхронизации мод. Тогда длительность $\Delta\tau_p'$ огибающей цуга импульсов с синхронизованными модами определяется длительностью $\Delta\tau_p$ импульса лазера с модулированной добротностью.

В импульсном режиме для синхронизации мод чаще всего применяют электрооптический модулятор или кювету с насыщающимся поглотителем.

В случае получения непрерывной генерации с синхронизацией мод накачка лазера осуществляется непрерывно, а синхронизация мод достигается с помощью насыщающегося поглотителя или акустооптического модулятора.

ТЕМА 10. ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ

План лекции:

Применение лазеров в физике и химии. Применение в обработке и записи информации. Применение в оптической связи. Применение в биологии и медицине. Применение в промышленной технологии. Применение для измерения и контроля. Применение в военных целях.

Применение в физике и химии

Изобретение и последующие разработки лазеров опирались на фундаментальные исследования в области физики и химии.

В физике использование лазеров, с одной стороны, привело к открытию совершенно новых областей исследования, а с другой— в огромной степени способствовало развитию некоторых уже существующих.

Особенно интересным примером является нелинейная оптика. Высокая интенсивность лазерного пучка позволяет наблюдать явления, обусловленные нелинейным откликом среды. В физике и химии важную роль играют измерения характеристик различных сред после того, как они подверглись воздействию коротких световых импульсов. Эти измерения требуют высокого разрешения во времени. Применение лазеров существенно увеличивает возможности таких измерений. Еще одна область исследований – лазерная спектроскопия, позволяющая проводить спектроскопические измерения с разрешающей способностью, которая на много порядков превышает разрешение, достигаемое с помощью обычных спектроскопических методов.

В химии лазеры применяются как в целях диагностики, так и для получения необратимых химических изменений. Методы резонансного комбинационного рассеяния и когерентного антистоксового рассеяния дают важную информацию о структуре и свойствах

многоатомных молекул, концентрации различных молекулярных соединений (исследование процессов сгорания в пламени и плазмы). Наиболее интересным химическим применением лазера является фотохимия – разделение изотопов.

Применение в биологии и медицине

В биологии и медицине лазеры получают все большее распространение. Здесь они опять-таки могут использоваться либо для целей диагностики, либо для получения необратимых изменений в биомолекулах, клетках или тканях (лазерная фотобиология и лазерная хирургия). Диагностика: флуоресценция, вызванная действием сверхкоротких лазерных импульсов в молекулах ДНК, в комплексах пигмент-ДНК и в пигментах, участвующих в фотосинтезе; резонансное комбинационное рассеяние для изучения биомолекул; фотокорреляционная спектроскопия для получения информации о структуре и степени агрегации различных биомолекул;

Лазеры используются для создания необратимых изменений в биомолекуле или части клетки. Основная цель этого метода состоит в том, чтобы выяснить, как влияет на функционирование клетки ее повреждение на некотором конкретном участке, вызванное лазерным излучением.

В медицине лазеры используются: лазерная хирургия; в офтальмологии; лазерная флуоресцентная бронхоскопия.

Обработка материалов

Благодаря высокой интенсивности, достигаемой в фокальном пятне лазерного пучка большой мощности, лазеры нашли многочисленные применения в технологии и при обработке материалов, например при сварке, резке, сверлении, поверхностной обработке и легировании.

Оптическая связь

Возможность использования лазерного пучка для связи через атмосферу вызвала сначала очень большой энтузиазм, поскольку лазеры в принципе имеют два важных преимущества.

Во-первых, это широкая полоса частот, а количество информации, передаваемой данной несущей волной, пропорционально ширине ее полосы частот. При переходе от микроволнового к оптическому диапазону частота несущей увеличивается приблизительно в 10^4 раз, что позволяет использовать значительно более широкую полосу частот. Во-вторых, это малая длина волны излучения.

Однако, оба этих преимущества сводятся к нулю, поскольку в условиях плохой видимости свет быстро затухает в атмосфере. Поэтому применение лазеров в открытой (без использования волновода) связи ограничилось двумя случаями. Одним из них является осуществление космической связи между двумя спутниками или между спутником и наземной станцией, расположенной в особо благоприятных климатических условиях.

Измерения и контроль

Такие свойства лазеров, как направленность, яркость и монохроматичность, сделали их весьма полезными для множества методов измерения и контроля в промышленности при управлении станками и в гражданском строительстве: юстировка; выравнивание конструкций; измерения расстояний; для измерения скорости жидкостей и твердых тел; измерения концентрации различных загрязнений в атмосфере и др.

Термоядерный синтез

Главная проблема при производстве энергии путем термоядерного синтеза заключается в том, чтобы получить и затем удержать плазму, состоящую из тяжелых изотопов водорода. Лазеры позволяют осуществлять инерциальное удержание плазмы, поскольку лазерное излучение может обеспечить быстрый разогрев плазмы. Лазер, с помощью которого можно осуществить управляемый лазерный термоядерный синтез, должен иметь длину волны между 250 и 2000 нм, энергию импульса $(1—3) \cdot 10^6$ Дж, длительность импульса $(5—10) \cdot 10^{-9}$ с и, следовательно, пиковую мощность >200 ТВт.

Применения в военных целях: лазерные дальномеры; лазерные целеуказатели; оружие направляемой энергии.

Голография

В научных приложениях используется голографический метод, который позволяет записывать и измерять напряжения и вибрации трехмерных объектов – голографическая интерферометрия (плюс дефектоскопия и составление различных контурных карт различных объектов).

2 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

2.1 Общие рекомендации по подготовке к практическим занятиям

Практические занятия по решению задач существенно дополняют лекции. В процессе анализа и решения задач студенты расширяют и углубляют знания, полученные из лекционного курса и учебников, учатся глубже понимать законы и формулы, разбираться в их особенностях, границах применения, приобретают умение применять общие закономерности к конкретным случаям.

В процессе решения задач вырабатываются навыки вычислений, работы со справочной литературой, таблицами. Решение задач не только способствует закреплению знаний и тренировке в применении изучаемых законов, но и формирует особый стиль умственной деятельности.

Когда студенты решают задачи по определённой теме, очень важно, чтобы в результате знакомства с конкретными задачами они усвоили принципиальный подход к познанию достаточно широкого класса явлений.

На практических занятиях используются несколько видов задач и планы их решения:

- 1) задачи-упражнения, помогающие студентам приобрести твёрдые навыки расчёта и вычислений;
- 2) задачи для демонстрации практического применения тех или иных законов;
- 3) задачи для закрепления и контроля знаний.

Несмотря на различие в видах задач, их решение можно проводить по следующему общему плану (некоторые пункты плана могут выпадать в некоторых конкретных случаях), который надо продиктовать студентам:

- 1) прочесть внимательно условие задачи;
- 2) посмотреть, все ли термины в условиях задачи известны и понятны (если что-то неясно, следует обратиться к учебнику, просмотреть решения предыдущих задач, посоветоваться с преподавателем);
- 3) записать в сокращённом виде условие задачи (когда введены стандартные обозначения, легче вспоминать формулы, связывающие соответствующие величины, чётче видно, какие характеристики заданы, все ли они выражены в одной системе единиц и т.д.);
- 4) сделать чертёж, если это необходимо (делая чертёж, нужно стараться представить ситуацию в наиболее общем виде);

5) произвести анализ задачи, вскрыть её физический смысл (нужно чётко понимать, в чем будет заключаться решение задачи);

6) установить, какие законы и соотношения могут быть использованы при решении данной задачи;

7) составить уравнения, связывающие величины, которые характеризуют рассматриваемые явления с количественной стороны;

8) решить эти уравнения относительно неизвестных величин, получить ответ в общем виде. Прежде чем переходить к численным значениям, полезно провести анализ этого решения: он поможет вскрыть такие свойства рассматриваемого явления, которые не видны в численном ответе;

9) перевести количественные величины в общепринятую систему единиц (СИ), найти численный результат;

10) проанализировать полученный ответ, выяснить как изменяется искомая величина при изменении других величин, функцией которых она является, исследовать предельные случаи.

Приведенная последовательность действий при решении задач усваивается студентами, как правило, в ходе занятий, когда они на практике убеждаются в её целесообразности. Поэтому в конце занятия полезно подвести итог, сформулировать найденный алгоритм рассуждений. Заметим, впрочем, что не всегда может быть предложен алгоритм решения задачи.

2.2 Примерные темы практических занятий, примерные задачи и темы докладов по изучаемым темам

Практические занятия по дисциплине предусматривают решение задач по определенным темам дисциплины, выполнение домашних заданий (ДЗ). Часть занятий проводится в виде семинаров с целью более подробного рассмотрения наиболее важных вопросов. Вопросы к семинарам составляются на основе плана лекции.

Так же на практических занятиях осуществляется текущий контроль знаний студентов по темам дисциплины в виде коллоквиума (КЛ), доклада с презентацией по выбранной теме (Д) и итогового теста (ИТ).

№	Тематика практических занятий	Содержание занятия	Кол-во академ. часов	Форма Контроля
1	Тема 1. Исходные концепции	Решение задач Семинар	4	ДЗ
2	Тема 2. Взаимодействие излучения с атомами и ионами	Решение задач Семинар	4	ДЗ

№	Тематика практических занятий	Содержание занятия	Кол-во академ. часов	Форма Контроля
3	Тема 3. Формирование и преобразование лазерных пучков оптическими элементами и системами	Решение задач Семинар	4	ДЗ
4	Тема 4. Оптические резонаторы	Семинар	2	
5	Тема 5. Способы возбуждения активных сред	Семинар	2	
6	Тема 6. Свойства, параметры и характеристики лазерного излучения	Семинар Коллоквиум темы 1-6	6	КЛ
7	Тема 7. Непрерывный и нестационарный режим работы лазера	Семинар	4	
8	Тема 8. Управление параметрами лазерного излучения	Семинар	2	
9	Тема 9. Типы лазеров	Семинар. Устный доклад по типу лазера с презентацией.	6	Д
10	Тема 10. Применение лазеров	Выполнение итогового теста	2	ИТ

Тема «Исходные концепции»

1. Если уровни 1 и 2 разделены, интервалом энергий $E_2 - E_1$, таким, что частота, излучения, соответствующая переходу с уровня 2 на уровень 1, приходится на середину видимого участка спектра (0,55 мкм), то каково отношение населенностей этих двух уровней при комнатной температуре в состоянии термодинамического равновесия?

2. Пусть отношение населенностей N_2/N_1 двух уровней, находящихся в термодинамическом равновесии при температуре $T = 300\text{ К}$, равно $1/e$. Вычислите частоту излучения ν , соответствующую переходу между этими уровнями. В какую область электромагнитного спектра попадает излучение с такой частотой?

3. Лазерный резонатор состоит из двух зеркал с коэффициентами отражения $R_2 = 1$ и $R_1 = 0,5$. Длина активной среды $l = 7,5\text{ см}$, а сечение перехода $\sigma = 8,8 \cdot 10^{-19}\text{ см}^2$. Вычислите порог инверсной населенности.

4. Пучок рубинового лазера ($\lambda = 0,6943\text{ мкм}$) проходит через телескоп диаметром 1 м и посылается на Луну. Рассчитайте диаметр D пучка на Луне, предполагая, что пучок обладает полной пространственной когерентностью (расстояние от Земли до Луны приблизительно равно 384 000 км).

Тема «Взаимодействие излучения с атомами и ионами»

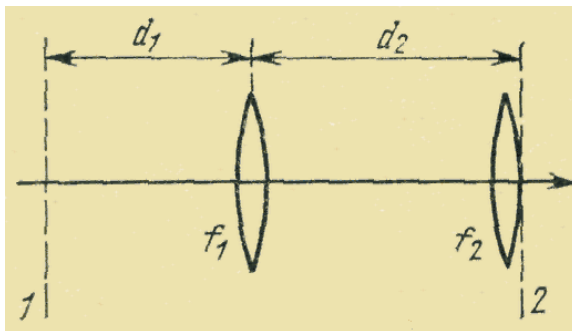
1. Имеется резонатор объемом $V = 1 \text{ см}^3$. Найдите, сколько мод резонатора находится в полосе $\Delta\lambda = 0,01 \text{ мкм}$ с центральной длиной волны $\lambda = 600 \text{ нм}$.
2. Длина волны λ_m , которая соответствует максимуму распределения, удовлетворяет соотношению $\lambda_m \cdot T = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ (закон Вина). Найдите значение λ_m при температуре $T = 6000 \text{ К}$. Какой цвет имеет излучение с этой длиной волны?
3. Линия лазерного перехода R_1 рубина хорошо описывается лоренцевой кривой, причем ее ширина, определяемая по уровню 0,5 от максимального значения, при комнатной температуре равна 330 ГГц . Измеренное максимальное значение сечения перехода $\sigma = 2,5 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$. Вычислите излучательное время жизни (показатель преломления $n = 1,76$). Если экспериментально наблюдаемое время жизни при комнатной температуре составляет 3 мс , то чему равен квантовый выход флуоресценции?
4. Переход, соответствующий излучению He-Ne-лазера с длиной волны $\lambda = 1,15 \text{ мкм}$, имеет доплеровскую ширину $\Delta\nu_0^* = 9 \cdot 10^8 \text{ ГГц}$. Время жизни верхнего состояния приблизительно равно 10^{-7} с . Вычислите максимальное значение сечения перехода, считая, что время жизни лазерного перехода равно полному времени жизни верхнего состояния.

Тема «Пассивные оптические резонаторы»

1. В He-Ne-лазере используется конфокальный резонатор длиной $L = 1 \text{ м}$. Лазер работает на длине волны $\lambda = 0,6328 \text{ мкм}$, и имеет доплеровскую ширину $\Delta\nu_0^* = 1,7 \text{ ГГц}$. Вычислите: 1) размер пятна в центре резонатора и на зеркалах; 2) разность частот между двумя соседними продольными модами; 3) сколько различных по частоте мод лежит в пределах ширины линии Ne, определяемой по уровню 0,5 от максимального значения.
2. Вычислите размер пятна на обоих зеркалах полуконфокального резонатора длиной $L = 2 \text{ м}$, используемого в CO₂-лазере, работающем на длине волны $\lambda = 10,6 \text{ мкм}$.
3. Имеется резонатор, образованный двумя вогнутыми сферическими зеркалами радиусом 4 м и расстоянием между ними 1 м . Вычислите размер пятна моды TEM₀₀ в центре резонатора, если резонатор используется для генерации излучения на длине волны $\lambda = 514,5 \text{ нм}$ (одна из линий излучения Ar⁺-лазера).
4. Резонатор образован выпуклым сферическим зеркалом с радиусом кривизны $R_1 = -1 \text{ м}$ и вогнутым сферическим зеркалом с радиусом $R_2 = 1,5 \text{ м}$. Каково должно быть максимальное расстояние между зеркалами, чтобы резонатор оставался устойчивым?

Тема «Распространение лучей и волн в оптических средах»

1. Найдите матрицу $(ABCD)$ преобразования луча при прохождении луча сквозь линзу с фокусным расстоянием f .
2. Найдите матрицу $(ABCD)$ преобразования луча при отражении луча сферическим зеркалом с радиусом кривизны R и фокусным расстоянием $f = R/2$.
3. Найдите матрицу $(ABCD)$ преобразования луча при последовательном прохождении луча через систему свободное пространство-тонкая линза (с фокусным расстоянием f_1) – тонкая линза (с фокусным расстоянием f_2).



4. Интерферометр Фабри – Перо состоит из двух зеркал с одинаковым энергетическим коэффициентом отражения $R = 0,99$ и одинаковыми относительными внутренними энергетическими потерями $A = 0,005$. Вычислите максимальное пропускание интерферометра и его добротность.
5. Интерферометр Фабри – Перо, состоящий из двух идентичных зеркал, разделенных воздушным промежутком толщиной L , освещается монохроматической электромагнитной волной с перестраиваемой частотой. Из измерения зависимости интенсивности выходного пучка от частоты падающей волны было найдено, что область свободной дисперсии интерферометра равна $3 \cdot 10^9$ Гц, а его разрешение составляет 60 МГц. Вычислите расстояние между зеркалами L интерферометра, его добротность и коэффициент отражения зеркал.

Темы докладов

Цель подготовки доклада – на основании полученных знаний по дисциплине представить информацию по определенному типу лазера, научиться формировать научный доклад, свободно владеть информацией по теме доклада, научиться свободно держаться перед аудиторией, безукоризненно владеть голосом, отвечать на вопросы аудитории.

1. Твердотельные лазеры:
 1. Рубиновый лазер

2. Nd: YAG – лазер
3. Лазер на стекле с неодимом
4. Волоконные лазеры
2. Газовые лазеры:
 1. Гелий-неоновый лазер
 2. Аргоновый лазер
 3. He-Cd лазер
 4. CO₂ – лазер
 5. СО –лазер
 6. Азотный лазер
 7. Экимерные лазеры
3. Лазеры на красителях
4. Химические лазеры
5. Полупроводниковые лазеры:
 1. Лазер на гомопереходе
 2. Лазеры на двойном гетеропереходе
 3. Полупроводниковые лазеры на квантовых ямах
6. Лазеры на свободных электронах
7. Рентгеновские лазеры

Основные пункты доклада

Введение (историческая справка).

1. Активная среда:

- химические элементы, схемы энергетических уровней;
- кинетические уравнения;
- способ создания инверсии населенностей.

2. Резонатор:

- тип;
- технические приспособления.

3. Энергетические характеристики лазера.

4. Улучшение характеристик лазера.

5. Применение

Результатом подготовки доклада должно быть:

- усвоенное умение дать полное описание определенного типа лазера с заданными характеристиками, с указанием используемой активной среды (химический состав, схема энергетических уровней) и резонатора, приведением энергетических характеристик лазера, описанием способа создания инверсии населенностей в данном ОКГ;
- в целом успешное применение методов обработки и анализа физических процессов, описывающих генерацию лазерного излучения;
- предоставление презентации по теме доклада, владение информацией на достаточном уровне для ответов на вопросы при защите темы доклада.

3 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ

3.1 Общие рекомендации по организации внеаудиторной самостоятельной работы

В высшей школе студент должен прежде всего сформировать потребность в знаниях и научиться учиться, приобрести навыки самостоятельной работы, необходимые для непрерывного самосовершенствования, развития профессиональных и интеллектуальных способностей.

Самостоятельная работа – это процесс активного, целенаправленного приобретения студентом новых для него знаний и умений без непосредственного участия преподавателей.

Для успешной самостоятельной работы студент должен планировать свое время и за основу рекомендуется брать рабочую программу учебной дисциплины.

При организации самостоятельной работы следует взять за правило:

- учиться ежедневно, начиная с первого дня семестра, пропущенные дни будут потеряны безвозвратно;
- чтобы выполнить весь объем самостоятельной работы, необходимо заниматься по 3–5 часов ежедневно;
- начиная работу, надо выбрать что-нибудь среднее по трудности, затем перейти к более трудной работе, и напоследок оставить легкую часть, требующую не столько больших интеллектуальных усилий, сколько определенных моторных действий.

Виды заданий для внеаудиторной самостоятельной работы, их содержание и характер могут иметь вариативный и дифференциальный характер, учитывать специфику специальности, изучаемой дисциплины, индивидуальные особенности студента.

Ниже представлены рекомендации по организации работы по основным видам самостоятельной внеаудиторной деятельности студентов по изучаемой дисциплине.

3.2 Работа с учебно-методическим и информационным обеспечением

Важной составляющей самостоятельной внеаудиторной подготовки по всем типам занятий является работа с литературой. Умение работать с литературой означает научиться осмысленно пользоваться учебно-методическим и другим информационным обеспечением дисциплины.

Для изучения дисциплины вся рекомендуемая литература подразделяется на основную и дополнительную и приводится в п. 10 рабочей программы дисциплины.

К основной литературе относятся источники, необходимые для полного и твердого усвоения учебного материала (учебники и учебные пособия).

Поскольку в учебной литературе (учебниках) зачастую остаются неосвещенными современные проблемы, а также не находят отражения новые документы, события, явления, научные открытия последних лет, то рекомендуется для более углубленного изучения программного материала дополнительная литература.

Прежде чем приступить к чтению, необходимо запомнить или записать выходные данные издания: автор, название, издательство, год издания, название интересующих глав.

Содержание (оглавление) дает представление о системе изложения ключевых положений всей публикации и помогает найти нужные сведения.

Предисловие или введение книги поможет установить, на кого рассчитана данная публикация, какие задачи ставил перед собой автор, содержится краткая информация о содержании глав работы. Иногда полезно после этого посмотреть послесловие или заключение. Это помогает составить представление о степени достоверности или научности данной книги.

Изучение научной учебной и иной литературы требует ведения рабочих записей. Форма записей может быть весьма разнообразной: простой или развернутый план, тезисы, цитаты, конспект. Такие записи удлиняют процесс проработки, изучения книги, но способствуют ее лучшему осмыслению и усвоению, выработке навыков кратко и точно излагать материал. При изучении литературы особое внимание следует обращать на новые термины и понятия. Записи позволяют восстановить в памяти ранее прочитанное без дополнительного обращения к самой книге.

Процесс изучения дисциплины предполагает также активное использование информационных технологий при организации своей познавательной деятельности.

Наличие огромного количества материалов в Сети и специализированных поисковых машин делает Интернет незаменимым средством при поиске информации в процессе обучения.

Однако при использовании интернет-ресурсов следует учитывать следующие рекомендации:

- необходимо критически относиться к информации;
- следует научиться обрабатывать большие объемы информации, представленные в источниках, уметь видеть сильные и слабые стороны, выделять из представленного материала наиболее существенную часть;
- необходимо избегать плагиата, поэтому, если текст источника остается без изменения, необходимо сделать ссылки на автора работы.

3.3 Подготовка к практическим занятиям

Практическое занятие – вид учебных занятий, направленное на приобретение первоначальных практических навыков в решении различного вида задач в рамках изучаемой темы. А умение решать задачи – важный критерий усвоения теоретического материала.

Целью практических занятий является закрепление, расширение, углубление теоретических знаний, полученных на лекциях и в ходе самостоятельной работы, развитие познавательных способностей и формирование у студентов умений продуктивной учебной деятельности путем – решения задач различного вида; выполнения расчетно-графических работ (домашних заданий) и устного опроса по теме практического занятия.

При подготовке к практическому занятию студент должен проработать теоретический материал, относящийся к теме занятия. Следует изучить конспект лекции, а также конспект материала самостоятельного изучения темы или дополнительные рекомендованные преподавателем материалы. При этом необходимо выяснить физический смысл всех величин, встречающихся в конспекте лекций по данному вопросу.

Решение задач требует четкого знания формулировок законов, условий применения этих законов при решении практических задач, правильного написания формул, системы единиц физических величин.

Если в процессе самостоятельной работы при решении задач у студента возникают вопросы, разрешить которые самостоятельно не удастся, необходимо обратиться к преподавателю для получения у него разъяснений или указаний. В своих вопросах студент должен четко выразить, в чем он испытывает затруднения, характер этого затруднения. За консультацией следует обращаться и в случае, если возникнут сомнения в правильности ответов на вопросы самопроверки.

Для практических занятий по дисциплине у студента должна быть отдельная тетрадь. Студенту рекомендуется при подготовке к практическому занятию выписать:

- основные законы, условия их выполнения;
- пояснить физический смысл величин, входящих в закон, обозначить единицы измерения;
- графические иллюстрации, поясняющие физический смысл величин, входящих в закон;
- численные значения постоянных, входящих в математическую формулу закона;
- кратко перечислить практические случаи применения закона.

Такая подготовка способствует успешному ответу в ходе *письменного опроса*, который проводится преподавателем для закрепления изучаемого материала, а также при решении задач на практическом занятии.

Подготовка к выполнению домашних заданий.

Для успешного решения задач необходимо просмотреть записи решений задач, выполненных в аудитории. Приступая к решению любой задачи, следует выполнять определенные правила.

При выполнении заданий индивидуальной работы рекомендуется иметь отдельную тетрадь, которая находится у студента. Отчет о выполнении заданий индивидуальной работы для проверки преподавателем выполняется на отдельных листах формата А4. На одном листе пишется полностью условие задачи, краткое условие, решение; чертежи выполняются аккуратно с использованием чертежных инструментов. Все численные данные переводятся в систему СИ. В конце пишется ответ.

3.4 Самостоятельное изучение и конспектирование отдельных тем

Для подготовки конспекта рекомендуется использовать основную и дополнительную литературу.

При написании конспекта придерживайтесь следующих рекомендаций.

1. Прежде чем приступить к чтению, необходимо записать выходные данные издания: автор, название, издательство, год издания.
2. Внимательно прочитайте текст.
3. Уточните в справочной литературе непонятные слова. При записи не забудьте вынести справочные данные на поля конспекта.
4. Выделите главное, составьте план.
5. Кратко сформулируйте основные положения текста, отметьте аргументацию автора.
6. Законспектируйте материал, четко следуя пунктам плана.

При конспектировании старайтесь выразить мысль своими словами. Записи следует вести четко, ясно. Грамотно записывайте цитаты, учитывайте лаконичность, значимость мысли. В тексте конспекта желательно приводить не только тезисные положения, но и их доказательства. При оформлении конспекта необходимо стремиться к емкости каждого предложения.

3.5 Подготовка к текущему и промежуточному контролю

Подготовка к коллоквиуму. Коллоквиум – одна из форм контроля полученных теоретических знаний. Коллоквиум это вид занятия, на котором обсуждаются отдельные части,

разделы, темы, вопросы изучаемого курса.

При подготовке к коллоквиуму следует, прежде всего, просмотреть конспект лекций и отметить в нем имеющиеся вопросы коллоквиума. Если какие – то вопросы вынесены преподавателем на самостоятельное изучение, следует обратиться к учебной литературе, рекомендованной преподавателем.

Целесообразно при подготовке к коллоквиуму выписать в отдельную тетрадь ответы на все вопросы коллоквиума – вне зависимости от того, есть ли они в материалах лекций, или были изучены по учебной литературе.

Также при подготовке к коллоквиуму рекомендуется читать вслух ответы на вопросы – это способствует развитию речи и улучшает восприятие и запоминание информации. Для лучшего усвоения основных физических законов рекомендуется прописывать формулы несколько раз на отдельном листе, а затем воспроизвести ее в контексте ответа на вопрос.

Для самопроверки рекомендуется провести следующий опыт: при закрытой тетради и т.п., положив перед собой список вопросов для подготовки к коллоквиуму, попытаться ответить на любые вопросы из этого списка.

Подготовка к тестированию. В современном образовательном процессе тестирование как новая форма оценки знаний занимает важное место.

Цель тестирований в ходе учебного процесса студентов состоит не только в систематическом контроле знаний, но и способствует повышению эффективности обучения учащихся, позволяет выявить уровень усвоения теоретического материала, выявить уровень практических умений и аналитических способностей студентов. А на основе этого идет коррекция процесса обучения и планируются последующие этапы учебного процесса.

При подготовке к тесту следует, прежде всего, просмотреть конспект лекций и практических занятий и отметить в них имеющиеся темы и практические задания, относящиеся к тематике теста. Особо следует уделить внимание содержанию тем заданных на самостоятельное изучение, так как часть вопросов в тестах может относиться именно к этим темам. Если какие – то лекционные вопросы и практические задания на определенные темы не были разобраны на занятиях (или решения которых оказались не понятными), следует обратиться к учебной литературе, рекомендованной преподавателем. Полезно самостоятельно решить несколько типичных заданий по соответствующему разделу.

При подготовке к тесту не следует просто заучивать, необходимо понять логику изложенного материала. Этому немало способствует составление развернутого плана, таблиц,

схем. Как и любая другая форма подготовки к контролю знаний, тестирование имеет ряд особенностей, знание которых помогает успешно выполнить тест.

Можно дать следующие методические рекомендации:

- прежде всего, следует внимательно изучить структуру теста, оценить объем времени, выделяемого на данный тест, увидеть, какого типа задания в нем содержатся, что поможет настроиться на работу;
- лучше начинать отвечать на те вопросы, в правильности решения которых нет сомнений, пока не останавливаясь на тех, которые могут вызвать долгие раздумья, что позволит успокоиться и сосредоточиться на выполнении более трудных вопросов;
- очень важно всегда внимательно читать задания до конца, не пытайтесь понять условия «по первым словам» или выполнив подобные задания в предыдущих тестированиях, так как такая спешка нередко приводит к досадным ошибкам в самых легких вопросах;
- если Вы не знаете ответа на вопрос или не уверены в правильности, следует пропустить его и отметить, чтобы потом к нему вернуться;
- думайте только о текущем задании, необходимо концентрироваться на данном вопросе и находить решения, подходящие именно к нему;
- многие задания можно быстрее решить, если не искать сразу правильный вариант ответа, а последовательно исключать те, которые явно не подходят, что позволяет в итоге сконцентрировать внимание на одном-двух вероятных вариантах;
- рассчитывать выполнение заданий нужно всегда так, чтобы осталось время на проверку и доработку (примерно 1/3-1/4 запланированного времени), что позволит свести к минимуму вероятность опечаток и сэкономить время, чтобы набрать максимум баллов на легких заданиях и сосредоточиться на решении более трудных, которые вначале пришлось пропустить;
- процесс угадывания правильных ответов желательно свести к минимуму, так как это чревато тем, что Вы забудете о главном: умении использовать имеющиеся накопленные в учебном процессе знания, и будете надеяться на удачу.

Подготовка к промежуточной аттестации. Формами промежуточной аттестации (контроля) являются экзамен и зачет. Экзамен (зачет) может проводиться в виде письменного опроса с последующим собеседованием или с применением тестирования.

Экзамен (зачет) – форма проверки полученных теоретических и практических знаний, их прочность, развитие творческого мышления, приобретение навыков самостоятельной работы, умения синтезировать полученные знания.

Основная цель подготовки к экзамену (зачету) – достичь понимания физических законов и явлений, а не только механически заучить материал.

Рекомендации по подготовке к экзаменационному (зачетному) тесту представлены выше.

Подготовка к устной сдаче экзамена (зачета) включает в себя несколько основных этапов:

- просмотр программы учебного курса;
- определение необходимых для подготовки источников (учебников, дополнительной литературы и т.д.) и их изучение;
- использование конспектов лекций, материалов практических занятий;
- консультирование у преподавателя.

Для успешной сдачи экзамена рекомендуется соблюдать несколько правил.

1. Подготовка к экзамену (зачету) начинается с первого занятия по дисциплине, на котором аспиранты получают общую установку преподавателя и перечень основных требований к текущей и промежуточной аттестации. При этом важно с самого начала планомерно осваивать материал, руководствуясь, прежде всего перечнем вопросов к экзамену, конспектировать важные для решения учебных задач источники.

2. Интенсивная подготовка должна начаться не позднее, чем за месяц-полтора до экзамена (зачета). В течение этого времени нужно успеть повторить и систематизировать изученный материал.

3. За несколько дней перед экзаменом (зачетом) распределите вопросы равномерно на все дни подготовки, возможно, выделив последний день на краткий повтор всего курса.

4. Каждый вопрос следует проработать по конспекту лекций, по учебнику или учебному пособию. В процессе подготовки к экзамену (зачету) при изучении того или иного физического закона, кроме формулировки и математической записи закона, следует обратить внимание на опыты, которые обнаруживают этот закон и подтверждают его справедливость, границы и условия его применимости.

Для лучшего запоминания материала целесообразно работать с карандашом в руках, записывая выводимые формулы, изображая рисунки, схемы и диаграммы в отдельной тетради или на листах бумаги.

5. После повтора каждого вопроса нужно, закрыв конспект и учебники, самостоятельно вывести формулы, воспроизвести иллюстративный материал с последующей самопроверкой.

6. Все трудные и не полностью понятые вопросы следует выписывать на отдельный лист

бумаги, с последующим уточнением ответов на них у преподавателя на консультации.

7. При ответе на вопросы билета студент должен продемонстрировать знание теоретического материала и умение применить при анализе качественных и количественных задач. Изложение материала должно быть четким, кратким и аргументированным.

3.6 Подготовка к другим видам работ

Подготовка презентации и доклада.

Доклад – сообщение по выбранной теме. Любое устное выступление должно удовлетворять *трем основным критериям*, которые в конечном итоге и приводят к успеху:

- это критерий правильности, т.е. соответствия языковым нормам;
- критерий смысловой адекватности, т.е. соответствия содержания выступления реальности;
- критерий эффективности, т.е. соответствия достигнутых результатов поставленной цели.

Докладчик должен знать и уметь: сообщать новую информацию, использовать технические средства, хорошо ориентироваться в теме, отвечать на заданные вопросы, четко выполнять установленный регламент.

Рекомендуемая структура выступления.

Работа по подготовке устного выступления начинается с формулировки темы.

Само выступление должно состоять из трех частей – вступления (10-15% общего времени), основной части (60-70%) и заключения (20-25%).

Вступление включает в себя представление авторов, название доклада, цель, задачи, актуальность темы, четкое определение стержневой идеи.

Основная часть. Раскрывается суть затронутой темы – строится по принципу отчета. Задача основной части – представить достаточно материала для раскрытия темы. План развития основной части должен быть ясным. Должно быть отобрано оптимальное количество фактов и необходимых примеров. Логическая структура строится с помощью наглядных пособий, визуальных материалов (презентаций).

Заключение – ясное, четкое обобщение и краткие выводы.

Презентация как документ представляет собой последовательность сменяющих друг друга слайдов. Для подготовки презентации рекомендуется использовать :PowerPoint, MSWord, AcrobatReader, LaTeX-овский пакет beamer. Компьютерную презентацию, сопровождающую выступление докладчика, удобнее всего подготовить в программе MS PowerPoint.

Для подготовки презентации необходимо собрать и обработать начальную информацию.

Рекомендуемая последовательность подготовки презентации.

1. Четко сформулировать цель, задачи и актуальность выбранной темы.
2. Определить формат презентации.
3. Отобрать всю содержательную часть для презентации и выстроить логическую цепочку подачи информации.
4. Определить ключевые моменты и содержание текста и выделить их.
5. Определить виды визуализации (иллюстрации, таблицы, графики, диаграммы и т.д.) для отображения их на слайдах в соответствии с логикой, целью и спецификой информации.
6. Подобрать дизайн и форматировать слайды (количество картинок и текста, их расположение, цвет и размер). Особо тщательно необходимо отнестись к оформлению презентации. Для всех слайдов презентации по возможности необходимо использовать один и тот же шаблон оформления, кегль – для заголовков - не меньше 24, для информации - для информации не менее 18. Яркие краски, сложные цветные построения, излишняя анимация, выпрыгивающий текст или иллюстрация — не самое лучшее дополнение к научному докладу. Таблицы и диаграммы размещаются на светлом или белом фоне. Также нежелательны звуковые эффекты в ходе демонстрации презентации. Для лучшей ориентации в презентации по ходу выступления лучше пронумеровать слайды.
7. Проверить визуальное восприятие презентации. После подготовки презентации необходима репетиция выступления.

Практические советы по подготовке презентации:

- готовьте отдельно: печатный текст + слайды ;
- слайды визуальная подача информации, которая должна содержать минимум текста, максимум изображений, несущих смысловую нагрузку, выглядеть наглядно и просто;
- текстовое содержание презентации - устная речь или чтение, которая должна включать аргументы, факты, доказательства;
- рекомендуемое число слайдов 17-22;
- обязательная информация для презентации: тема, фамилия и инициалы выступающего, краткие выводы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Рекомендации по организации самостоятельной работы обучающихся [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Е.М. Емышева [и др.].– Москва: Изд-во РГТУ, 2013.– 125 с. – Режим доступа: <https://www.rsuh.ru/upload/iblock/c70/c70c10002f5932ab48798aae10f5a351.do>

2 Методические рекомендации при подготовке к занятиям по физике (лекциям практике, решения задач, лабораторным работам) [Электронный ресурс]: учебно-метод. пособие / Е. А. Попкова.– Рыбинск: ООО Изд-во «РМП», 2009. – 54 с. – Режим доступа: <http://www.rsatu.ru/sites/physics/?doc=1491334469>

3 Кесаманлы, Ф.П. Физика. Как правильно организовать самостоятельную работу при выполнении учебных экспериментов[Электронный ресурс]: метод. пособие / Ф.П. Кесаманлы, В.М. Коликова. –СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2007.– 56 с.– Режим доступа: http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/048/37048/14061?p_page=2

4 Лызь, Н.А. Тенденции развития высшего образования [Электронный ресурс]: учебно-метод. пособие / Н.А Лызь, А.Е. Лызь. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2012. – 48 с. – Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/2332317/>

5 Глаголев С.Н. Проблемы инженерного образования в области техники и технологий [Электронный ресурс]: учебное пособие / С.Н. Глаголев, Т.А. Дуюн, Н.С. Севрюгина. – Электрон. текстовые данные.– Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ЭБС АСВ, 2013. – 109 с. – 978-5-361-00098-2. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/28387.html>

6. Бакланов Е.В. Основы лазерной физики [Электронный ресурс]: учебник/ Бакланов Е.В.— Электрон. текстовые данные.— Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2011.— 131 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/45127.html>. — ЭБС «IPRbooks»

7. Иванов И.Г. Основы квантовой электроники [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Иванов И.Г.— Электрон. текстовые данные.— Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2011.— 174 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/47052.html>. — ЭБС «IPRbooks»

8. Реутов А.Т. Физика лазеров. Часть 2. Основы теории лазеров [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Реутов А.Т.— Электрон. текстовые данные.— М.: Российский университет дружбы народов, 2011.— 96 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/11534.html>. — ЭБС «IPRbooks»

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Краткий конспект лекций	4
1.1 Общие рекомендации по организации работы на лекции	4
1.2 Краткое содержание курса лекций	6
2 Методические рекомендации к практическим занятиям	53
2.1 Общие рекомендации по подготовке к практическим занятиям	53
2.2 Примерные темы практических занятий, примерные задачи и темы докладов по изучаемым темам	54
3 Методические рекомендации к самостоятельной работе	60
3.1 Общие рекомендации по организации внеаудиторной самостоятельной работы	60
3.2 Работа с учебно-методическим и информационным обеспечением	60
3.3 Подготовка к практическим занятиям	62
3.4 Самостоятельное изучение и конспектирование отдельных тем	62
3.5 Подготовка к текущему и промежуточному контролю	63
3.6 Подготовка к другим видам работ	67
Библиографический список	69

Верхотурова Ирина Владимировна,
доцент кафедры Физики АмГУ, канд. физ. – мат. наук