

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

ФИЗИКА ЛАЗЕРОВ И РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА

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.

Физика лазеров и радиационная физика: 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.

Человек с помощью своих органов чувств не способен обнаружить не только слабые, т. е. практически безвредные ионизирующие излучения, но даже те, которые представляют смертельную опасность. Поэтому важной задачей является изучение свойств ядерных излучений, выяснение влияния их на человеческий организм, а также разработка приборов, способных наиболее точно регистрировать такого рода излучения.

В рамках изучения дисциплины у студентов формируется уровень знаний соответствующий современному состоянию вопросов теории лазерной генерации и устройства приборов квантовой электроники и их возможностей, уровень знаний в области ядерной физики и радиационного воздействия на вещество и на биологические объекты и радиационной безопасности.

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

МОДУЛЬ «ФИЗИКА ЛАЗЕРОВ»

ТЕМА 1. ИСХОДНЫЕ КОНЦЕПЦИИ

План лекции:

Спонтанное и вынужденное излучение, поглощение. Принцип работы лазера. Схемы накачки. Типы лазеров. Материалы, применяемые в качестве активных сред в лазерах. Свойства лазерного излучения. Применение лазеров.

Спонтанное и вынужденное излучение, поглощение.

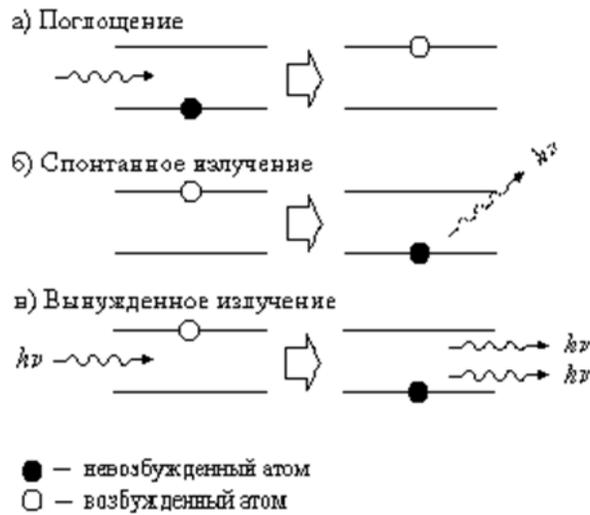
В лазере используются три фундаментальных явления, происходящих при взаимодействии электромагнитных волн с веществом, а именно процессы спонтанного и вынужденного излучения и процесс поглощения.

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:

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

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 работы лазера. Схемы накачки.

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 $(N_2 - N_1)_{кр}$ называется критической инверсией и определяется соотношением:

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

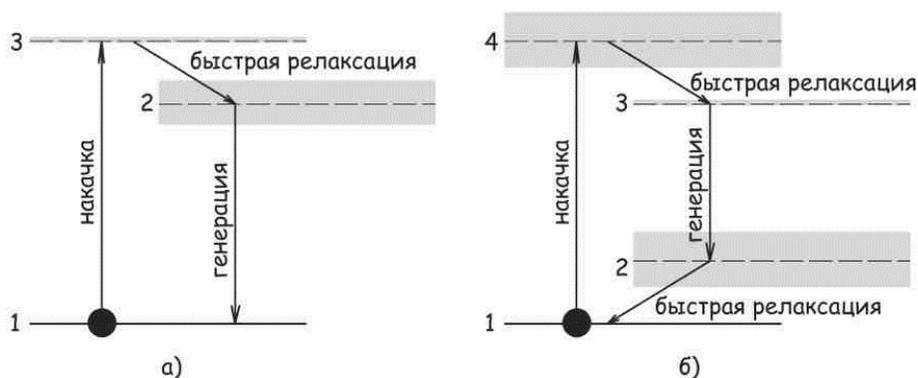
Как только достигнута критическая инверсия, генерация разовьется из спонтанного излучения.



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.

Типы 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.

Материалы, применяемые в качестве активных сред в лазерах.

Активные вещества твердотельных лазеров.

Активные твердые вещества могут иметь кристаллическое или аморфное строение. Активный кристалл состоит из основы (матрицы) и примеси замещения. Атомы (ионы) примеси под воздействием периодического поля кристаллической решетки приобретают свойства оптически активных центров, поэтому примесь называется активатором. Атомы активатора должны быть равномерно распределены в узлах решетки, замещая атомы матрицы. Равенство атомных радиусов примеси и матрицы является важным условием. В качестве примеси используют атомы актиноидов, редкоземельных элементов и переходных металлов. У атомов этих элементов излучательные переходы происходят между энергетическими уровнями электронов, расположенных на незастроенных внутренних электронных оболочках.

Кристаллические активные вещества твердотельных лазеров можно классифицировать по их кристаллохимическим свойствам.

Кислородные соединения. В эту группу входят окислы элементов III группы таблицы Менделеева, вещества на основе кислородных соединений элементов IV, V и VI групп, а также некоторые другие, например SiO_2 (кварц), ZnO и MgO .

Окислы элементов III группы. Рубин — $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (Cr^{3+}) — кристаллическая матрица α -корунда ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), часть узлов которой замещена ионами хрома (Cr^{3+}). Радиусы ионов хрома и ионов алюминия близки по величине, что обуславливает относительно небольшие искажения

решетки при замещении атома матрицы атомом примеси. Главными в работе рубинового лазера следует считать переходы, обозначенные линией R_1 . Квантовый выход составляет в среднем 0,52. Степень поляризации излучения R_1 -линии — 80%.

Гранаты — это соединения, отвечающие формуле $A_3B_5O_{12}$ или $A_3B_2(BO_4)_3$, имеющие кубическую решетку структурного типа граната. Здесь буква A — это ионы иттрия или лантанидов, B — алюминий, галлий, железо, индий, хром и др. Наибольшее распространение в лазерах имеет иттрий-алюминиевый гранат (YAG) с неодимом, имеющий формулу $Y_3Al_5O_{12}$ (Cr^{3+} , Nd^{3+}). Неодим и хром входят в матрицу иттрия в виде ионов замещения. Концентрация неодима составляет 1,3...1,5%, а хрома — 1%.

Оксиды редкоземельных элементов. Практическое применение получили оксиды лантана с примесью неодима La_2O_3 (Nd^{3+}), гадолиния с примесью неодима — Gd_2O_3 (Nd^{3+}), эрбия — Er_2O_3 (Ho^{3+} , Tm^{3+}). Оксид иттрия — Y_2O_3 , (Nd^{3+} , Eu^{3+}).

Материалы на основе кислородных соединений элементов V группы. К этой группе относятся ванадаты с матрицами Ca_2VO_4 , YVO_4 , $GdVO_4$, $LaVO_4$, $Th_2Ln(VO_4)_3$ и примесями Nd , Eu , Tb , Dy , Er и др., ниобаты и фосфаты. Ниобаты кальция $Ca(NbO_3)_2 \times (Nd^{3+}, Ho^{3+}, Pr^{3+}, Er^{3+}, Tm^{3+})$ и лития $LiNbO_3$ (Nd^{3+}) обладают хорошими характеристиками вынужденного излучения в диапазоне волн 1,04...2,047 мкм. Ниобаты переходных металлов и двойные ниобаты (типа $Ba_2NaNb_3O_{15}$) широко используются в качестве неактивных материалов для модуляции и умножения частоты, так как они обладают хорошими электрооптическими нелинейными свойствами.

Материалы на основе кислородных соединений элементов VI группы. К этой группе материалов относятся вольфраматы и молибдаты. Вольфраматы имеют матрицы $CaWO_4$, $SrWO_4$ и $Na_{0,5}Cd_{0,5}WO_4$. Они легированы соответственно элементами Nd^{3+} , Pr^{3+} , Tm^{3+} , Ho^{3+} , Er^{3+} , Dy^{3+} ; Nd^{3+} и Nd^{3+} . Наиболее широко применяется вольфрамат на основе $CaWO_4$, так как он имеет малый порог возбуждения и дает возможность осуществлять непрерывную генерацию при 300 К. Молибдаты имеют матрицы $CaMoO_4$, $SrMoO_4$, $GdMoO_4$, $PbMoO_4$, $NaLaMoO_4$, $NaNd(MoO_4)_2$ и $Gd_2(MoO_4)_3$. Все они легируются неодимом, так что полная химическая структура кристаллов имеет следующий вид: $GdMoO_4$ (Nd^{3+}), $PbMoO_4$ (Nd^{3+}) и т. д. Наибольшее применение нашли кристаллы $CaMoO_4$ (Nd^{3+}) и $SrMoO_4$ (Nd^{3+}).

Фтористые соединения. В качестве матриц используются фториды щелочноземельных металлов (CaF_2 , SrF_2 , MgF_2 , BaF_2 , а в качестве активаторов — ионы урана (U^{3+}), некоторые

лантаниды, например Sm^{2+} , Dy^{2+} , Tm^{2+} , и некоторые, другие элементы, например Nd^{3+} , Ni^{2+} , Co^{2+} .

Аморфные активные вещества. К твердым телам аморфного строения относится стекло, поскольку взаимное расположение атомов (ионов) в стекле характеризуется ближним порядком, тогда как дальний порядок отсутствует. Стекла классифицируют по основе (стеклообразующему аниону) и по содержанию окислов — модификаторов. Если основой является кварц (SiO_2), стекло называется силикатным, если бура — боратным, окись свинца — свинцовым, фторид бериллия — фторбериллатным. Стекла с большим содержанием окислов щелочных металлов называются щелочными, а при очень малом их содержании — бесщелочными. Последние широко используются в лазерах.

Ионы активаторов аморфной матрицы не внедряются в узлы решетки, как в кристаллической матрице, а входят в стекло в качестве его компонента. Отсутствие дальнего порядка ухудшает спектральные характеристики активного вещества. Случайное распределение соседних атомов, окружающих ионы активаторов, вызывает расширение линий излучения, уменьшение времени жизни возбужденного состояния и уменьшение квантового выхода. Относительно широкое применение стеклянных матриц в качестве активного вещества лазера обусловлено рядом их преимуществ перед кристаллами: возможностью введения активаторов с большой концентрацией, доступной воспроизводимостью стержней любой формы и размеров, дешевизной.

Активные вещества жидкостных лазеров.

Жидкие активные вещества имеют ряд преимуществ по сравнению с твердыми. Жидкость можно сделать совершенно однородной в большом объеме, что позволяет существенно увеличивать предельный уровень энергии излучения. Осуществив циркуляцию жидкости в кювете, можно улучшить отвод тепла. Жидкости обладают постоянными оптическими характеристиками, кроме того, они изотропны. В случае необходимости отработанный объем жидкости легко заменить свежим. Кроме того, жидкие активные вещества дешевы. Важным преимуществом жидкостных лазеров является непрерывная перестройка частоты излучения в относительно широком диапазоне.

Жидкие активные среды подразделяются на три группы: растворы дикстонатов редкоземельных элементов в органических растворителях; растворы органических красителей; растворы неорганических соединений редкоземельных элементов. Наибольший эффект при

работе в лазерах дают растворы органических красителей, особенно раствор родамина (6G) в этиловом спирте. Родамин относится к группе так называемых ксантеновых красителей.

Активные вещества полупроводниковых лазеров.

Принцип действия полупроводниковых лазеров основан на явлении излучательной рекомбинации подвижных носителей заряда — электронов и дырок. В полупроводнике должна быть создана большая концентрация электронов (дырок), находящихся в неравновесном состоянии. Генерация, т. е. создание электронно-дырочных пар в собственном полупроводнике либо электронов (дырок) в примесном за счет тепловой энергии, обуславливает равновесную их концентрацию. Неравновесная концентрация создается с помощью света (оптическая накачка), облучением быстрыми электронами (электронно-лучевая накачка), инжекцией носителей заряда через p — n -переход (инжекционная накачка) и при помощи ударной ионизации в сильном электрическом поле. Наибольшее применение получили инжекционные лазеры, основными достоинствами которых являются прямое превращение электрической энергии в энергию света, возможность модуляции излучения путем изменения тока накачки, малые размеры.

Наиболее широкое применение получил арсенид галлия. Наиболее эффективными донорами являются селен и теллур, а акцепторами — цинк и кадмий. При концентрации донорной примеси, превышающей 10^{17} см⁻³ примесная зона смыкается с дном зоны проводимости. При концентрации меньшей 10^{15} см⁻³ примесная зона вырождается в примесный уровень, отделенный от дна зоны проводимости энергетической щелью шириной 0,008 эВ.

С целью уменьшения длины волны излучения необходимо создать p — n -структуру с более широкой запрещенной зоной. Это достигается в гетероструктурах типа GaAs — Ga_xAl_{1-x}As или GaAs — GaAs_xP_{1-x}.

Активные вещества газовых лазеров.

Активным веществом может быть газ нейтральных атомов, газ ионов и газ молекул. В процессе накачки инверсия населенности образуется вследствие столкновений, диссоциации молекул из преддиссоциативных состояний, оптического возбуждения, фотодиссоциации, химической реакции, а также за счет различия во времени релаксации колебательных, и вращательных состояний молекул.

В атомных газоразрядных лазерах используются соударения I рода (упругие соударения) электронов с атомами газа (Ne, Ar, Cr, Xe) и с атомами в парах металлов (Cu, Pb, Mn). Кроме того, используются соударения II рода в процессе передачи энергии от атома одного элемента (например, He) атому другого (например, Ne), причем атомы находятся в возбужденном

состоянии. Важным условием при этом является равенство энергий метастабильного уровня атома активатора и возбужденного уровня атома, разряжающегося с излучением. По такой схеме накачки работают гелий-неоновые лазеры, работающие в непрерывном режиме. Соотношение гелия и неона находится в пределах от 7 : 1 до 5 : 1.

Представителем лазеров с ионной активной газовой средой является аргонный лазер. Ионизация атомов Ar происходит в дуговом разряде, при давлении 400... 550 Па.

В лазерах, работающих на молекулярном газе, излучение обусловлено квантовыми переходами между электронными, колебательными и вращательными уровнями. Используются молекулы N₂, O₂, H₂, CO, CO₂ и др. При использовании переходов между колебательными и вращательными уровнями излучение происходит в инфракрасной области спектра. Поскольку энергия вращения в сотни и тысячи раз меньше по сравнению с энергией колебаний, спектр определяется характером колебаний атомов в молекуле.

Свойства 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.

Применение лазеров.

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).

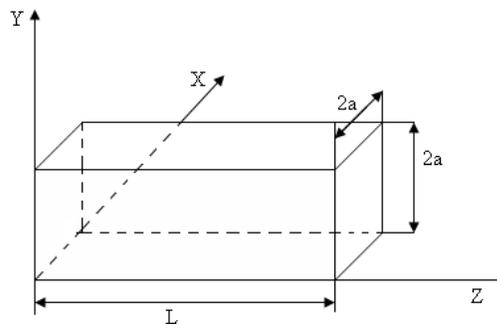
ТЕМА 2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ С АТОМАМИ И ИОНАМИ

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: $\vec{E} \times \vec{n} = \mathbf{0}$

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

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

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

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

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

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.

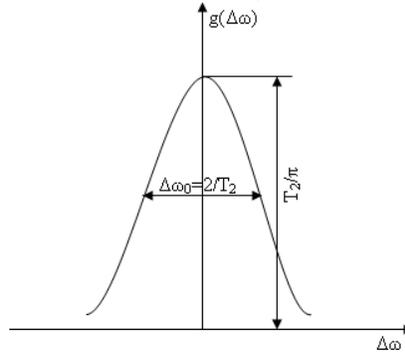
Поскольку $\omega \equiv \omega_0$, то этот гамильтониан взаимодействия вызывает переход атома с одного уровня на другой.

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:

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

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

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

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.

$$g_t = g^*(\nu - \nu_0) = \left[\frac{2}{\Delta\nu_0^*} \left(\frac{\ln 2}{\pi} \right)^{1/2} \right] \exp \left\{ - \left[\frac{4(\nu - \nu_0)^2}{\Delta\nu_0^*} \ln 2 \right] \right\}$$

Ширина линии $\Delta\nu_0^*$ 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 вкладом 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.

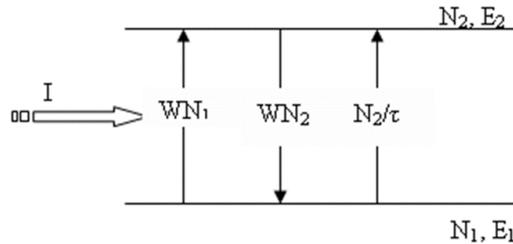
3. Совместные проявления спонтанных излучательных и безызлучательных процессов. Если принять во внимание как спонтанные излучательные, так и безызлучательные переходы, то для зависящей от времени населенности N_2 возбужденного состояния получаем уравнение:

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

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

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

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

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

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

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

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

$$I_s = h\nu / \sigma\tau$$

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.

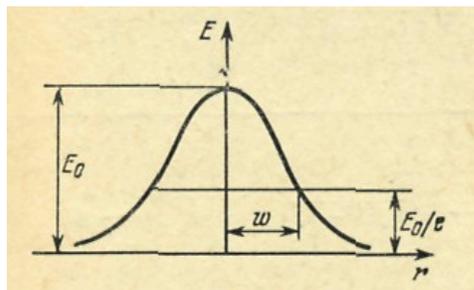
ТЕМА 3. ПАССИВНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ РЕЗОНАТОРЫ

План лекции:

Специфические особенности лазерного излучения. Волновая, геометрическая и матричная оптика применительно к пучку лазерного излучения. Расчет преобразования пучков с помощью лучевых матриц. Назначение резонатора. Типы резонаторов. Время жизни фотона и добротность резонатора. Критерий устойчивости резонатора. Устойчивые резонаторы. Неустойчивые резонаторы.

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:

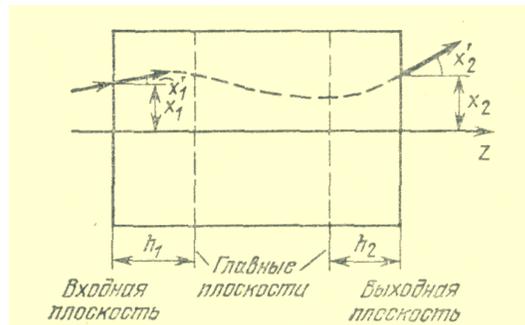
$$\begin{pmatrix} x_n \\ \theta_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ \theta_0 \end{pmatrix} \quad \begin{cases} x_n = Ax_0 + B\theta_0 \\ \theta_n = Cx_0 + D\theta_0 \end{cases}$$

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 - $\begin{pmatrix} 1-d_2/f_1 & d_1+d_2-d_1d_2/f_1 \\ -1/f_1-1/f_2+d_2/f_1f_2 & 1-d_1/f_1-d_2/f_2-d_1d_2/f_1f_2 \end{pmatrix}$ - описывает

последовательное прохождение лучей через две системы предыдущего типа.

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

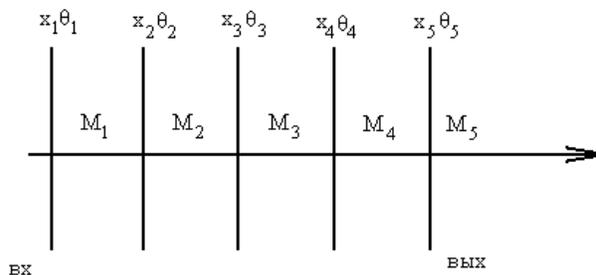
лучей через фокусирующую среду протяженностью d . Показатель преломления этой среды в радиальном направлении изменяется по квадратичному закону.

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

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

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:

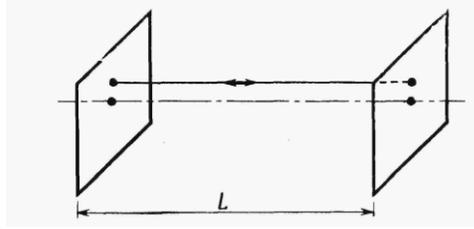
- 1) они, как правило, бывают открытыми, т. е. не имеют боковой поверхности,
- 2) их размеры намного превышают длину волны лазерной генерации.

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 :

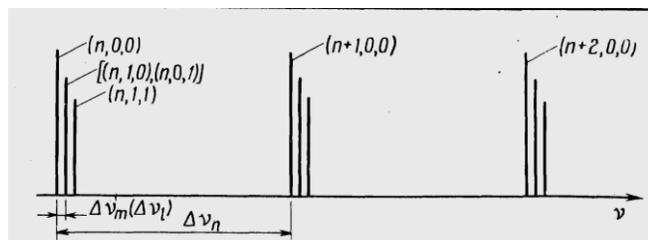
$$\nu \approx \frac{c}{2} \cdot \left[\frac{n}{L} + \frac{(l^2 + m^2)L}{8na^2} \right]$$

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:

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

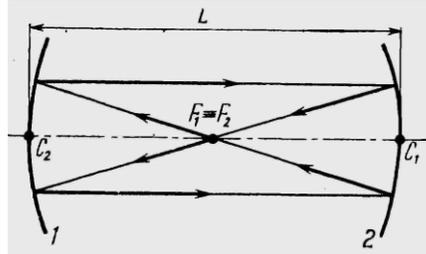
Эти две моды отличаются одна от другой лишь распределением поля вдоль оси z . Поэтому $\Delta \nu_n$ нередко называют разностью частот между двумя последовательными продольными модами. Разность частот между двумя модами, отличающимися только значениями m на 1 (т. е. разность частот между соседними поперечными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



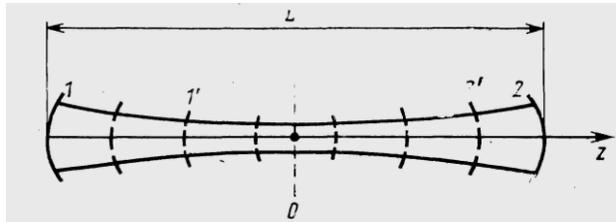
Резонансные частоты для конфокального резонатора:

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

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 $\omega(z)$:

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

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

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

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

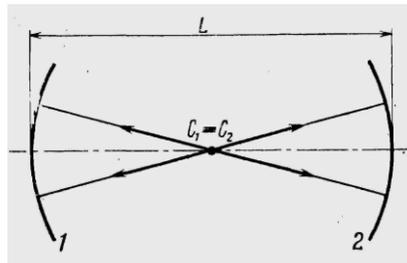
Размер пятна на зеркалах в $\sqrt{2}$ раз больше, чем в центре резонатора. (зеркала стремятся сфокусировать пучок в центре резонатора.)

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:

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

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:

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

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.

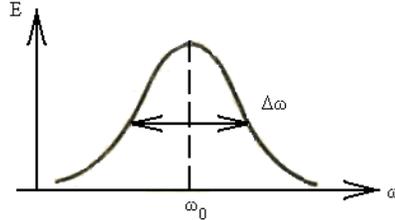
Добротность также характеризует скорость потерь энергии.

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.

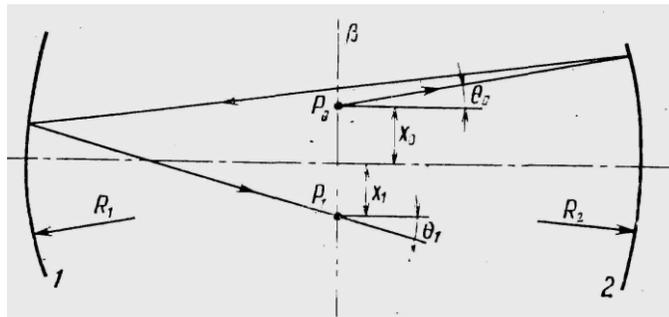
$$\tau = \frac{1}{\Delta\omega_{рез}}; \frac{1}{\omega_{рез}} = \frac{\theta}{\omega}, \Rightarrow \theta = \frac{\omega}{\omega_{рез}}.$$

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

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:

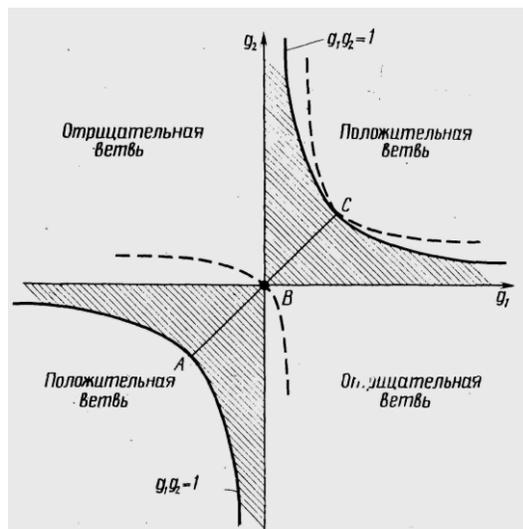
$$\begin{vmatrix} A & B^n \\ C & D \end{vmatrix}$$

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.



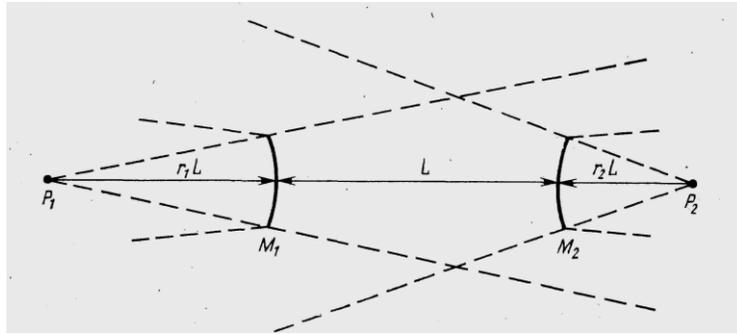
Область устойчивости соответствует заштрихованным частям. Штриховые кривые соответствуют возможным конфигурациям конфокальных резонаторов

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 нестремится 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 самосоогласованности: 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.

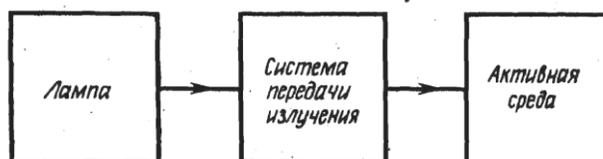
ТЕМА 4. ПРОЦЕССЫ НАКАЧКИ

План лекции:

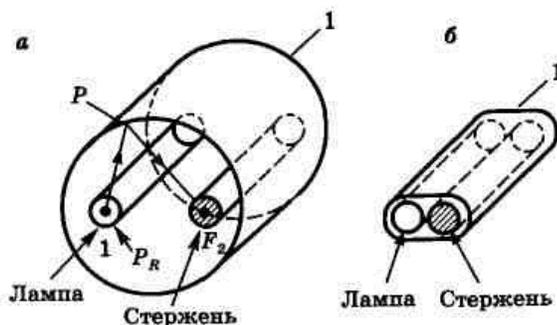
Оптическая накачка некогерентным источником света. Накачка лазерным излучением. Накачка в электрическом разряде.

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.

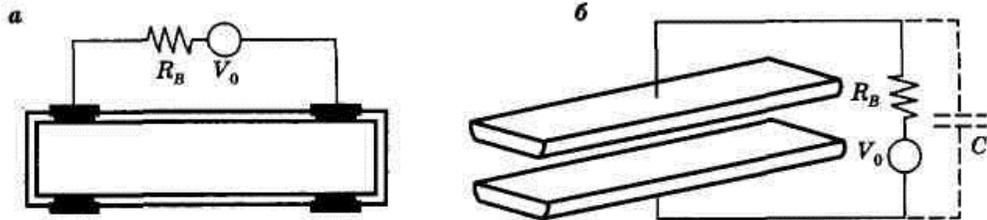
Существует четыре типа излучателей, используемых в системах накачки на основе диодных лазеров. Перечислим их в порядке увеличения выходной мощности:

- 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: $A^* + B \rightarrow A + B^* + \Delta E_r$

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:

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

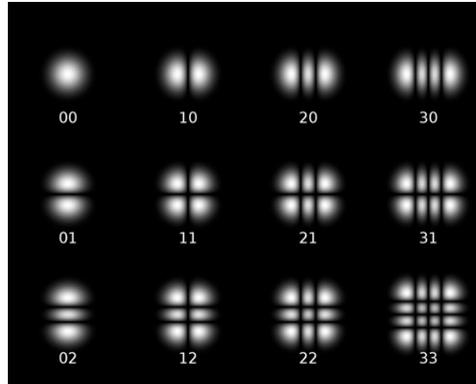
Из данного выражения полагая, что $\ell = m = 0$, можно получить распределение напряженности поля в моде низшего порядка – это решение называют модой TEM_{00} .

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

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

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.



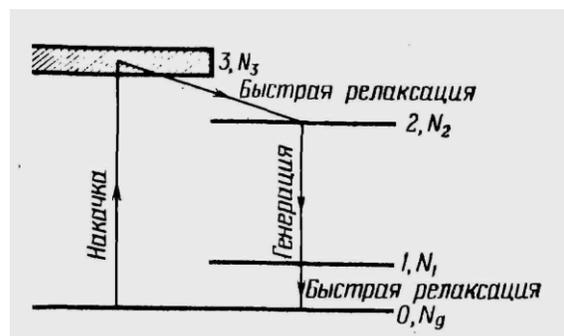
ТЕМА 5. НЕПРЕРЫВНЫЙ И НЕСТАЦИОНАРНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ЛАЗЕРА

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

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

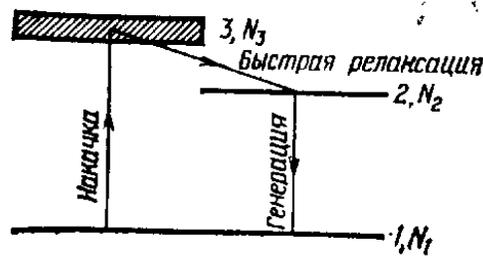
первоначально присутствующих фотонов, которые позволяют учесть эффект спонтанного излучения.

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.

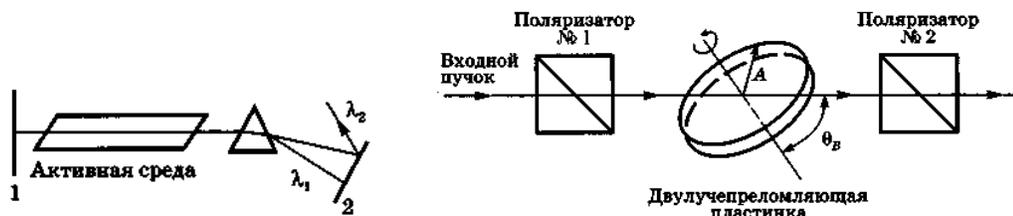
Перестройка частоты и генерации лазера.

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:

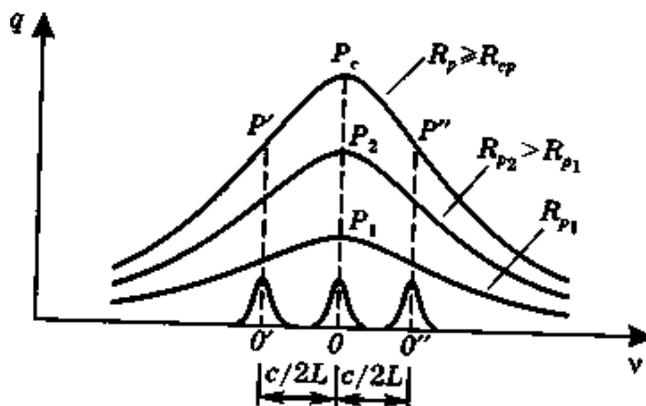
- позволяет упорядочить временные характеристики излучения лазера и модовый состав;
- сузить общую ширину спектра генерации лазера;
- повышает энергетический КПД лазера за счет работы активных центров, не участвующих в генерации в обычном одночастотном режиме;
- позволяет исследовать спектральную структуру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

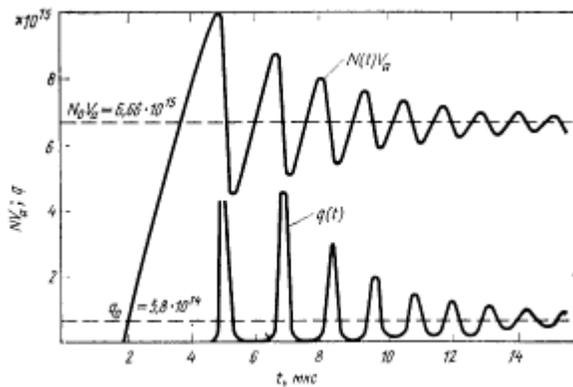
Для того чтобы изучить нестационарный режим работы четырехуровневого и трехуровневого лазеров, необходимо решить соответственно уравнения системы Стаца де Марса для этих лазеров. При этом для данной временной зависимости скорости накачки $W_p(t)$ мы найдем временные зависимости $q(t)$ и $N(t)$, если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

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 :

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

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

пуга импульсов с синхронизованными модами определяется длительностью Δt_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.

МОДУЛЬ «РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА»

ТЕМА 1. ЭЛЕМЕНТЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ.

План лекции:

Строение ядра атома. Ядерные силы и их свойства. Радиоактивность. Явление радиоактивности. Закономерности радиоактивных превращений. Виды радиоактивных излучений

Строение ядра атома. Ядерные силы и их свойства.

Ядро атома состоит из нуклонов. Нуклон – ядерная частица, способная существовать в двух состояниях – протона или нейтрона. Различие между протоном и нейтроном можно провести только, если они находятся в свободном состоянии (в свободном состоянии нейтрон – нестабилен и подвергается распаду, нейтрон в ядре – стабилен; протон – стабилен всегда). Провести различие между протоном и нейтроном в ядре невозможно, так что ядро состоит из частиц одного вида – нуклонов.

Атомное ядро с зарядом Z и массовым числом A состоит из A нуклонов: Z – протонов (равное порядковому номеру химического элемента в периодической системе элементов Менделеева) и N – нейтронов, связанных между собой ядерными силами.

Общее число нуклонов в ядре называется массовым числом $A = N + Z$.

Нуклиды с одинаковым числом протонов в ядре, но с разными числами нейтронов называются изотопами, что указывает на их положение в одной клетке периодической системы.

Нуклиды одинаковым числом нейтронов в ядре, N , но с разным числом протонов, Z , называются изотонами.

Нуклиды с одинаковым массовым числом, A , но с разными числами нейтронов и протонов называются изобарами.

Большинство ядер устойчиво, поскольку между нуклонами существует особое ядерное (сильное) взаимодействие — притяжение, которое обеспечивает устойчивость ядер, несмотря на отталкивание одноименно заряженных протонов.

Энергией связи ядра $E_{св}$ называется физическая величина, равная работе, которую надо совершить, чтобы расщепить ядро на составляющие его нуклоны, не сообщая им кинетической энергии.

Энергия связи нуклонов в атомном ядре:

$$E_{св}(Z, A) = \Delta mc^2 = (Zm_p + Nm_n - m_{я})c^2 = (Zm_H + Nm_n - M_a)c^2$$

Устойчивость ядер существенно зависит от параметра $(A - Z)/Z$ – отношения чисел нейтронов и протонов.

Ядра лёгких нуклидов наиболее устойчивы при $(A - Z)/Z \leq 1$. С ростом массового числа всё более заметным становится электростатическое отталкивание между протонами, и область устойчивости сдвигается к значениям $(A - Z)/Z > 1$.

Из наличия максимума у зависимости $\Delta \epsilon_{св}(A)$ следует важный вывод о двух энергетически выгодных процессах:

- 1) для наиболее тяжелых ядер возможен процесс деления на два более легких;
- 2) нескольким легчайшим ядрам, наоборот, энергетически выгодно сливаться друг с другом в более тяжелые ядра (синтез ядер).

Первые представления о размерах ядра были получены Резерфордом при экспериментальном изучении рассеяния α -частиц с энергией ~ 5 МэВ при прохождении через тонкую фольгу золота. Наблюдалось, что некоторое количество α -частиц рассеивается на очень большие углы. На этом основании в 1911 Резерфорд пришел к выводу, что в центре атома имеется область положительного электрического заряда, связанная с большой массой, сконцентрированной в очень малом объеме (по сравнению с объемом атома).

Ядро не является твердой сферой. В центральной области ядра плотность постоянна, но у периферии падает до нуля. Менее плотный приповерхностный слой ядра имеет иной состав, чем основная материя. Плотность ядерного вещества в центре ядра примерно одинакова для всех ядер ($\approx 10^{17}$ кг/м³).

Нуклоны в ядре удерживают ядерные силы. Ядерные силы действуют только на расстояниях порядка 10^{-13} см и достигают величины в 100 – 1000 раз превышающей силу взаимодействия электрических зарядов.

Ядерные силы не зависят от заряда нуклонов. Они обусловлены сильными взаимодействиями. Сильное взаимодействие, самое сильное из фундаментальных взаимодействий элементарных частиц.

Свойства ядерных сил.

- 1) ядерные силы являются силами притяжения;
- 2) ядерные являются короткодействующими — их действие проявляется только на расстояниях порядка 10^{-15} м;
- 3) ядерным силам свойственна зарядовая независимость: притяжение между любыми двумя нуклонами одинаково независимо от зарядового состояния нуклонов (протонного или нейтронного); ядерные силы имеют неэлектрическую природу;
- 4) ядерным силам свойственно насыщение: каждый нуклон в ядре взаимодействует только с ограниченным числом ближайших к нему нуклонов;
- 5) ядерные силы зависят от взаимной ориентации спинов взаимодействующих нуклонов. Например протон и нейтрон образуют дейтрон — ядро изотопа дейтерия ${}^2_1\text{H}$ — только при условии параллельной ориентации их спинов;
- 6) ядерные силы не являются центральными, т.е. действующими по линии, соединяющей центры взаимодействующих нуклонов.

Радиоактивность. Явление радиоактивности. Виды радиоактивных излучений

Радиоактивность была открыта в 1896 г. французским физиком Анри Беккерелем при изучении люминесценции солей урана, которые без внешнего воздействия (самопроизвольно) испускали излучение неизвестной природы. Обнаруженное излучение было названо радиоактивным излучением, а само явление испускания радиоактивного излучения - радиоактивностью.

Различаются естественная и искусственная радиоактивности. Естественной радиоактивностью называется радиоактивность, наблюдающаяся у существующих в природе неустойчивых изотопов.

Естественная радиоактивность включает в себя:

- гамма-излучение радиоактивных материалов и горных пород Земли (кальций-силикат, гранит и др.),
- излучение радиоактивного газа радона, который просачивается из-под земной коры и всегда присутствует в воздухе, который мы вдыхаем;
- космическое излучение, которое приходит к нам из глубин Вселенной, а также от Солнца вследствие солнечных вспышек.

Искусственной радиоактивностью называется радиоактивность изотопов, полученных в результате ядерных реакций.

Радиоактивное превращение (распад) — это процесс, которому присущ вероятностный характер.

Законы радиоактивного распада и накопления - статистические законы, проявляющиеся для достаточно большого числа радиоактивных ядер.

Самопроизвольный распад атомных ядер подчиняется закону радиоактивного распада

$$N = N_0 \exp(-\lambda t)$$

Следствием этих законов являются правила смещения, позволяющие установить, какое ядро возникает в результате распада данного материнского ядра в различных типах радиоактивного распада.

Радиоактивное излучение бывает трех типов: α -, β - и γ -излучение. Состав α -, β - и γ -лучей был установлен по их отклонению в магнитном поле.

α – Излучение представляет собой поток ядер гелия (заряд $+2e$, а масса совпадает с массой ядра изотопа гелия ${}^4\text{He}$). α – Излучение отклоняется электрическим и магнитным полями, обладает высокой ионизирующей способностью и малой проникающей способностью.

β – Излучение представляет собой поток быстрых электронов или позитронов. β – Излучение также отклоняется электрическим и магнитным полями; его ионизирующая способность на два порядка меньше чем ионизирующая способность α -лучей, а проникающая способность, напротив, гораздо больше.

γ – Излучение представляет собой коротковолновое электромагнитное излучение с чрезвычайно малой длиной волны $< 10^{-10}$ м и, вследствие этого, ярко выраженными корпускулярными свойствами, т.е. является потоком частиц – γ -квантов (фотонов). γ – Излучение не отклоняется электрическим и магнитным полями, обладает относительно слабой ионизирующей способностью и очень большой проникающей способностью, при прохождении через кристаллы обнаруживает дифракцию.

Альфа-распадом называется самопроизвольное превращение атомного ядра с числом протонов Z и нейтронов N в другое (дочернее) ядро, содержащее число протонов $Z - 2$ и нейтронов $N - 2$. При этом испускается α -частица – ядро атома гелия .

α - радиоактивность (альфа-излучение) - поток альфа-частиц, испускаемых при радиоактивном распаде элементов тяжелее свинца (элементы с $Z > 83$, как правило, α -радиоактивны) или образующихся в ходе ядерных реакций.

Бета-распад (β - распад) – самопроизвольное превращение ядер, сопровождающееся испусканием (или поглощением) электрона и антинейтрино или позитрона и нейтрино. Бета-распад ядер – самопроизвольное взаимное превращение внутриядерных нейтронов и протонов,

происходящее по одному из перечисленных ниже направлений с испусканием или поглощением электронов (e^-) или позитронов (e^+), нейтрино (ν) или антинейтрино ($\bar{\nu}$).

Принято различать три вида β -распада: электронный; позитронный; электронный захват.

Электронный β^- распад. При электронном распаде материнское ядро испускает электрон и нейтрино, превращаясь при этом в дочернее ядро.

Позитронный β^+ распад. При позитронном β -распаде материнское ядро превращается в дочернее с испусканием позитрона и нейтрино:

Электронный захват заключается в захвате атомным ядром электрона из электронной оболочки, окружающей ядро. При этом один из протонов ядра превращается в нейтрон.

ТЕМА 2. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

План лекции:

Терминология. Активность радионуклида в источнике. Характеристики поля ионизирующего излучения. Основные характеристики источников излучения.

Терминология. Активность радионуклида в источнике.

Корпускулярное излучение – ионизирующее излучение, состоящее из частиц с массой, отличной от нуля.

Ионизирующее излучение — это излучение, взаимодействие которого со средой приводит к образованию ионов разных знаков.

Ионизирующая частица – это частица корпускулярного ионизирующего излучения (или фотон).

Непосредственно ионизирующее излучение – ионизирующее излучение состоящее из заряженных частиц, имеющих кинетическую энергию, достаточную для ионизации при столкновении (обычно это электроны, протоны, α -частицы).

Косвенно ионизирующее излучение – ионизирующее излучение, состоящее из незаряженных частиц, которые могут создавать непосредственно ионизирующее излучение и (или) вызывать ядерные превращения (нейтроны, фотоны).

Фотонное ионизирующее излучение – электромагнитное косвенно ионизирующее излучение:

- гамма-излучение – фотонное излучение, возникающее при изменении энергетического состояния атомных ядер или при аннигиляции частиц.

-тормозное излучение – фотонное излучение с непрерывным энергетическим спектром, возникающее при уменьшении кинетической энергии заряженных частиц.

-характеристическое излучение – фотонное излучение с дискретным спектром, возникающее при изменении энергетического состояния электронов атома.

-рентгеновское излучение – фотонное излучение, состоящее из тормозного и (или) характеристического излучений.

Источник ионизирующего излучения – это объект, содержащий радиоактивное вещество, или техническое устройство, испускающее или способное в определенных условиях испускать ионизирующее излучение.

Используемое количество радиоактивных веществ принято выражать не в единицах массы (в силу ее малости), а в единицах активности радионуклида. Активность радионуклида в источнике (образце) — отношение числа dN спонтанных ядерных превращений из определенного ядерно-энергетического состояния радионуклида, происходящих в источнике (образце) за интервал времени dt , к этому интервалу: $A=dN/dt$.

Единица активности радионуклида в системе СИ – беккерель (Бк) – это активность радионуклида в источнике (образце), в котором за время 1 с происходит одно спонтанное ядерное превращение.

Внесистемная единица активности - Кюри (Ки) - это активность радионуклида в источнике (образце), в котором за время 1 с происходит $3,700 \cdot 10^{10}$ спонтанных ядерных превращений.

Характеристики поля ионизирующего излучения.

Поле ионизирующего излучения — это пространственно-временное распределение ионизирующего излучения в рассматриваемой среде.

Наиболее полная информация о поле излучения задается пространственно-временной энергетическо-угловой плотностью потока частиц $\phi(r, t, E, \Omega)$. Во многих прикладных задачах требуется знать поток энергии части. В этих случаях информация о поле задается пространственно-временной энергетическо-угловой плотностью потока энергии частиц $I(r, t, E, \Omega) = E \cdot \phi(r, t, E, \Omega)$, характеризующей энергию, переносимую частицами через эту площадку.

Величины, используемые для измерения «количества» ионизирующих излучений, основываются либо на регистрации числа актов ионизации атомов вещества, либо на измерении количества энергии, переданной определенной массе вещества.

1. Интегральные потоковые характеристики поля излучения

Наиболее часто используются в различных задачах следующие интегральные потоковые характеристики поля излучения.

Поток ионизирующих частиц - отношение числа ионизирующих частиц dN , падающих на данную поверхность за интервал времени dt , к этому интервалу:

Поток энергии ионизирующих частиц – отношение суммарной энергии (исключая энергию покоя) dW всех ионизирующих частиц, падающих на данную поверхность за интервал времени dt , к этому интервалу.

Поток энергии ионизирующих частиц – отношение суммарной энергии (исключая энергию покоя) dW всех ионизирующих частиц, падающих на данную поверхность за интервал времени dt , к этому интервалу.

Плотность потока ионизирующих частиц – отношение потока ионизирующих частиц $d\Phi$, проникающих в объем элементарной сферы, к площади поперечного сечения dS этой сферы:

Плотность потока энергии ионизирующих частиц (интенсивность) – отношение потока энергии ионизирующих частиц $d\Phi_E$ проникающих в объем элементарной сферы, к площади поперечного сечения dS этой сферы.

Флюенс ионизирующих частиц - отношение числа ионизирующих частиц dN , проникающих в объем элементарной сферы, к площади поперечного сечения dS этой сферы:

Флюенс энергии ионизирующих частиц - отношение суммарной энергии (исключая энергию покоя) dW всех ионизирующих частиц, проникающих в объем элементарной сферы, к площади поперечного сечения dS этой сферы:

Основной дозиметрической величиной, отражающей концентрацию энергии, переданной ионизирующим излучением веществу и определяющей степень радиационного воздействия, является поглощенная доза ионизирующего излучения.

Поглощенная доза ионизирующего излучения D - отношение средней энергии переданной ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, к массе вещества в этом объеме:

Для оценки воздействия на среду косвенно ионизирующих излучений используют понятие керма. Керма K – отношение суммы первоначальных кинетических энергий dW_K всех заряженных ионизирующих частиц, образованных под действием косвенно ионизирующего излучения в элементарном объеме вещества, к массе dm вещества в этом объеме.

Экспозиционная доза выражает энергию фотонного излучения, преобразованную в кинетическую энергию заряженных частиц в единице массы атмосферного воздуха. Экспозиционная доза $D_{\text{экс}}$ – это количественная характеристика фотонного излучения, которая основана на его ионизирующем действии в сухом атмосферном воздухе и представляет собой отношение суммарного заряда всех ионов одного знака, созданных в воздухе, когда все электроны и

позитроны, освобожденные фотонами в элементарном объеме воздуха с массой dm , полностью остановились в воздухе, к массе воздуха в указанном объеме:

Для сравнения биологического эффекта, производимого одинаковой поглощенной дозой различных видов излучения, используют понятие относительной биологической эффективности излучения (ОБЭ). Относительная биологическая эффективность некоторого излучения принята равной отношению поглощенной дозы D_0 образцового излучения, вызывающего определенный биологический эффект, к поглощенной дозе D данного излучения, вызывающего такой же эффект.

Основные характеристики источников излучения.

По происхождению источники ионизирующего излучения бывают:

- природными, то есть природного происхождения;
- техногенными – специально созданными для его полезного применения или являющиеся

побочным продуктом этой деятельности.

По воздействию на окружающую среду источники ионизирующего излучения подразделяют:

- на закрытые радионуклидные источники ионизирующего излучения,
- открытые радионуклидные источники ионизирующего излучения.

По временному распределению можно выделить:

- импульсный источник, испускающий излучение в течении одного или нескольких интервалов времени, каждый из которых меньше времени наблюдения;

стабильным источник излучения, испускающий ионизирующие частицы, количество которых в единицу времени постоянно в течение заданного времени наблюдения;

- нестабильный источник — число испускаемых в единицу времени ионизирующих частиц не остается постоянным в течение заданного времени наблюдения.

Для однозначного задания источника излучения должны быть указаны следующие характеристики.

1. Вид излучения: нейтроны, фотоны, протоны, электроны и т. д.
2. Геометрия источника (формы и размеры).

ТЕМА 3. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ С ВЕЩЕСТВОМ.

План лекции:

Общие законы ослабления излучений в веществе. Взаимодействие тяжелых заряженных частиц с веществом. Взаимодействие легких заряженных частиц с веществом. Взаимодействие фотонного излучения с веществом. Взаимодействие нейтронов с веществом.

Общие законы ослабления излучений в веществе.

Узкий пучок излучения – это такой пучок излучения, когда любое взаимодействие выводит частицу за пределы пучка за счет отклонения от первоначального направления движения. Спектр частиц, пришедших в детектор, такой же, как и спектр излучения источника.

Если выбрать направление X для распространения коллимированного пучка частиц и принять некоторую постоянную величину Σ (постоянную для данного вида и энергии излучения и материала среды), равную величине отношения убыли числа частиц $dn(x)/dx$ на отрезке dx к концентрации этих частиц $n(x)$ в пределах того же отрезка dx , то можно записать равенство

$$-\frac{1}{n(x)} \cdot \frac{dn(x)}{dx} = \Sigma$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$n(x) = n_0 \exp(-\Sigma x)$$

и представляет собой закон ослабления узкого пучка излучения (нерассеянного излучения) материалом среды.

Величина Σ имеет размерность обратной длины для фотонного излучения, определяет вероятность взаимодействия фотонов с атомами вещества и называется линейным коэффициентом ослабления γ -излучения, обозначается μ , измеряется в сантиметрах в минус первой степени.

Так как линейный коэффициент ослабления γ -излучения μ для данного элемента характеризует относительное уменьшение интенсивности излучения после прохождения 1 см среды и, следовательно, пропорционален плотности среды ρ , то удобно ввести понятие массового коэффициента ослабления γ -излучения единицей массы вещества

В дозиметрии и физике защиты используют понятия атомного μ_a и электронного μ_e коэффициентов ослабления γ -излучения. Они характеризуют ослабление излучения, отнесенное к одному атому или к одному электрону.

Взаимодействие тяжелых заряженных частиц с веществом.

К тяжелым заряженным частицам относят ядра, ионы атомов (протоны, дейтроны, α -частицы и др.) и осколки деления. Для всех заряженных частиц физические процессы взаимодействия с веществом однотипны (некоторые отличия имеются у осколков деления).

Тяжелые заряженные частицы взаимодействуют главным образом с электронами атомных оболочек, вызывая ионизацию атомов. Проходя через вещество, заряженная частица совершает десятки тысяч соударений, постепенно теряя энергию.

Тормозная способность вещества может быть охарактеризована величиной удельных потерь энергии dE/dx , где dE – энергия, теряемая частицей в слое вещества толщиной dx .

Если энергия заряженной частицы теряется на ионизацию среды, то говорят об удельных ионизационных потерях. Удельные потери энергии возрастают с уменьшением энергии частицы и особенно резко перед остановкой в веществе.

Удельные ионизационные потери энергии для тяжёлых заряженных частиц при энергиях $E \ll (Mc)^2/m_e$

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{иониз.}} = -\frac{4\pi Z^2}{\beta^2} n_e r_0^2 m_e c^2 \left[\ln\left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{\bar{I}}\right) - \ln(1-\beta^2) - \beta^2 \right]$$

Для определённой среды и частицы с данным зарядом Z величина dE/dx является функцией только её кинетической энергии E : $dE/dx = \varphi(E)$. Проинтегрировав это выражение по всем значениям E от 0 до начальной энергии частицы E_0 , можно получить полный путь R , который заряженная частица проходит до остановки.

Тяжёлые заряженные частицы взаимодействуют в основном с атомными электронами и поэтому мало отклоняются от направления своего первоначального движения. Вследствие этого пробеги тяжёлых частиц измеряют расстоянием по прямой от точки входа частиц в среду до точки их остановки. Заряженная частица, движущаяся в веществе, испытывает большое число столкновений, приводящих к изменению направления её движения. Этот процесс называется многократным кулоновским рассеянием.

Взаимодействие легких заряженных частиц с веществом.

Удельные потери энергии электронами. Прохождение электронов через вещество отличается от прохождения тяжёлых заряженных частиц.

Это приводит к относительно большому изменению импульса электрона при каждом его столкновении с частицами среды, что вызывает заметное изменение направления движения электрона и как результат - электромагнитное радиационное излучение.

Удельные потери энергии электронов с кинетической энергией являются суммой ионизационных и радиационных потерь.

Удельные ионизационные потери энергии электронов

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{иониз.}} = -\frac{2\pi}{\beta^2} n_e r_0^2 m_e c^2 \left[\ln\left(\frac{m_e c^2 T_e}{\bar{I}^2} \frac{\beta^2}{2(1-\beta^2)}\right) - (2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2) \ln 2 + 1 - \beta^2 \right],$$

В области низких энергий электронов ($E < 1$ МэВ) определяющий вклад в потери энергии дают неупругие ионизационные процессы взаимодействия с атомными электронами, включающие ионизацию атомов.

Передаваемая в одном столкновении энергия в среднем очень мала и при движении в веществе потери складываются из очень большого числа таких малых потерь.

Радиационные потери энергии электронов. С ростом энергии электрона E растут радиационные потери. Согласно классической электродинамике, заряд, испытывающий ускорение a , излучает энергию

По этой причине радиационные потери, играющие важную роль в торможении электронов высокой энергии, практически не возникают при прохождении через вещество тяжёлых заряженных частиц.

Удельные радиационные потери энергии электронов

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{рад.}} = -\frac{16}{3} n_e E \frac{Zr_0^2}{137} \quad E < m_e c^2 = 511 \text{ кэВ},$$

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{рад.}} = -n_e E \frac{Zr_0^2}{137} \left(4 \ln \frac{2E}{m_e c^2} - \frac{4}{3} \right) \quad 1 < E/m_e c^2 < 137/Z^{1/3},$$

$E/m_e c^2 > 137/Z^{1/3},$

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{рад.}} = -n_e E \frac{Zr_0^2}{137} \left(4 \ln \frac{183}{Z^{1/3}} + \frac{2}{9} \right)$$

ТЕМА 4. ОСНОВЫ РАДИАЦИОННОЙ ДОЗИМЕТРИИ.

План лекции:

Количественная мера воздействия излучения на вещество. Дозы облучения. Дозиметрические приборы.

Количественная мера воздействия излучения на вещество. Дозы облучения.

Человек с помощью своих органов чувств не способен обнаружить не только слабые, т. е. практически безвредные ионизирующие излучения, но даже те, которые представляют смертельную опасность.

Поэтому важной задачей является изучение свойств ядерных излучений, выяснение влияния их на человеческий организм, а также разработка приборов, способных наиболее точно регистрировать такого рода излучения.

Основная характеристика взаимодействия ионизирующего излучения и среды — это ионизационный эффект.

Экспозиционная доза определяет ионизирующую способность рентгеновских и гамма-лучей и выражает энергию излучения, преобразованную в кинетическую энергию заряженных частиц в единице массы атмосферного воздуха.

Мера воздействия ионизирующего излучения на вещество, дающая начало физико-химическим изменениям в облучаемом веществе и приводящая к определенному радиационному эффекту – поглощённая энергии ионизирующего излучения веществом.

Поглощенная доза показывает, какое количество энергии излучения поглощено в единице массы любого облучаемого вещества и определяется отношением поглощенной энергии ионизирующего излучения на массу вещества.

При одной и той же поглощенной дозе радиобиологический разрушительный эффект тем выше, чем плотнее ионизация, создаваемая излучением.

Чтобы учесть этот эффект, введено понятие эквивалентной дозы. Эквивалентная доза отражает биологический эффект облучения.

Изучение отдельных последствий облучения живых тканей показало, что при одинаковых поглощенных дозах различные виды радиации производят неодинаковое биологическое воздействие на организм.

Эквивалентная доза рассчитывается путем умножения значения поглощенной дозы на специальный коэффициент — коэффициент относительной биологической эффективности (ОБЭ) или коэффициент качества данного вида излучения, отражающий его способность повреждать ткани организма.

Эффективная эквивалентная доза рассчитывается как сумма эквивалентных доз по всем органам и тканям, умноженных на взвешивающие коэффициенты для этих органов, и отражает суммарный эффект облучения для организма.

Фиксированная эффективная эквивалентная доза (CEDE) - это оценка доз радиации на человека, в результате ингаляции или употребления некоторого количества радиоактивного вещества.

Эффективная и эквивалентная дозы — это нормируемые величины, т.е. величины, являющиеся мерой ущерба (вреда) от воздействия ионизирующего излучения на человека и его потомков.

Амбиентный эквивалент дозы $H^*(d)$ — эквивалент дозы, который был создан в шаровом фантоме МКРЕ (международной комиссии по радиационным единицам) на глубине d (мм) от поверхности по диаметру, параллельному направлению излучения, в поле излучения, идентичном рассматриваемому по составу, флюенсу и энергетическому распределению, но мононаправленном и однородном.

Подсчитав индивидуальные эффективные дозы, полученные отдельными людьми, можно прийти к коллективной дозе — сумме индивидуальных эффективных доз в данной группе людей за данный промежуток времени.

Её получают путем умножения средней эффективной дозы на общее количество людей, которые находились под воздействием излучения.

Дозиметрические приборы.

Основное предназначение дозиметра — измерение мощности дозы в том месте, где этот дозиметр находится и проверка тем самым на радиоактивность подозрительных предметов.

Большинство современных дозиметрических приборов работает на основе ионизационного метода.

Основными узлами приборов являются:

- детекторы излучения: электрическая схема преобразования импульсов;
- измерительные или регистрирующие устройства.

Дозиметрические приборы классифицируются по назначению, типу датчиков, измеряемому виду излучения, характеру преобразуемых электрических сигналов.

По классификации ОСТ 95357-75 в обозначении прибора:

1) первая буква обозначает:

Д - дозиметрический,

Р - радиометрический,

С - спектрометрический прибор,

2) вторая - вид контроля:

РК - радиометр комбинированный,

РЗ - радиометр для определения загрязнения,

СЭ - спектрометр для определения распределения по энергиям,

3) третья - вид излучения:

А - α ,

Б - β ,

Г - γ ,

Н - нейтронное,

П - протонное,

Т - тяжелые частицы,

С - сметанное.

4) цифрами обозначают номер модели и номер модификации.

С практической точки зрения наибольший интерес представляет первый признак.

По назначению приборы разделяют на следующие группы.

Индикаторы - простейшие приборы радиационной разведки, предназначенные для обнаружения излучения и ориентировочной оценки мощности дозы β - и γ -излучений. Датчики - газоразрядные счетчики. К этой группе относятся индикаторы ДП-63, ДП-64.

Рентгенометры служат для измерения мощности дозы рентгеновского и γ -излучений. Диапазон измерений - от сотых долей до нескольких сотен рентген в час. В качестве датчиков

используются ионизационные камеры и газоразрядные счетчики. Такими приборами являются ДП-2, ДП-3, ДП-5 (Л, Б и В).

Радиометры применяются для обнаружения и определения степени радиоактивного заражения поверхностей, одежды, воздуха, главным образом α - и β -частицами. Возможно измерение небольших уровней γ -излучения. Датчики - газоразрядные и сцинтилляционные счетчики. Такими приборами являются ДП-12, β - γ -радиометр "Луч Л", радиометры "Тисе", БЕТЛ, КРБ-1, установки ДП-100М, СРП-8ЯП."

Дозиметры предназначены для определения суммарной дозы, главным образом γ -излучения, получаемой человеком в зоне радиационного воздействия. Индивидуальные дозиметры (комплекты ДК-02, ДП-22В, ДП-24, ИД-1, ИД-11 и др.) представляют собой малогабаритные ионизационные камеры или фотокассеты с пленкой. Бытовые дозиметры регистрируют мощность эквивалентной дозы («РА-ТОН 901») и экспозиционной дозы γ -излучения («СОСНА»),

Индикатор - сигнализатор ДП-64 применяется для постоянного радиационного наблюдения и оповещения о радиоактивной зараженности местности. Детектор - газоразрядный счетчик СТС-5. Прибор дает звуковой и световой сигналы при достижении на местности мощности дозы излучения 0.0143 мкЛ/с (200 мР/ч).

Измеритель мощности дозы ИМД-21 измеряет мощность экспозиционной дозы γ -излучения от 0,072 до 720 мкЛ/с (1-104 Р/ч) в энергетическом диапазоне от 80 кэВ до 2,6 МэВ.

Радиометр-рентгенметр ДП-5А служит для измерения мощности экспозиционной дозы γ -излучения в диапазоне от 0,00358 до 14,4 мкЛ/с (0,05 мР/ч - 200 Р/ч) (шесть поддиапазонов). Детекторы - галогенные ГРС типа СТС-5 и СИ-ЗБГ.

Радиометр БЕТА предназначен для измерения плотности потока β -частиц с энергией более 0.156 МэВ в диапазоне 10-1500 частиц/(мин·см²). Детектор - торцовый галогенный счетчик Гейгера марки С БТ-ЮЛ.

Бытовой радиометр-дозиметр АНРИ-01 «СОСНА» регистрирует γ -излучение с $E=0,06...1,5$ МэВ и β -излучением с $E=0.5...3$ МэВ. В радиометрическом режиме измеряет плотность потока β -частиц в диапазоне 10-5000 частиц/(мин·см²).

Относительно возможности проверять с помощью бытового дозиметра соответствие радиационных параметров установленным нормам можно сказать следующее: дозовые показатели (мощность дозы в помещениях, мощность дозы на местности) для отдельных точек проверить

ТЕМА 5. ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ИСКУССТВЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ РАДИАЦИИ.

План лекции:

Естественные источники радиации. Облучение естественным радиационным фоном.
Искусственные источники радиации

Естественные источники радиации. Облучение естественным радиационным фоном.

Все источники радиации на планете можно разделить на естественные (космическое излучение, газы, радиоизотопы) и искусственные (причиной появления которых стал человек).

Ионизирующие излучения, происхождение которых связано с естественными радионуклидами создают естественный (природный) радиационный фон. Все живые существа, населяющие нашу планету в том числе и человек, развиваются в условиях постоянного воздействия различных естественных источников ионизирующих излучений. Естественный радиационный фон есть неотъемлемый фактор окружающей среды, такой же, как температура, кислород, азот, атмосферное давление.

Очевидно, естественный радиационный фон играет существенную роль в жизнедеятельности человека, как и все вещества окружающей среды, с которыми организм находится в состоянии непрерывного обмена.

К естественным источникам ионизирующего излучения относятся: космическое излучение и естественные радиоактивные вещества, распределенные на поверхности и в недрах Земли, в атмосфере, воде, растениях и организме всех живых существ, населяющих нашу планету.

Космическое излучение складывается из частиц, захваченных магнитным полем Земли, галактического космического излучения и корпускулярного излучения Солнца. В его состав входят в основном электроны, протоны и альфа-частицы. Различают первичное и вторичное космическое излучение.

Первичное космическое излучение представляет собой поток частиц высокой энергии, попадающих в земную атмосферу из межзвездного пространства. Оно состоит в основном из протонов (90%) и α -частиц (около 10%). В меньших количествах (около 1%) присутствуют нейтроны, фотоны, электроны и ядра легких элементов: лития, бериллия, бора, углерода, азота, кислорода, фтора.

Вторичное космическое излучение имеет сложный состав и состоит практически из всех известных в настоящее время элементарных частиц (протонов, нейтронов, электронов, фотонов и др.). Оно образуется в результате взаимодействия частиц первичного космического излучения

с ядрами нуклидов, входящих в состав воздуха. При этом возникает вторичное излучение и образуются новые радиоактивные ядра.

Космическому внешнему облучению подвергается вся поверхность Земли. Интенсивность космического излучения зависит от солнечной активности, географического положения объекта и возрастает с высотой над уровнем моря. Наиболее интенсивно оно на Северном и Южном полюсах, менее интенсивно в экваториальных областях. Причина этого - магнитное поле Земли, отклоняющее заряженные частицы космического излучения.

Земная радиация - обусловлена совокупностью излучения радионуклидов, содержащихся в горных породах, почве, воде, атмосфере.

Неравномерное распределение радионуклидов в биосфере вызывает изменение природного радиационного фона (ПРФ) в различных местах нашей планеты. Колебания ПРФ связаны в основном с различной концентрацией радионуклидов в горных породах. Наиболее распространенными естественными радионуклидами являются представители урано-радиевого семейства. Наиболее опасными из них считаются радий, радон и продукты его распада, радиоактивный свинец и полоний, которые, являясь альфа-излучателями, распределяются и накапливаются в организме в соответствии с их химическими свойствами. Наибольшую дозу облучения в организме создает радон, являющийся радиоактивным инертным газом и поступающим из земли иногда в больших количествах. Поступая в организм при дыхании, он всасывается в кровь и разносится по всему организму. Продукты его распада облучают в основном легкие. К наиболее опасным антропогенным радионуклидам, которые появились на планете благодаря деятельности человека, следует отнести цезий-137 (^{137}Cs), стронций-90 (^{90}Sr) и плутоний-239 (^{239}Pu). Загрязнение этими радионуклидами происходит при взрывах ядерных боеприпасов и в результате аварий на ядерных объектах.

Искусственные источники радиации.

В результате хозяйственной деятельности за последние несколько десятилетий человек создал искусственные источники радиоактивного излучения и научился использовать энергию атома в самых разных целях: медицине, для производства энергии и атомного оружия, для поиска полезных ископаемых и обнаружения пожаров. Мирный атом применяется в сельском хозяйстве и археологии. С каждым годом увеличивается количество искусственных источников излучения, используемых в сфере деятельности человека, которые дают дополнительную дозовую нагрузку.

Источники, используемые в медицине - вносят основной вклад в дозу, получаемую человеком от техногенных источников радиации (медицинские процедуры и методы лечения, связанные с применением радиоактивности):

1. Рентгеновский аппарат;
2. Лучевая терапия (при лечении рака);
3. Диагностические методы, опирающиеся на использование радиоизотопов;
4. Терапевтические методы, опирающиеся на использование радиоизотопов.

Любое научное открытие, как показал исторический опыт, может быть использовано во благо или во вред человеческой цивилизации. Одним из примеров этого является разработка и применение ядерного оружия.

Испытания ядерного оружия в атмосфере, начатые после второй мировой войны, являются дополнительным источником облучения населения Земли. Наибольшее количество испытаний было проведено в 1954-1958 и 1961-1962 годах. С 1963 года проводятся в основном подземные испытания, которые обычно не сопровождаются образованием радиоактивных осадков. На рис. 2.9 приведены данные о количестве испытаний в атмосфере различными государствами в период 1954-1962г.г.

В результате взрывов на планете образовалось огромное количество радионуклидов. Часть радиоактивного материала выпала неподалеку от места взрыва (локальные осадки). Тропосферные осадки выпали на расстоянии нескольких сотен тысяч километров в течение месяца после взрыва. Их распространение зависит от погодных условий на данной широте. Большая часть радиоактивного материала сосредоточилась в стратосфере (10-50 км от поверхности Земли), обуславливая глобальное радиоактивное загрязнение окружающей среды в течение многих лет. Радиоактивные осадки состоят из нескольких сотен различных радионуклидов, но наибольшее значение для формирования доз облучения населения Земли имеют следующие: углерод-14, цезий-137, церий-144, стронций-90, рутений-106, цирконий-95, тритий и иод-131. Дозы облучения от этих и других радионуклидов неодинаковы в различные периоды времени после взрыва, так как различна скорость их распада.

ТЕМА 6. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ РАДИАЦИИ.

План лекции:

Действие ионизирующих излучений на организм человека. Основные эффекты действия ионизирующих излучений на клетку. Гигиенические аспекты радиационной безопасности.

Действие ионизирующих излучений на организм человека. Основные эффекты действия ионизирующих излучений на клетку.

Радиоволны, световые волны, тепловая энергия солнца — все это разновидности излучений. Однако, излучение будет ионизирующим, если оно способно разрывать химические связи молекул, из которых состоят ткани живого организма, и, как следствие, вызывать биологические изменения. Действие ионизирующего излучения происходит на атомном или молекулярном уровне, независимо от того, подвергаемся ли мы внешнему облучению, или получаем радиоактивные вещества с пищей и водой, что нарушает баланс биологических процессов в организме и приводит к неблагоприятным последствиям. Биологические эффекты влияния радиации на организм человека обусловлены взаимодействием энергии излучения с биологической тканью. Энергию непосредственно передаваемую атомам и молекулам биотканей называют прямым действием радиации. Некоторые клетки из-за неравномерности распределения энергии излучения будут значительно повреждены.

Одним из прямых эффектов является канцерогенез или развитие онкологических заболеваний. Раковая опухоль возникает, когда соматическая клетка выходит из под контроля организма и начинает активно делиться. Первопричиной этого являются нарушения в генетическом механизме, называемые мутациями.

Заряженные частицы проникают в ткани организма, теряют свою энергию вследствие электрических взаимодействий с электронами атомов. Электрическое взаимодействие сопровождается процессом ионизации (вырывание электрона из нейтрального атома)

Физико-химические изменения сопровождаются возникновением в организме чрезвычайно опасных "свободных радикалов"- определенные атомы или группы атомов, обладающие высокой химической активностью. Основным признаком свободных радикалов являются избыточные или неспаренные электроны. Такие электроны легко смещаются со своих орбит и могут активно участвовать в химической реакции. Например, если обычная молекула кислорода захватит свободный электрон, то она превращается в высокоактивный свободный радикал — супероксид.

Если число свободных радикалов мало, то организм имеет возможность их контролировать. Если же их становится слишком много, то нарушается работа защитных систем, жизнедеятельность отдельных функций организма. Основные фильтры иммунной системы — лимфатические узлы работают в перенапряженном режиме и не успевают их

отделять. Таким образом, ослабляются защитные барьеры и в организме создаются благоприятные условия для размножения вирусов микробов и раковых клеток.

Химические изменения возникают в результате взаимодействия свободных радикалов друг с другом или со "здоровыми" молекулами Биохимические изменения происходят как в момент облучения, так и на протяжении многих лет, что приводит к гибели клеток.

Взаимодействие радиации с организмом начинается с молекулярного уровня. Прямое воздействие ионизирующего излучения, поэтому является более специфичным. Повышение уровня окислителей характерно и для других воздействий. Известно, что различные симптомы (температура, головная боль и др.) встречаются при многих болезнях и причины их различны. Это затрудняет установление диагноза. Поэтому, если в результате вредного воздействия на организм радиации не возникает определенной болезни, установить причину более отдаленных последствий трудно, поскольку они теряют свою специфичность.

Радиочувствительность различных тканей организма зависит от биосинтетических процессов и связанной с ними ферментативной активностью.

Радиочувствительность организма зависит от его возраста. Небольшие дозы при облучении детей могут замедлить или вовсе остановить у них рост костей. Чем меньше возраст ребенка, тем сильнее подавляется рост скелета. Видовая радиочувствительность возрастает по мере усложнения организма. Это объясняется тем, что в сложных организмах больше слабых звеньев, вызывающих цепные реакции выживания.

Каждая клетка организма содержит молекулу ДНК, которая несет информацию для правильного воспроизведения новых клеток. Радиация может либо убить клетку, либо исказить информацию в ДНК так, что со временем появятся дефектные клетки. Изменение генетического кода клетки называют мутацией. Если мутация происходит в яйцеклетке спермы, последствия могут быть ощутимы и в далеком будущем, т.к. при оплодотворении образуются 23 пары хромосом, каждая из которых состоит из сложного вещества, называемого дезоксирибонуклиновой кислотой. Поэтому мутация, возникающая в половой клетке, называется генетической мутацией и может передаваться последующим поколениям.

Гигиенические аспекты радиационной безопасности.

Живой организм очень чувствителен к действию ионизирующей радиации. Чем выше на эволюционной лестнице стоит живой организм, тем он более радиочувствителен. При облучении сложных биологических организмов следует учитывать процессы, происходящие на

уровне взаимосвязи органов и тканей. Организм человека, как совершенная природная система, еще более чувствителен к радиации.

Если человек перенес общее облучение дозой 100-200 рад, то у него спустя несколько дней появятся признаки лучевой болезни в легкой форме. Средняя степень тяжести лучевой болезни наблюдается у лиц, подвергшихся воздействию излучения в 250-400 рад. При облучении дозой 400-600 рад развивается тяжелая форма лучевой болезни. Очень тяжелая форма лучевой болезни возникает при облучении дозой выше 600 рад. Описанные выше последствия радиационного облучения характерны для случаев, когда медпомощь отсутствует.

Для лечения облученного организма современная медицина широко применяет такие методы, как кровезамещение, пересадка костного мозга, введение антибиотиков, а также другие методы интенсивной терапии. При таком лечении возможно исключить смертельный исход даже при облучении дозой до 1000 рад.

В зависимости от величины поглощенной дозы излучения и индивидуальных особенностей организма вызванные изменения могут быть обратимыми или необратимыми. При небольших дозах пораженная ткань восстанавливает свою функциональную деятельность. Большие дозы при длительном воздействии могут вызвать необратимое поражение отдельных органов или всего организма. Любой вид ионизирующих излучений вызывает биологические изменения в организме как при внешнем (источник находится вне организма), так и при внутреннем облучении (радиоактивные вещества попадают внутрь организма, например, с пищей или ингаляционным путем). Рассмотрим действие ионизирующего излучения, когда источник облучения находится вне организма.

Биологический эффект ионизирующего излучения в данном случае зависит от суммарной дозы и времени воздействия излучения, его вида, размеров облучаемой поверхности и индивидуальных особенностей организма. При однократном облучении всего тела человека возможны биологические нарушения в зависимости от суммарной поглощенной дозы излучения.

При облучении дозами, в 100-1000 раз превышающими смертельную дозу, человек может погибнуть во время облучения. Степень чувствительности различных тканей к облучению неодинакова.

При однократном облучении всего тела человека поглощенной дозой 0,5 Гр через сутки после облучения может резко сократиться число лимфоцитов. Уменьшается также и количество эритроцитов (красных кровяных телец) по истечении двух недель после облучения. Важным

фактором при воздействии ионизирующего излучения на организм является время облучения. С увеличением мощности дозы поражающее действие излучения возрастает.

Внешнее облучение альфа-, а также бета-частицами менее опасно. Они имеют небольшой пробег в ткани и не достигают кровеносных и других внутренних органов. При внешнем облучении необходимо учитывать гамма- и нейтронное облучение, которые проникают в ткань на большую глубину и разрушают ее, о чем более подробно рассказывалось выше.

Ионизирующее излучение может двумя способами оказывать воздействие на человека. Первый способ — внешнее облучение от источника, расположенного вне организма, которое в основном зависит от радиационного фона местности на которой проживает человек или от других внешних факторов. Второй — внутреннее облучение, обусловленное поступлением внутрь организма радиоактивного вещества, главным образом с продуктами питания.

Продукты питания, не соответствующие радиационным нормам, имеют повышенное содержание радионуклидов, инкорпорируются с пищей и становятся источником излучения непосредственно внутри организма.

Большую опасность представляют продукты питания и воздух, содержащие изотопы плутония и америция, которые обладают высокой альфа активностью. Плутоний, выпавший в результате Чернобыльской катастрофы, является самым опасным канцерогенным веществом. Альфа излучение имеет высокую степень ионизации и, следовательно, большую поражающую способность для биологических тканей.

Попадание плутония, а также америция через дыхательные пути в организм человека вызывает онкологию легочных заболеваний. Однако следует учесть, что отношение общего количества плутония и его эквивалентов америция, кюрия к общему количеству плутония, попавшего в организм ингаляционным путем незначительно.

Внешнее и внутреннее облучения требуют различные меры предосторожности, которые должны быть приняты против опасного действия радиации.

Для защитных мероприятий от внешнего облучения используются в основном свинцовые и бетонные защитные экраны на пути излучения. Эффективность применения материала в качестве экрана для защиты от проникновения рентгеновских или гамма-лучей зависит от плотности материала, а также от концентрации содержащихся в нем электронов.

Если от внешнего облучения можно защититься специальными экранами или другими действиями, то с внутренним облучением это сделать не представляется возможным.

Различают три возможных пути, по которым радионуклиды способны попасть внутрь организма:

- а) с пищей;
- б) через дыхательные пути с воздухом;
- в) через повреждения на коже.

Следует отметить, что радиоактивные элементы плутоний и америций проникают в организм в основном с пищей или при дыхании и очень редко через повреждения кожи.

Проникновение радиоактивных веществ с пищей внутрь организма существенно зависит от их химического взаимодействия. Установлено, что хлорированная вода увеличивает растворимость плутония, и как следствие инкорпорацию его во внутренние органы.

После того, как радиоактивное вещество попало в организм, следует учитывать величину энергии и вид излучения, физический и биологический период полураспада радионуклида.

Для различных критических органов разработаны нормативы, определяющие допустимое содержание каждого радиоактивного элемента. На основании этих данных созданы документы, регламентирующие допустимые концентрации радиоактивных веществ в атмосферном воздухе, питьевой воде, продуктах питания. В Беларуси в связи с аварией на ЧАЭС действуют Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов цезия и стронция в пищевых продуктах и питьевой воде (РДУ-92). В Гомельской области введены по некоторым пищевым продуктам питания, например детского, более жесткие нормативы. С учетом всех вышеперечисленных факторов и нормативов, подчеркнем, что среднегодовая эффективная эквивалентная доза облучения человека не должна превышать 1 мЗв в год.

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.

МОДУЛЬ «ФИЗИКА ЛАЗЕРОВ»

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

№	Тематика практических занятий	Содержание занятия	Кол-во академ. часов	Форма Контроля
2	Тема 2. Взаимодействие излучения с атомами и ионами	Решение задач Семинар	4	ДЗ
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 $T = 300 \text{ K}$, 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»

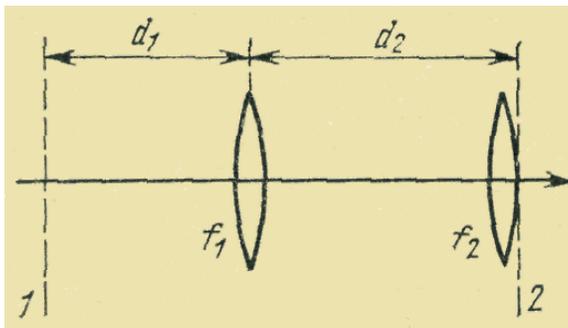
1. Имеется резонатор объемом $V = 1 \text{ см}^3$. Найдите, сколько мод резонатора находится в полосе $\Delta\lambda = 0,01 \text{ мкм}$ с центральной длиной волны $\lambda = 600 \text{ нм}$.
2. Длина волны λ_m , которая соответствует максимуму распределения, удовлетворяет соотношению $\lambda_m \cdot T = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ (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. Экцимерные 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.

МОДУЛЬ «РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА»

Практические занятия по дисциплине предусматривают решение задач по определенным темам дисциплины, выполнение ДЗ. На занятии разбираются несколько типовых задач, с подробным обсуждением алгоритма решения и полученных результатов, остальные задачи студенты решают самостоятельно. Часть занятий проводится в виде семинаров с целью более подробного рассмотрения наиболее важных вопросов.

Так же на практических занятиях осуществляется текущий контроль знаний студентов по темам дисциплины в виде: коллоквиума (КЛ) и итоговых тестов по модулю (ИТ).

№	Тематика практических занятий	Содержание занятия	Кол-во академ. часов	Форма Контроля
1	Тема 1. Элементы ядерной физики.	Решение задач	2	ДЗ
2	Тема 2. Единицы измерения и характеристики ионизирующих излучений.	Семинар	2	
3	Тема 3. Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом.	Решение задач	4	ДЗ
4	Тема 4. Основы радиационной дозиметрии	Семинар	2	ДЗ
5	Темы 1 -4	Коллоквиум	2	КЛ
6	Тема 5. Естественные и искусственные источники радиации	Семинар	2	
7	Тема 6. Биологическое действие радиации	Семинар	4	ИТ

Тема «Элементы ядерной физики»

1. Исходя из полуэмпирической формулы Вейцеккера для E_{CB} найти:

а) выражение для Z при котором E_{CB} максимальна при $A = \text{const}$;

б) при $A = 28$ найти Z при котором E_{CB} максимальна.

2. Разность энергий связи ядер ${}^7_3\text{Li}$ и ${}^7_4\text{Be}$ равна $\Delta W = 1,7$ МэВ. Определить радиус этих ядер.

3. Определить возраст древних деревянных предметов, у которых удельная активность ${}^{14}\text{C}$ составляет $3/5$ удельной активности этого же нуклида в только что срубленных деревьях.

4. При радиоактивном распаде ядер нуклида A_1 образуется радионуклид A_2 . Их постоянные распада равны λ_1 и λ_2 . Полагая, что в начальный момент препарат содержал только ядра нуклида A_1 в количестве N_{10} определить:

а) количество ядер A_2 через промежуток времени t ;

б) промежуток времени, через который количество ядер A_2 достигнет максимума;

в) в каком случае может возникнуть состояние переходного равновесия, при котором отношение количества обоих нуклидов будет оставаться постоянным. Чему равно это отношение?

5. При β - распаде ${}^{112}\text{Pd}$ возникает β - активный нуклид ${}^{112}\text{Ag}$. Их периоды полураспада равны соответственно 21 и 3,2 ч. Найти отношение максимальной активности нуклида ${}^{112}\text{Ag}$ к первоначальной активности препарата, если в начальный момент препарат содержал только нуклид ${}^{112}\text{Pd}$.

6. Радионуклид ${}^{27}\text{Mg}$ образуется с постоянной скоростью $q = 5,0 \cdot 10^{10}$ ядро/с. Определить количество ядер ${}^{27}\text{Mg}$, которое накопится в препарате через промежуток времени:

а) значительно превосходящий его период полураспада;

б) равный периоду полураспада.

7. Радионуклид ${}^{124}\text{Sb}$ образуется с постоянной скоростью $q = 1,0 \cdot 10^9$ ядро/с. С периодом полураспада $T = 60$ сут он превращается в стабильный нуклид ${}^{124}\text{Te}$, Найти:

а) через сколько времени после начала образования активность ${}^{124}\text{Sb}$ станет $A = 3,7 \cdot 10^8$ Бк (10 мКи);

б) какая масса нуклида ${}^{124}\text{Te}$ накопится в препарате за четыре месяца после начала его образования.

8. Радионуклид A_1 , образующийся с постоянной скоростью q ядро/с, испытывает цепочку превращений по схеме:



(под стрелками указаны постоянные распада). Найти закон накопления количества ядер A_1 , A_2 и A_3 с течением времени, полагая, что в начальный момент препарат их не содержал.

Тема. «Взаимодействие частиц с веществом»

1. Во сколько раз отличаются энергетические потери протонов и K^+ -мезонов с кинетической энергией $T = 100$ МэВ в алюминиевой фольге толщиной 1 мм? Энергию покоя протона и K^+ -мезонов принять 938.3 МэВ и 493.6 МэВ соответственно.

2. Рассчитать удельные ионизационные потери энергии для протонов с энергией 10 МэВ в алюминии ($\rho_{Al} = 2.7$ г/см³).

3. Определить удельные ионизационные потери мюонов в алюминии ($\rho_{Al} = 2.7$ г/см³), если их кинетическая энергия равна: 1) 250 МэВ, 2) 380 МэВ. Масса покоя мюона 105,66 МэВ

4. Определить удельные ионизационные потери и среднее число ионов на 1 см пробега в воздухе для протона с энергией 0,1 МэВ. На образование одного иона в воздухе необходимо ≈ 35 МэВ. Для воздуха: $Z = 7$, $A = 14$, плотность $\rho = 1.29 \cdot 10^{-3}$ г/см³. Масса протона 938.3 МэВ

5. Оценить отношение удельных ионизационных потерь в железе для протонов и электронов с энергиями: 10 МэВ, 100 МэВ и 1 ГэВ.

6. Рассчитать удельные радиационные потери в медном поглотителе электронов с энергиями 20 МэВ и 1 ГэВ. Для меди $Z = 29$, $A = 64$, плотность 8.93 г/см³.

7. Электроны и протоны с энергией $E = 100$ МэВ падают на алюминиевую пластинку толщиной $\Delta x = 5$ мм. Определить энергии электронов и протонов на выходе пластинки.

8. Какова энергия электронов, имеющих ту же длину пробега в алюминии, что и протоны с энергией 20 МэВ?

Таблица 2. Пробег протонов в алюминии в зависимости от их энергии E_p

E_p , МэВ	1	3	5	10
Пробег, см	$1.3 \cdot 10^{-3}$	$7.8 \cdot 10^{-3}$	$1.8 \cdot 10^{-2}$	$6.2 \cdot 10^{-2}$
Пробег, мг/см ²	3.45	21	50	170
E_p , МэВ	20	40	100	1000
Пробег, см	$2.7 \cdot 10^{-1}$	$7.0 \cdot 10^{-1}$	3.6	148
Пробег, мг/см ²	560	$1.9 \cdot 10^3$	$9.8 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^5$

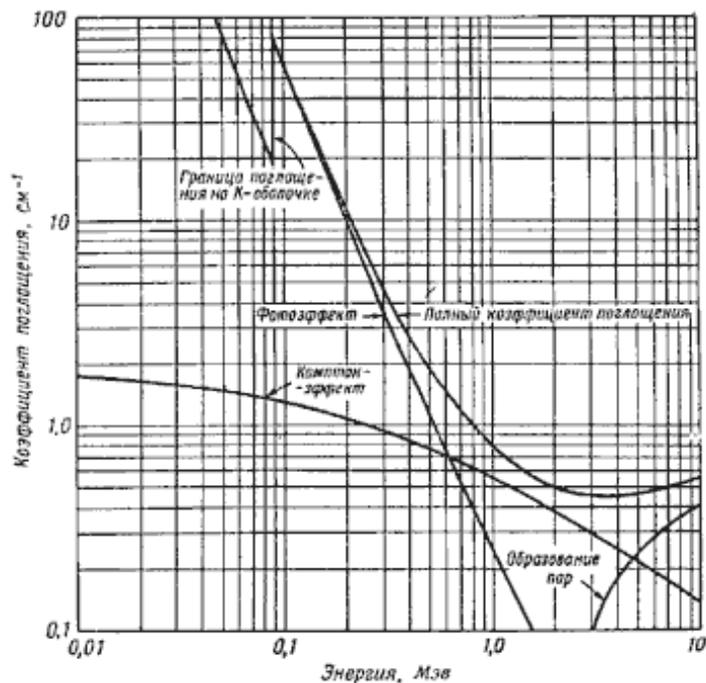
9. Рассчитать и сравнить полные сечения фотоэффекта, комптоновского рассеяния и эффекта рождения пар при облучении алюминия γ -квантами с энергиями: 1) 0.51 МэВ, 2) 5 МэВ, 3) 25 МэВ.

10. Как влияет заряд ядер вещества на абсолютные величины сечений и на относительный вклад отдельных сечений в полное сечение взаимодействия гамма-квантов с веществом?

11. Радиоактивный источник испускает две γ -линии с энергиями $E_1 = 170$ кэВ и $E_2 = 450$ кэВ. Интенсивность обеих линий одинакова. Подсчитать отношение интенсивностей γ -линий после прохождения поглотителя из свинца толщиной: 1) 1 мм, 2) 10 мм.

12. Интенсивность пучка γ -квантов с энергией 3 МэВ ослабляется свинцовым фильтром толщиной 10 см. Какой должна быть толщина алюминиевого поглотителя, чтобы вызвать такое же ослабление интенсивности пучка γ -квантов?

13. Сечение захвата $\sigma_{\text{захв}}$ тепловых нейтронов ядрами железа 2.5 б, плотность железа 7.8 г/см³. Оценить длину свободного пробега тепловых нейтронов в железе.

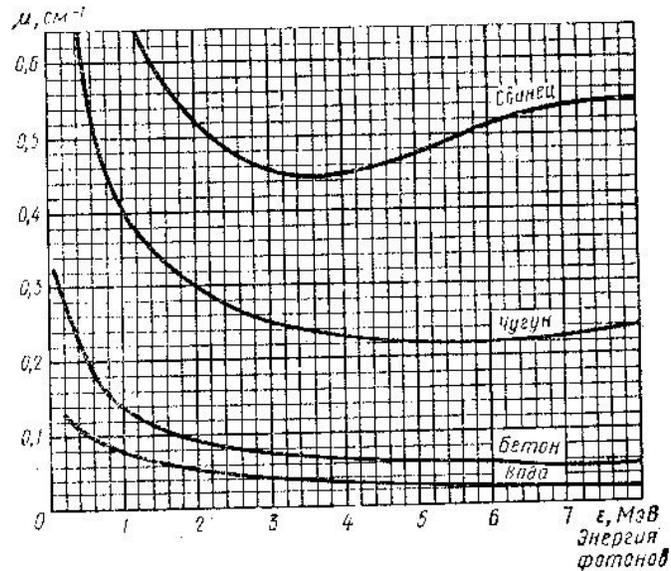


Тема. «Основы радиационной дозиметрии»

1. Определить число N слоев половинного ослабления, уменьшающих интенсивность I узкого пучка γ -излучения в $k=100$ раз.

2. Сколько слоев половинного ослабления требуется, чтобы уменьшить интенсивность узкого пучка γ -квантов в 10 раз?

3. На какую глубину нужно погрузить в воду источник узкого пучка γ -излучения (энергия ϵ гамма-фотонов равна 1,6 МэВ), чтобы интенсивность I пучка, выходящего из воды, была уменьшена в $k=1000$ раз?



4. Узкий пучок γ -излучения (энергия ϵ гамма-фотонов равна 2,4 МэВ) проходит через бетонную плиту толщиной $x_1=1$ м. Какой толщины x_2 плита из чугуна дает такое же ослабление данного пучка γ -излучения?

5. При определении периода полураспада $T_{1/2}$ короткоживущего радиоактивного изотопа использован счетчик импульсов. За время $\Delta t = 1$ мин в начале наблюдения ($t = 0$) было насчитано $\Delta n_1 = 250$ импульсов, а по истечении времени $t = 1$ ч – $\Delta n_2 = 92$ импульса. Определить постоянную радиоактивного распада λ и период полураспада $T_{1/2}$ изотопа.

6. Кинетическая энергия α -частицы, вылетающей из ядра атома полония ${}^{214}_{84}\text{Po}$ при радиоактивном распаде 7,68 МэВ. Найти: а) скорость α -частицы; б) полную энергию, выделяющуюся при вылете α -частицы; в) число пар ионов N , образуемых α -частицей, принимая, что на образование одной пары ионов в воздухе требуется энергия 34 эВ; г) ток насыщения I_n в ионизационной камере от всех α -частиц, испускаемых полонием. Активность полония $A = 3,7 \cdot 10^4$ Бк.

7. Точечный радиоактивный источник ${}^{60}\text{Co}$ находится в центре свинцового сферического контейнера с толщиной стенок $x = 1$ см и наружным радиусом $R = 20$ см. Определить максимальную активность A_{max} источника, который можно хранить в контейнере, если допустимая плотность потока $\Phi_{\text{доп}}$ γ -фотонов при выходе из контейнера равна $8 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$.

Принять, что при каждом акте распада ядра ^{60}Co испускается $n = 2$ γ -фотона, средняя энергия которых $\langle \epsilon \rangle = 1,25$ МэВ.

8. Космическое излучение на уровне моря на экваторе образует в воздухе объемом $V=1$ см³ в среднем $N = 24$ пары ионов за время $t_1 = 10$ с. Определить экспозиционную дозу X , получаемую человеком за время $t_2 = 1$ год.

9. Мощность дозы гамма-излучения радиоактивных изотопов в зоне заражения равна 200 мкГр/ч. В течение скольких часов человек может работать в этой зоне без вреда для здоровья, если в аварийной обстановке в качестве допустимой принята доза 25 мЗв?

10. Человек массой 60 кг подвергался облучению в течение 12 ч. Какова мощность поглощенной дозы и энергия, поглощенная человеком за это время, если поглощенная доза излучения 35 мГр?

11. Воздух при нормальных условиях облучается γ -излучением. Определить энергию, поглощаемую воздухом массой 5 г при экспозиционной дозе излучения 258 мкКл/кг. Энергия ионизации воздуха $5,4 \cdot 10^{-18}$ Дж.

12. Мощность экспозиционной дозы на расстоянии 10 см от источника составляет 85 мР/ч. На каком расстоянии от источника можно находиться без защиты, если допустимая мощность дозы равна 0,017 мР/ч?

13. Карманный дозиметр радиоактивного облучения, представляющий собой миниатюрную ионизационную камеру емкостью 3 пФ, заряжен до потенциала 180 В. Под влиянием облучения потенциал снизился до 160 В. Сколько рентген покажет дозиметр, если до этого он был поставлен на ноль, а объем воздуха в камере 1,8 см³?

14. Гамма-излучение ^{241}Am имеет две компоненты с энергиями $E_1 = 26,345$ кэВ (2,4 %) и $E_2 = 59,537$ кэВ (35,8 %). Этим энергиям соответствуют массовые коэффициенты поглощения гамма-излучения в воздухе 0,3215 см²/г и 0,0288 см²/г. Рассчитать мощность дозы, создаваемую в воздухе на расстоянии 10 см от источника ^{241}Am активностью 310 кБк.

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 пытаясь 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. Смирнов С.Н., Радиационная экология. Физика ионизирующих излучений: учебник для студентов вузов [Электронный ресурс] : учеб. / Смирнов С.Н., Герасимов Д.Н.. — Электрон. дан. — Москва : Издательский дом МЭИ, 2016. — 326 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/72276>. — Загл. с экрана

8. Иродов, И.Е. Задачи по общей физике: Учебное пособие [Электронный ресурс] : учеб. пособие — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2018. — 420 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/99230>. — Загл. с экрана.

9. Числов Н.Н. Введение в радиационный контроль [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Числов Н.Н., Числов Д.Н.— Электрон. текстовые данные.— Томск: Томский политехнический университет, 2014.— 199 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/34653.html>. — ЭБС «IPRbooks»
10. 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»
11. 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»
12. Сашина Л.А. Радиационный неразрушающий контроль [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Сашина Л.А.— Электрон. текстовые данные.— М.: Академия стандартизации, метрологии и сертификации, 2012.— 124 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/44296.html>. — ЭБС «IPRbooks»
13. Павленко В.И. Источники ионизирующих излучений [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.И. Павленко, О.Д. Едаменко, Н.И. Черкашина. — Электрон. текстовые данные. — Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ЭБС АСВ, 2015. — 242 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/70251.html>

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	79
2.1 Общие рекомендации по подготовке к практическим занятиям	79
2.2 Примерные темы практических занятий, примерные задачи и темы докладов по изучаемым темам	80
3 Методические рекомендации к самостоятельной работе	91
3.1 Общие рекомендации по организации внеаудиторной самостоятельной работы	91
3.2 Работа с учебно-методическим и информационным обеспечением	91
3.3 Подготовка к практическим занятиям	93
3.4 Самостоятельное изучение и конспектирование отдельных тем	94
3.5 Подготовка к текущему и промежуточному контролю	94
3.6 Подготовка к другим видам работ	98
Библиографический список	100

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