


Медицинская и биологическая физика

Под общей редакцией
члена-корреспондента АПН Украины
профессора **О.В.Чалого**

Том II



Раздел 9

Элементы квантовой механики

Стр. 232-294

Работу выполнила:

Ученица 11-А класса

Украинского медицинского лицея

НМУ им. О.О.Богомольца

Алаторских Анастасия Евгеньевна

Руководитель:

Лялько В.И.

[1 План:]

9.1. Основные представления квантовой механики:

9.1.1 Место механики в системе наук о движении тел;

9.1.2 Гипотеза де Бройля ;

9.1.3 Соотношение неопределенностей Гейзенберга;.

9.1.4 Основные уравнения квантовой механики – уравнение Шредингера;

9.1.5 Уравнение Шредингера для атома водорода;

9.1.6 Многоэлектронные атомы;

9.2 Выделение и поглощение энергии атомами и молекулами:

9.2.1 Атомные спектры;

9.2.2 Молекулярные спектры;

[2 План:]

9.3 Люминесценция:

9.3.1 Виды люминесценции

9.3.2 Фотолюминесценция. Закон Стокса;

9.3.3 Механизм люминесценции;

9.4 Индуктивное излучение:

9.4.1 Равновесная и инверсная заселенность;

9.4.2 Строение и принцип работы лазера;

9.5 Электронный парамагнитный резонанс, ядерный магнитный резонанс и их медико-биологическое применение:

9.5.1 Метод электронного парамагнитного резонанса;

9.5.2 Метод спиновых миток (спиновых зондов);

9.5.3 Спин-иммунологический метод;

9.5.4 Метод ядерного магнитного резонанса;

[3 План:]

9.6 Практикум квантовой механики:

9.6.1 Практическое занятие “Основные представления квантовой механики”;

9.6.2 Лабораторная работа “Применение фотоэлемента для измерения освещенности и определение его чувствительности”;

9.6.3 Лабораторная работа “Изучение работы оптического квантового генератора”.

9.7 Контрольные вопросы

Элементы квантовой механики

- **КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА** - наука, которая описывает движение микрочастиц, то есть элементарных частиц, ядер атомов, молекул и систем, что из них складываются. Законы квантовой механики составляют основу для изучения строения вещества, дают возможность выяснить строение атомов, природу химических связей, объяснить периодическую систему Д.И.Менделеева.
- Квантовая механика, зародившаяся на рубеже XIX-XX веков, была и остается основной теорией атомных явлений.

9.1. Основные представления квантовой механики:

9.1.1. Место квантовой механики в системе наук о движении тел.

Виды механики

*Классическая
Механика
Ньютона-
Галилея
(XVIIICт.)*

*Механика
теории
Относительнос
ти
(10-20 года
XXст.)*

*Квантовая
механика*

*Релятивистска
я
Квантовая
механика*

Классическая механика Ньютона-Галилея

Классическая механика — вид механики, основанный на законах Ньютона и принципе относительности Галилея. Поэтому её часто называют «**Ньютоновской механикой**».

Классическая механика подразделяется на:

1. **Статистику** (которая рассматривает равновесие тел)
2. **Кинематику** (которая изучает геометрическое свойство движения без рассмотрения его причин)
3. **Динамику** (которая рассматривает движение тел).

Классическая механика справедлива для случаев, когда скорость тела x значительно меньше скорости распространения света c ($x \ll c$), а масса тела значительно больше чем масса электрона $m_{\text{ел}}$ ($mT \gg m_{\text{ел}}$).

Механика теории относительности

Специальная теория относительности (СТО) (частная теория относительности; **релятивистская механика**) — теория, описывающая движение, законы механики и пространственно-временные отношения, определяющие их, при скоростях движения, близких к скорости света. В рамках специальной теории относительности классическая механика Ньютона является приближением низких скоростей.

Обобщение СТО для гравитационных полей образует общую теорию относительности.

Отклонения в протекании физических процессов,

описываемые теорией относительности, от эффектов, предсказываемых классической механикой, называют *релятивистскими эффектами*, скорости, при которых такие эффекты становятся существенными *релятивистскими скоростями*

Квантовая механика

Квантовая механика — раздел теоретической физики, описывающий квантовые системы и законы их движения.

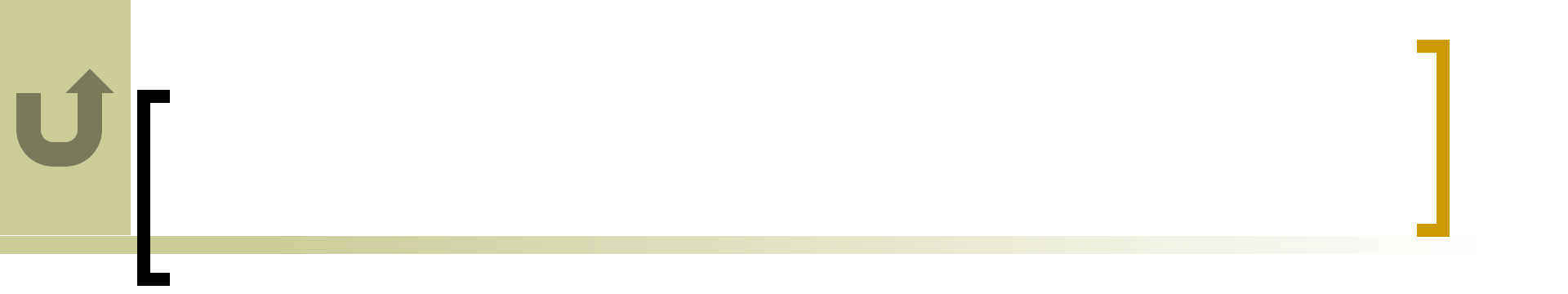
Основные уравнения квантовой динамики:

- Уравнение Шредингера
- Уравнение фон Неймана
- Уравнение Линдбала
- Уравнение Гейзенберга

Квантовая механика без учета эффектов теории Относительности $m\mathbf{T} = m\mathbf{e}\mathbf{l}$ и скоростью $u \ll c$
нерелятивистская квантовая механика

Релятивистская квантовая механика

Раздел теоретической физики, в котором рассматриваются релятивистские квантовые законы движения микрочастиц в т. н. одночастичном приближении. Релятивистские эффекты велики при энергиях частицы, сравнимых с её энергией покоя. При таких энергиях может происходить рождение частиц, поэтому рассмотрение одной частицы в общем случае неправомерно. Последовательное описание свойств релятивистских квантовых частиц возможно только в рамках квантовой теории поля.



Однако в некоторых задачах, в которых релятивистские эффекты существенны, образование частиц можно не учитывать и использовать волновые уравнения, описывающие движение одной частицы. Основой расчётов в **Релятивистская квантовая механика** служат релятивистские обобщения уравнение Шредингера: Дирака уравнение для электронов и др. частиц со спином $1/2$ (где \hbar - постоянная Планка) и Клейна-Гордона уравнение для частиц со спином 0.

Релятивистская квантовая механика справедлива в случае, если

$$mT = m_{c\ddot{e}} \text{ та } U = C$$

9.1.2 Гипотеза де Бройля

Первым шагом на пути создания новой квантовой теории

была гипотеза Л. Бройля о дуализме оптических явлений,

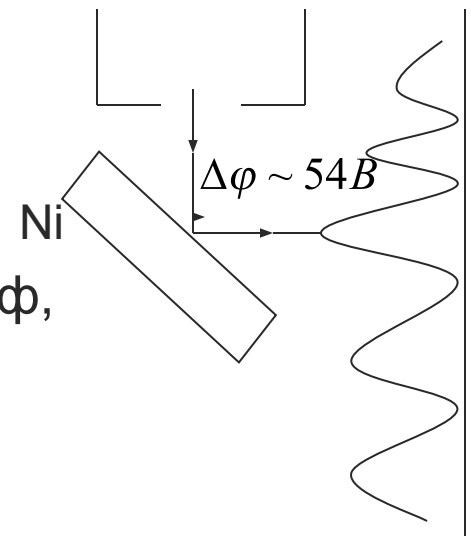
который значит:

СВЕТ → это электромагнитные волны
→ это поток фотонов, которые характеризуются энергией $E_{\text{ф}}$, массой $m_{\text{ф}}$ и импульсом $P_{\text{ф}}$.

Согласно гипотезе де Бройля длина волны

составляет:

$$\lambda = \frac{h}{mU}$$



В 1927г. Гипотеза де Бройля получила экспериментальное подтверждение

9.1.3 Соотношение неопределенностей Гейзенберга

Всегда существует неопределенность в значениях координаты и импульса, связанные определенным соотношением, которое было установлено в 1927 году немецким физиком В. Гейзенбергом.

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{2}$$

Из этого отношения vyplывает, что чем точнее мы попробуем определить координату частицы, тем с меньшей точностью сможем охарактеризовать ее импульс:

$$\Delta p \approx \frac{\hbar}{\Delta x \rightarrow 0} \rightarrow \infty$$

9.1.4 Основные уравнения квантовой механики – уравнение Шредингера

- Уравнение, которое описывает движение микрочастицы, должно воспроизводить ее волновые свойства :

$$\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 S}{\partial t^2}$$

- Уравнение функции:

$$\psi = \Psi(x) \sin \omega t$$

- Стационарное уравнение Шредингера:

$$\Delta \psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - E_{nom}) \psi = 0$$

9.1.5 Уравнение Шредингера для атома водорода

Потенциальная энергия системы электрон-ядро в атоме водорода имеет вид кулоновской потенциальной энергии:

$$E_{\text{пот}} = \frac{e}{4\pi\epsilon_0 R}$$

Учитывая это, уравнение Шредингера для простейшей атомной системы – атома водорода- выглядит так:

$$\Delta\psi + \left(\frac{2m}{\hbar^2}\right) \cdot \left(E + \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 R}\right)\psi = 0$$

Волновая функция, которая является решением уравнение Шредингера, имеет три **квантовых числа**:

- 1) Главное квантовое число n
- 2) Орбитальное квантовое число ℓ
- 3) Магнитное квантовое число m_1

1) Главное квантовое число n

Характеризует энергию электрона и размеры его орбиталей, может иметь такие значения:

$$n = 1, 2, 3, 4, \dots$$

$$K, L, M, N, \dots$$

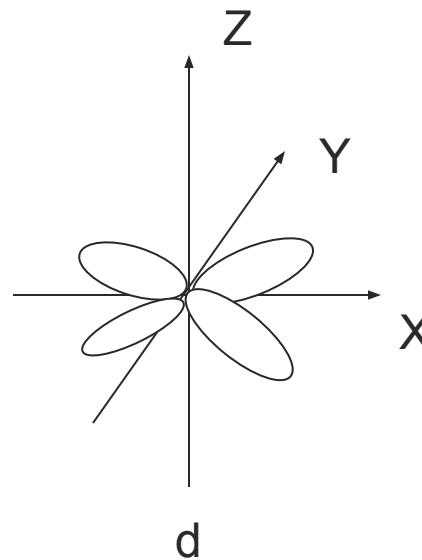
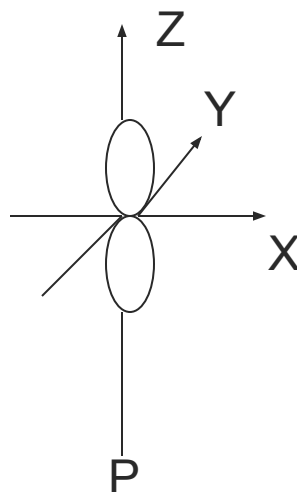
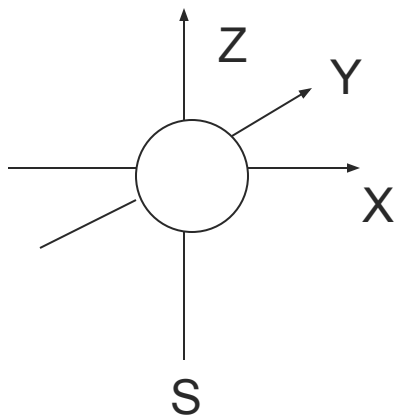
(K, L, M, N – обозначение определенных энергетических уровней)


2) Орбитальное квантовое число l

Характеризует величину момента количества движений, т.е. характеризует форму орбиталей:

$$L = \hbar \sqrt{l(l+1)}$$

Формы орбиталей:





3) Магнитное квантовое число m_l

Обозначает пространственную ориентацию орбиталей.

Спин – момент количества движения электрона.

Величина которого:

$$L_S = \hbar \sqrt{S(S+1)}$$

При наличии внешнего магнитного поля B , проекция L_{SZ} принимает следующее значение:

$$L_{SZ} = m_S \hbar$$

Таким образом, магнитное спиновое число m_S обозначает проекцию L_{SZ} по направлению магнитного поля.

9.1.6 Многоэлектронные атомы

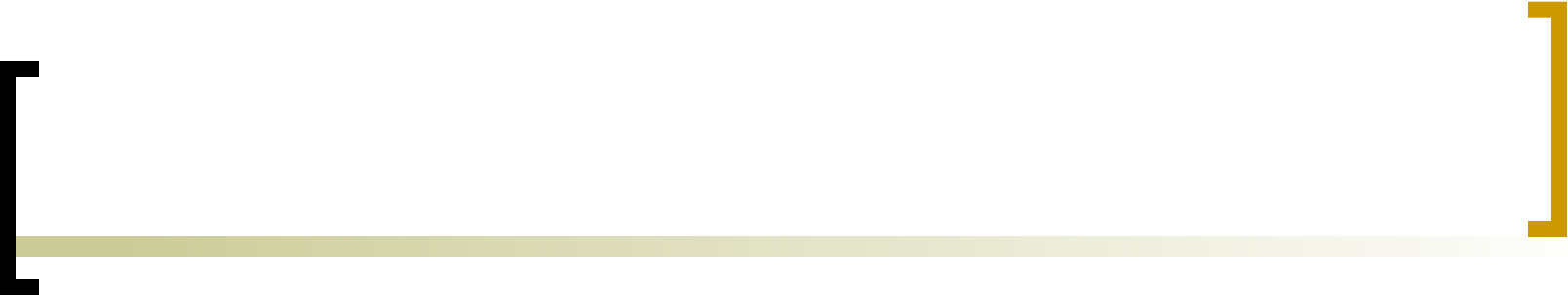
Получить точное решение уравнения Шредингера для многоэлектронной системы невозможно. Сложность задачи заключается в том, что электрон движется не только в силовом поле ядра, но и в поле других электронов.

Однако распределение электронов по орбиталям многоэлектронного атома может быть достаточно хорошо описано с условием, что эти орбитали подобны орбиталям водорода. При этом распределение электронов атома по орбиталям подчиняется фундаментальным *принципам Паули*.

Принцип Паули

Суть принципа заключается в том, что в атоме не может быть двух или больше электронов с четырьмя одинаковыми квантовыми числами

$n, l, m_l, m_s.$

A large black left square bracket is on the left side of the slide. A large yellow right square bracket is on the right side. A thin yellow horizontal line spans the width of the slide, positioned between the two brackets.

В соответствии с еще одним принципом – ***принципом наименьшей энергии***- электрон, что присоединился к атому, занимает в нем свободный уровень с наименьшей энергией.

Оба указанных фундаментальных условия формируют принцип строения электронных конфигураций атомов и молекул, т.е. распределение электронов по орбиталям.

Шар	Количество электронов	Подуровень	Количество электронов
<i>K</i>	2	<i>S</i>	2
<i>L</i>	8	<i>P</i>	6
<i>M</i>	18	<i>D</i>	10

*Количество электронов на.
разных подуровнях и шарах атомов*

9.2 Выделение и поглощение энергии атомами и молекулами

9.2.1 Атомные спектры

Оптические атомные спектры – спектры излучения и поглощения свободных или слабо взаимодействующих атомов обусловленных переходами между энергетическими уровнями внешних (валентных) электронов.

В результате решения уравнения Шредингера были получены возможные значения энергии атома водорода:

$$E_n = -\frac{1}{(4\pi\epsilon_0)} \cdot \frac{me^4}{2n^2\hbar^2} = -\frac{Rh}{n^2}$$

Предоставление атому энергии в следствие влияния внешней среды, обуславливает его переход к возбужденному состоянию, что соответствует переходу электрона из основного на более высокий энергетический уровень. Через отрезок времени $\approx 10^{-8}$ с. атом возвращается в основное энергетическое состояние, излучая такие частоты:

$$\nu = \frac{(E_{nk} - E_{nl})}{h} = R \left(\frac{1}{n^2 i} - \frac{1}{n^2 k} \right)$$

Эта формула дает возможность вычислить набор частот, которые отвечают спектральным линиям.

Спектральная серия

Спектральная серия – отдельные группы линий, которые являются составными спектра излучения атома водорода.

Каждой серии отвечает набор частот, которые излучаются атомами при переходе электрона на определенный энергетический уровень:

- 1) Серия Лаймана
- 2) Серия Бальмена
- 3) Серия Пашена

Следует отметить, что в каждой серии расстояние между линиями уменьшается при переходе до более коротких волн.

1) Серия Лаймана

При переходе электрона на основной энергетический уровень ($n_i=1$) из всех других уровней излучается **серия Лаймана**, которая лежит в **ультрафиолетовой** области.

Частоты, соответствующие определенным спектральным линиям этой серии, легко получить из обобщенной формулы, при условии, что $n_i=1$;

$n_k=2, 3, 4, \dots$:

$$\nu_{\ddot{e}} = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2 k} \right)$$

2) *Серия Бальмэра*

При переходе электрона на основной энергетический уровень с главным квантовым числом $n_i = 2$ с более высоко размещенных уровней излучается **серия Бальмэра**, которая лежит в видимой и ближней **ультрафиолетовой** областях:

$$\nu_{\dot{A}} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2 k} \right)$$



3) *Серия Пашена*

При переходе возбужденного электрона на уровень, который характеризуется главным квантовым числом $n_i=3$, из всех вышерасположенных уровней излучается **серия Пашена**, которая лежит в **инфракрасной** области:

$$\nu_{ij} = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

9.2.2 Молекулярные спектры

В отличие от энергии атомов, энергия молекулы определяется не только энергетическим состоянием электронной оболочки, но и колебательной энергией ядер атомов, которые входят в состав молекулы, а также энергий вращения ядер вокруг общего центра масс. Таким образом энергия молекулы может быть подана в таком виде:

$$E = E_{\hat{a}\ddot{e}} + E_{\hat{e}\hat{i}\ddot{e}} + E_{\hat{i}\hat{a}}$$

Каждый из этих видов энергии подчиняется квантовым законам, т.е. может принимать строго обозначенные значения.

Молекулярные спектры занимают широкий диапазон электромагнитного излучения.

- В случае: $\Delta A_{\hat{a}\hat{e}\hat{e}} = 0$; $\Delta A_{\hat{e}\hat{i}\hat{e}} = 0$; $\Delta A_{\hat{i}\hat{a}} \neq 0$ – наблюдаются переходы между вращающимися подуровнями в диапазоне одного колебательного уровня. Излучающиеся частоты создают **вращающийся спектр**.
- При : $\Delta A_{\hat{a}\hat{e}\hat{e}} = 0$; $\Delta A_{\hat{e}\hat{i}\hat{e}} \neq 0$; $\Delta A_{\hat{i}\hat{a}} \neq 0$ – возникает **колебательно-вращающийся спектр**, размещенный в ближней инфракрасной области.
- При: $\Delta A_{\hat{a}\hat{e}\hat{e}} \neq 0$; $\Delta A_{\hat{e}\hat{i}\hat{e}} \neq 0$; $\Delta A_{\hat{i}\hat{a}} \neq 0$ – возникает **электронно-колебательно-вращающийся спектр**, который лежит в видимой и ультрафиолетовой областях.

Применение спектров:

Спектры поглощения (абсорбции) и излучения (эмиссии) данного сорта молекул дают возможность использовать их для проведения качественного и количественного анализов, а также для идентификации веществ.

Особенно важным источником информации о строении органических молекул и характере межмолекулярных взаимодействий является абсорбционные колебательные и электронные спектры.

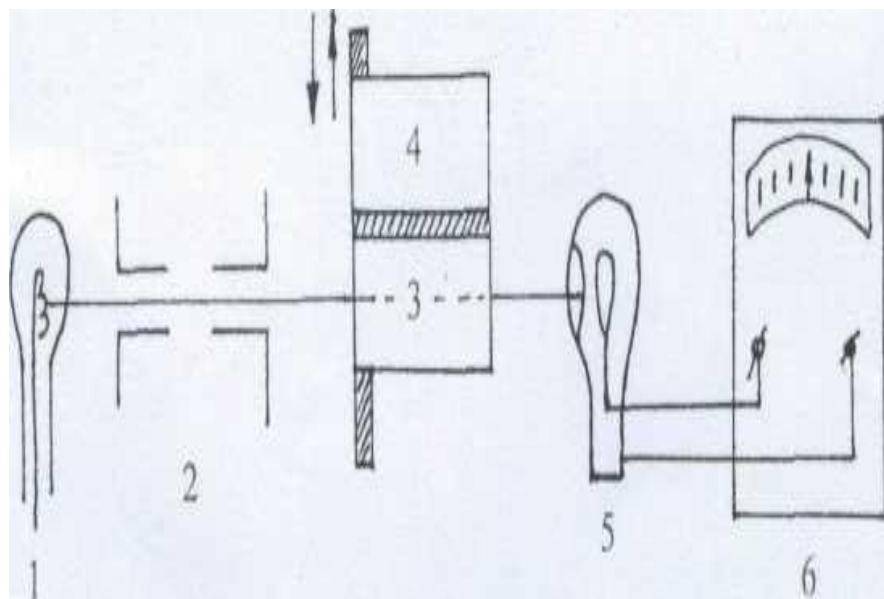
Идентификация веществ с помощью спектрофотометров

Для идентификации веществ, определения их концентрации, структурных параметров макромолекул и их окружения измеряется степень поглощения света. Поглощение света проявляется в ослаблении светового потока, который прошел через исследованное вещество.


Эти закономерности отображены в законе Бугера-Ламберта Бера:

$$D = \lg\left(\frac{l_0}{l}\right) = \epsilon_1 CL$$

Схема спектрофотометра



Свет от источника излучения (1) проходит через монохроматор (2) для выделения составляющей с определенной длиной волны. Раствор исследуемого вещества и чистый растворитель находятся в двух кюветах (3) и (4), размещенных в специальных держакках. Свет проходит через кювету и падает на фотоэлемент (5), исходящий сигнал которого регистрируется измерительным прибором (6).



Принцип работы спектрофотометра



Принцип работы спектрофотометра заключается в измерении интенсивностей света, который прошел через растворитель, а также через раствор вещества в том же самом растворителе. Разница этих интенсивностей дает возможность сделать вывод о степени поглощения света.



9.3 Люминесценция

- Согласно закону Кирхгофа тепловое излучение любого тела в любой области спектра всегда меньше за тепловое излучение абсолютно черного тела в той же области спектра и при той самой температуре.
- Люминесценция – оптическое измерение тела, которое есть избыточным над тепловым излучением того самого тела в данной спекторний области при той же температуре и имеет продолжительность свечения большую за 10^{-10} .



9.3.1 Виды люминесценции

Начальным актом люминесценции являются возбуждения атома или молекулы. В зависимости от способа возбуждения различают такие виды люминесценции:

- Электролюминесценция (свечение газов при электрическом разряде).
- Катодолюминесценция (свечение, возбужденное ударами электронов).
- Хемолюминесценция (свечение, которое сопровождает экзотермические химические реакции).
- Радиолюминесценция (свечение под действием ядерного излучения).
- Биолюминесценция (свечение биообъектов).
- Фотолюминесценция (свечение под действием оптического излучения видимой или ультрафиолетовой областей).

9.3.2 Фотолюминесценция. Закон Стокса.

Фотолюминесценцию редких и твердых тел можно наблюдать при освещении их светом в видимом или Ультрафиолетовом диапазонах.

Регистрацию люминесцентного излучения осуществляют с помощью спектрофлуориметра.

Интенсивность люминесценции зависит от интенсивности возбуждающий света, способности вещества поглощать свет, концентрации вещества и квантового выхода люминесценции.



Интенсивность люминесценции зависит от интенсивности возбуждающий света, способности вещества поглощать свет, концентрации вещества и квантового выхода люминесценции.

Главные параметры люминесценции:

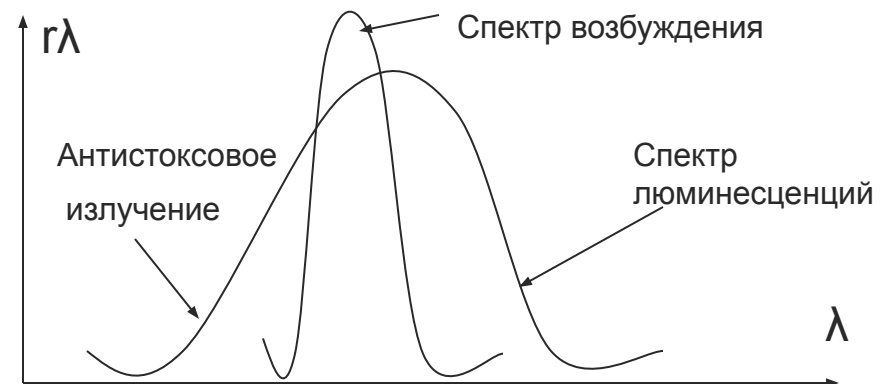
- спектр люминесценции;
- квантовый выход;
- поляризация люминесценции;
- время жизни молекулы в возбужденном состоянии.

Закон Стокса

- Спектр люминесценции сдвинут в сторону длинных волн относительно спектра возбуждающего излучения.



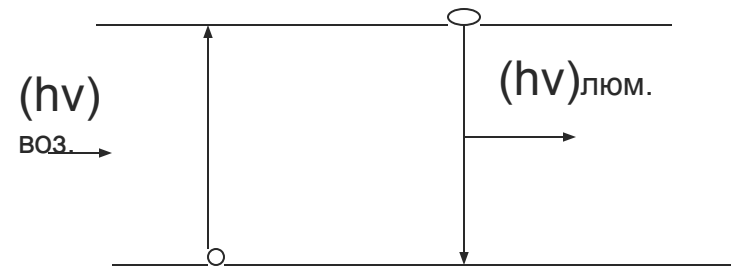
- Отклонение от закона Стокса особенно удобно наблюдать во время возбуждения фотолюминесценции монохроматическим светом (узкой спектральной полосой).



9.3.3 Механизмы люминесценции

1. Механизм резонансной флуоресценции:

Атом, который поглощает квант возбуждающего излучения, переходит из основного на высший энергетический уровень. Через промежуток времени атом поворачивается единым излучаемым актом в основное энергетическое состояние.



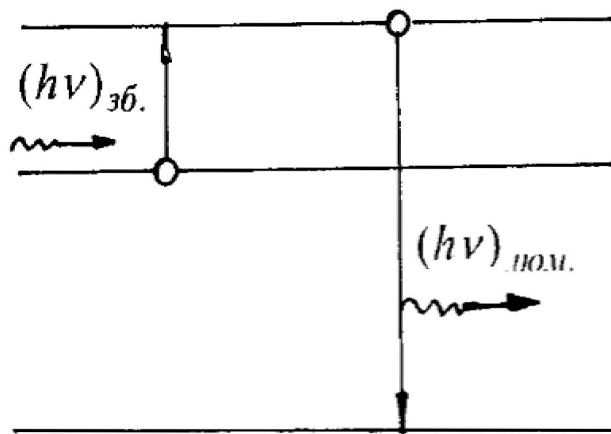
[

2. Возвращение атома или молекулы из возбужденного состояния в основное может происходить:

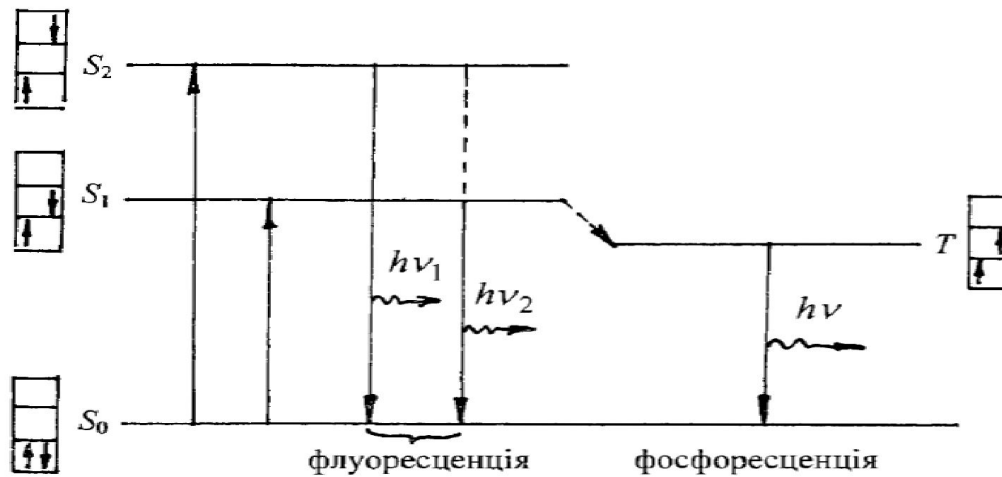
- в результате дежурство лучеиспускательных и без лучеиспускательных переходов;
- ступенчатого, в результате переходов между промежуточными энергетическими уровнями.

3. Квант возбуждающего излучения поглощается атомами или молекулами, которые находятся в возбужденном состоянии.

При переходе их в основное состояние излучается фотон с большей энергией сравнимые с поглощенным. Именно так возникает антитоксическое излучение.



4. Переход атома или молекулы из возбужденного состояния в основное может осуществляться через промежуточное, так называемое **метастабильное состояние**, переход из которого в основное состояние есть маловероятным в силу действия правил запрета.






Переход молекулы из триплетного (метастабильного) в основное состояние может осуществиться как в результате **безлучеиспускательного** так и **лучеиспускательного** переходов. Излучения, которое сопровождает переход называется **фосфоресценцией**.

Фосфоресценция

Фосфоресценция
отличается от
флуоресценции
продолжительностью
послесвечения.

Лучеиспускательный переход

Вероятность лучеиспускательного перехода атома или молекулы из метастабильного энергетического уровня на основной увеличивается во время действия на них внешнего фотона, который имеет энергию, которая равняется энергии фотона, который излучается самопроизвольно. Такой лучеиспускательный переход под действием внешнего излучения называется принудительным или индуцированным.



Особенности люминесцентного излучения:

- Люминесцентное излучение длится некоторое время после устранения причины, которая его вызывает;
- Каждое вещество имеет определенный, характерный именно для нее спектр люминесценции.

9.4 Индуктивное излучение

Индуктивное излучение впервые теоретически было доказано А. Эйнштейном. Существует два вида излучения:

- 1) спонтанное
- 2) принудительное

В отличие от спонтанных переходов, которые осуществляются из более высоких уровней на более низкие, принудительные переходы могут с равным успехом происходить как в одном направлении, так и в другом.



В 1940 В.А.Фабрикант предложил использовать опыт Эйнштейна для усиления электромагнитных волн.



Принудительное излучение имеет довольно ценные свойства, так как распространение его совпадает с внешним излучением, и их фазы и частоты тоже совпадают. Таким образом, индуктивное излучение тождественное внешнему во всех отношениях.

В 1940 В.А.Фабрикант предложил использовать опыт Эйнштейна для усиления электромагнитных волн.


9.4.1 Равновесная и инверсная заселенность

Распределение Больцмана.

$$N_i = C e^{-\frac{E_i}{kT}}$$

Основная суть закона заключается в том что, с увеличением энергии, заселенность уровня уменьшается. Это и есть так называемая равновесная заселенность энергетических уровней. В этом случае фотон с энергией с равными вероятностями будет индуцировать переходы.

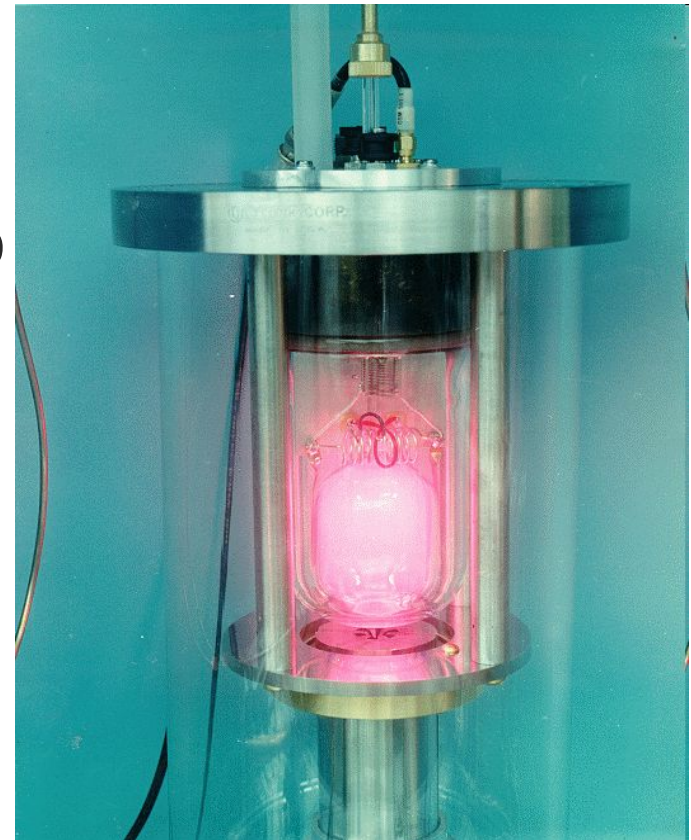
Отсюда переходы между уровнями пропорциональные заселенности исходного уровня. Заселение энергетических уровней называется инверсией.

A large black left square bracket is on the left, and a large yellow right square bracket is on the right. A horizontal line with a light green gradient runs across the page, starting from the left bracket and ending at the right bracket.

В веществе с инверсией принудительное излучение будет превышать поглощение, вследствие чего внешнее излучение при прохождении через вещество будет усиливаться.

Идея В.А. Фабрикова была практически осуществлена в 1954 году, физиками Н.Г. Басовым и А.М. Прохоровым и независимо Таунсом.

Ими был впервые создан **мазер** – генератор радиоволн в микроволновом диапазоне.





В 1960 году Меиманом было создано аналогичное устройство - **лазер**, оптический квантовый генератор

Лазер - устройство, преобразующее энергию накачки (световую, электрическую, тепловую, химическую и др.) в энергию когерентного, монохроматического, поляризованного и узконаправленного потока излучения.



9.4.2 Строение и принцип работы лазера

Основой лазера есть вещество, которое имеет метастабильные уровни. Работа лазера начинается из использования внешнего источника энергии для создания инверсной заселенности энергетических уровней. Этот процесс называется - **подкачкой**.

Рабочим телом этого лазера является кристалл искусственного рубина. При поглощении света, ионы переходят в возбужденное состояние, возвращение их в основное состояние возможно двумя способами:

- 1) Ионный
- 2) Фотонный



- 1) Отдавая часть энергии кристаллической решетке рубина, возбужденные ионы хрома без излучения переходят на промежуточный уровень, который является метастабильным. Благодаря малой возможности перехода из метастабильного уровня на основной и при достаточной мощности «подкачки» создается инверсная заселенность основного метастабильного уровней.

[

2) Фотон - это квант поля электромагнитного излучения.

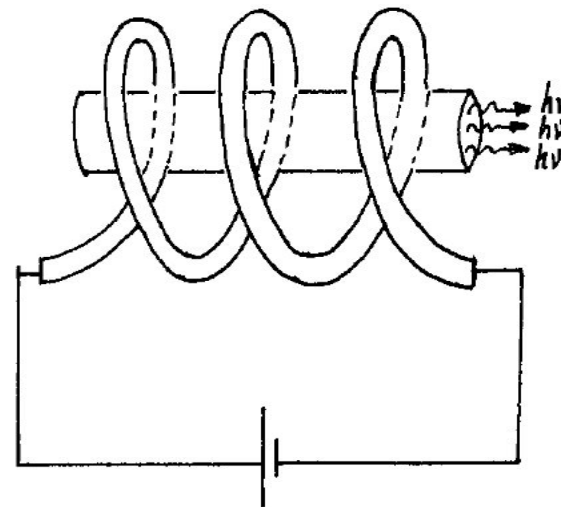
Этот способ заключается в том, что при спонтанном переходе, фотон вызывает возрастающий поток фотонов в результате индуцированных лучеиспускательных переходов возбужденных ионов между уровнями.

]

Применения лазера в медицине

Существует четыре основные
принципа применения лазера в медицине:

- ❖ Бескровная хирургия
- ❖ Офтальмология
- ❖ Микрохирургия
- ❖ Гастроскопия



Бескровная хирургия

Вскрывая ткань, лазерный луч вызывает коагуляцию белка, предотвращая капиллярному кровотечению.

Офтальмология

Используется для приваривания отслоенной сетчатки и для лечения глаукомы.


Микрохирургия

Использование лазера дает возможность выборочно разрушать клеточные организмы.



Гастроскопия

С помощью лазера и волоконной оптики создан гастроскоп - прибор, который дает возможность формировать объемное воспроизведение внутренней пустоты желудка



9.5 Электронный парамагнитный резонанс, ядерный магнитный резонанс и их медико-биологическое применение

Сейчас рядом с традиционными методами оптической спектроскопии, в биологии и медицине стали широко использоваться методы магнитной спектроскопии, которые дают возможность получить ценную информацию про строение органичных молекул, природу межмолекулярных взаимодействий, характер молекулярных движений. В основе этих методов лежит один и тот же принцип – поглощение энергии системой парамагнитных частиц.

9.5.1 Метод электронного парамагнитного резонанса

Явление электронного парамагнитного резонанса было открыто советским физиком Э. К. Завойським в 1944 году. Парамагнетизм частичек с неспаренным электроном, как правило имеет спиновый характер, т.е. обусловленный наличием нескомпенсированного спинового магнитного момента электрона, который можно записать:

$$P_{ms} = g\mu_A S$$

где S -спиновое число,

g - так называемый "жи- фактор",

μ - магнетон Бора.

При отсутствии магнитного поля систему таких парамагнитных частиц можно охарактеризовать некоторой средней энергией – E_0 , записывается:

$$\dot{A} = \dot{A}_0 + \Delta \dot{A}$$

Протекция спинового момента:

$$P_{ms} = g\mu_{\dot{A}}S$$

Равенство приобретает такой вид:

$$h\nu = E_2 - E_1 = g\mu_{\dot{A}}B$$

Отсюда: $\dot{A}_0 = \dot{A}_1 = \dot{A}_2$ итак можно определить что:

$$\dot{A} = \dot{A}_0 + g\mu_{\dot{A}}m_sB$$

[

Условие резонанса можно осуществить двумя способами:

- а) При постоянном магнитном поле ($B = \text{const}$) варьируется частота ν .
- б) При неизменной частоте ($\nu = \text{const}$) варьируется индукция магнитного поля B .

Для получения информации об исследуемой системе рассматриваются такие параметры спектра ЭПР:

- 1) Интегральная интенсивность сигнала
- 2) Положение линии поглощения в спектре
- 3) Ширина линии и ее форма
- 4) Сверхтонкая структура сигнала ЭПР

1) Интегральная интенсивность сигнала

Интегральной интенсивностью сигнала называют площадь под кривой поглощения. Она является мерой количества неспаренных электронов, которые находятся в изучаемом образце.

2) Положение линии поглощения

Положение линии поглощения в спектре ЭПР определяется согласно со значение g -фактора

$$g = \frac{h\nu}{\mu_A B}$$

3) *Ширина линии и ее форма*

Ширина линии и ее форма дает возможность оценить подвижность парамагнитной частицы в исследуемом образце, а также характер и степень ее взаимодействия с окружающей средой.

4) Сверхтонкая структура сигнала ЭПР

Сверхтонкой структурой называют расщепление сигнала ЭПР на несколько компонентов вследствие взаимодействия магнитного момента неспаренного электрона с магнитным моментом ядер, которые содержит парамагнитная частица. Среди ядер, которые входят в состав органических молекулах, ядерные магнитные моменты имеют протоны и ядро азота.



Используя метод ЭПР, биологи и медики, могут решить такие основные задачи:

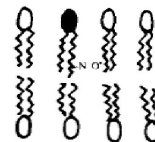
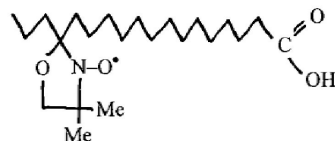
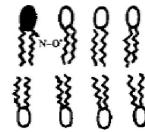
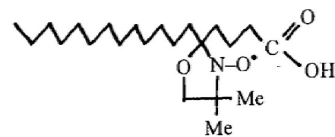
- 1) Идентифицировать промежуточные вещества свободно-радикальной природы в разных метаболических реакциях.
- 2) Идентифицировать свободные радикалы, которые возникают в биологических тканях под действием проникающей радиации.
- 3) Исследовать обменные процессы в раковых клетках и тканях, которые находятся под действие гипоксии.
- 4) Исследовать структуру и функции биологических мембран с помощью метода спиновых меток.

9.5.2 Метод спиновых меток (спиновых зондов)

Для изучения структуры и функций биологических мембран с успехом применяют **метод спиновых меток**. Используют так:

В роли спиновых зондов спин - меченные аналоги стеариновых кислот и вводят их в оболочки эритроцитов.

Вводят также в биологические мембраны спин - меченных жирных кислот или синтезированных на их основе фосфолипидов, было выявлено изменение структуры мембраны.



Методом ЕПГ было впервые экспериментально доказано существование фосфолипидного переворота



9.5.3 Спин-иммунологический метод

Первейшим клиническим применением метода спиновых меток был спин – иммунологический метод (СИМ).

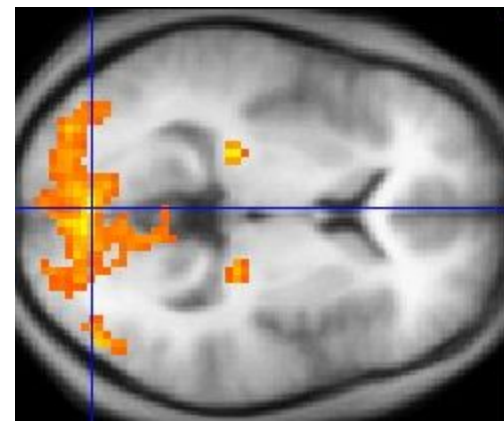
СИМ состоит из трех этапов:

- 1) Синтез спин - меченной модели данного биологически - активного соединения
- 2) Получение специфических антител против данного вещества
- 3) Определение с помощью комплекса спин - меченного соединения с антителом содержащего искомого биологически активного вещества в биологических жидкостях

9.5.4 Метод ядерного магнитного резонанса

Ядерный магнитный резонанс (ЯМР) был открыт в 1946 году Ф.Блохом и Э.Парселлом.

Одни и те же ядра атомов в различных окружениях в молекуле показывают различные сигналы ЯМР. Отличие такого сигнала ЯМР от сигнала стандартного вещества позволяет определить так называемый химический сдвиг, который обусловлен химическим строением изучаемого вещества. В методиках ЯМР есть много возможностей определять химическое строение веществ, конформации молекул, эффекты взаимного влияния, внутримолекулярные превращения.



[

Во внешнем магнитном поле система протонов распадается на две подсистемы соответственно к двум возможным ориентациям магнитных моментов ядер относительно внешнего поля.

Условие резонансного поглощения энергии системой протонов имеет такой вид:

$$h\nu = g_i \mu_y B$$

В реальной ситуации условие ядерного резонанса поглощения имеет такой вид:

$$h\nu = g_{\check{y}}\mu_{\check{y}}(B + B_{\hat{e}\hat{e}})$$

Одной из основных причин возникновения таких полей является эффект диамагнитного экранирования: внешнее магнитное поле индуцирует электрический ток в молекуле, который вызывает возникновение магнитных полей, направленных за **правилом Ленца** противоположно внешнему магнитному полю,

то есть:

$$\hat{A}_{\text{ind}} = -\sigma \hat{A}$$

Таким образом, каждый протон находится в некотором эффективном поле, которое характеризуется индукцией:

$$\hat{A}_{\text{eff}} = \hat{A} - \sigma\hat{A} = \hat{A}(1 - \sigma)$$

Параметра спектра ПМР

Для получения информации об исследуемых молекулах используют четыре :

- Интегральная интенсивность линии.
- Положение линии, или химический сдвиг.
- Ширина полосы.
- Спин - спиновое расщепление

Интегральная интенсивность линии

Определяется площадью под кривой поглощения и пропорциональная количеству протонов, которые находятся в данном химическом окружении.

Положение линии

Определяется смещением линии поглощения протонов относительно линии поглощения протонов эталонного соединения- **тетраметилсилану**

Миллионные частицы – безразмерные единицы, в которых измеряется величина химического сдвига:

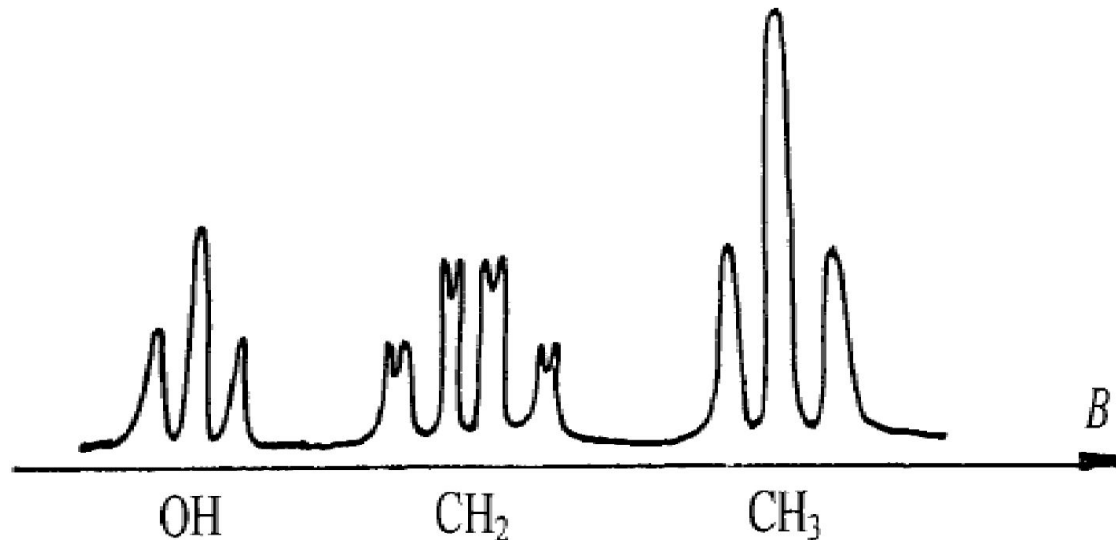
$$\delta = \frac{\Delta \hat{A}}{\hat{A}} \cdot 10^6 (i \text{ .} \div \text{.})$$

Ширина полосы

Определяет, как и в методе ЭПР, характер молекулярного движения.

Спин - спиновое расщепление

Возникает в следствие возмущения системы ядерных спинов, для которых возникает линия поглощения, другой спиной системой.



9.6. Практикум квантовой механики

9.6.1 Практическое занятие “Основные представления квантовой механики”

- ❖ Волновые свойства частиц. Формула де Бройля.
- ❖ Электронный микроскоп, его граница различения.
- ❖ Соотношение неопределенностей Гейзенберга.

Волновые свойства частиц. Формула де Бройля.

Задача 1

Сравнить длины волн де Бройля для электрона и шарика с массой $m = 1$ г, если они имеют одинаковые скорости, что равны $u = 100$ м/с. Как определить экспериментально длину волны де Бройля для шарика и электрона, что двигаются?

Эталон решения

Согласно гипотезе де Бройля любые частицы или предметы, что двигаются, обладают волновыми свойствами. Они могут быть охарактеризованы длиной волны, которая связана со скоростью движения формулой:

$$\lambda = \frac{h}{mU}$$

Вычислим длину волны де Бройля для шарика:

$$\lambda_e = \frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{1 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-2}} = 6,62 \cdot 10^{-33}$$

Вычислим длину волны де Бройля для электрона:

$$\lambda_a = \frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 10^2} = 7,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

Ответ: $\lambda_e = 6,62 \cdot 10^{-33}$ $\lambda_a = 7,3 \cdot 10^{-6}$

Замечание:

Для шарика, который двигается, длина волны настолько мала, что не может быть измерена никакими экспериментальными методами, тогда как для электрона измерение λ можно осуществить по дифракционной картине, что получается на пространственных структурах- кристаллических решетках.

Электронный микроскоп, его разрешающая способность

Задача 2

Найти разрешающую способность электронного микроскопа, если ускоряющее напряжение $\Delta\varphi = 100$ кВ, а угловая апертура $Q = 10^{-2}$ рад.

Эталон решения

Разрешающая способность микроскопа определяется длиной волны λ излучения, которое используется, числовой апертурой $A = n \sin Q$ и может быть вычислена по формуле:

$$Z = \frac{0,5\lambda}{n \sin Q}$$

"Освещение" объекта в электронном микроскопе осуществляют электронным пучком. Длина волны, что характеризует электроны пучка, определяется скоростью их движения.

$$\lambda = \frac{h}{mU}$$

Ответ: $Z = 0.094 \text{ нм}$

Соотношение неопределенностей Гейзенберга

Задача 3

Пучок электронов движется вдоль электронно-лучевой трубки со скоростью $v=10^8$ см/с. Скорость определена с точностью до **0,01 %**. Имеет ли смысл понятие траектории движения электронов в трубке?

Эталон решения

Соотношение Гейзенберга дает возможность установить точность в определении координаты электрона:

$$\Delta x \geq \frac{h}{m \Delta v_x}$$

За условием задачи $\Delta v_x = 10^{-4} v = 10^2 \frac{\hbar k}{m} / \hbar$

Отсюда имеем: $\Delta x \geq \frac{1,05 \cdot 10^{-34}}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 10^2} = 10^{-6} \hbar k = 10^{-4} \hbar k$

Ответ: Полученное значение $\Delta x = 10^{-4} \hbar k$ свидетельствует о том, что

координата электрона может быть определена с достаточно высокой степенью точности. Таким образом, понятие траектории движения электронов в трубке имеет смысл.

9.6.2 Лабораторная работа “Применение фотоэлемента для измерения освещенности и определение его чувствительности”

Цель работы:

- **Ознакомиться** с принципом действия вентильного фотоэлемента.
- **Определить** интегральную чувствительность фотоэлемента.
- **Научиться** использовать фотоэлемент для измерения освещенности

Приборы и оборудование

Лабораторная установка, что вмещает:

Селеновый
фотоэлемент

Лампу накаливания


Микроамперметр


Краткие теоретические сведения

Вентильный фотоэлемент составляет основу люксметра – прибора для измерения освещенности.

Принцип его действия. Как известно, в месте контакта полупроводников ***p*- и *n*-типов** возникает область ***p* - *n*** перехода толщиной **0.1 мкм**. Для этой области характерными есть малая концентрация носителей заряда и наличие контактной разности потенциалов.

При освещении ***p* – *n*** перехода и прилегающих к нему областей в полупроводниках происходит явление **внутреннего фотоэффекта**, то есть возникают пары дырка-электрон.


- 
- A large black left square bracket and a large yellow right square bracket are positioned at the top of the slide, with a thin yellow horizontal line extending between them across the width of the page.
- 1) Если рождение такой пары происходит рядом с областью $p - n$ перехода, то и электрон, и дырка могут избежать рекомбинации на пути к $p-n$ переходу..

A decorative graphic at the top of the slide consists of a horizontal line with a light green-to-white gradient. On the left side, there is a large black left square bracket. On the right side, there is a large yellow right square bracket.

2) Под действием электрического поля *p-n* перехода заряды, что возникли, разделяются.

4) Таким образом, разделение зарядов, что возникли, происходит вследствие односторонней проводимости *p-n* перехода для неосновных носителей.

5) В результате разделения зарядов между полупроводниками *p* - и *n* типов возникает электродвижущая сила, ее величина достигает 0.1-15 В и определяется количеством электронно-дырковых пар, что возникли в результате внутреннего фотоэффекта.

A decorative graphic consisting of a thick horizontal line in a light olive green color. On the left side, there is a large black left square bracket. On the right side, there is a large yellow right square bracket.

6) Количество этих пар, в свою очередь, пропорционально количеству фотонов, что падают на фотоэлемент, то есть освещенности фотоэлемента.

Схема селенового фотоэлемента из
запирающим шаром

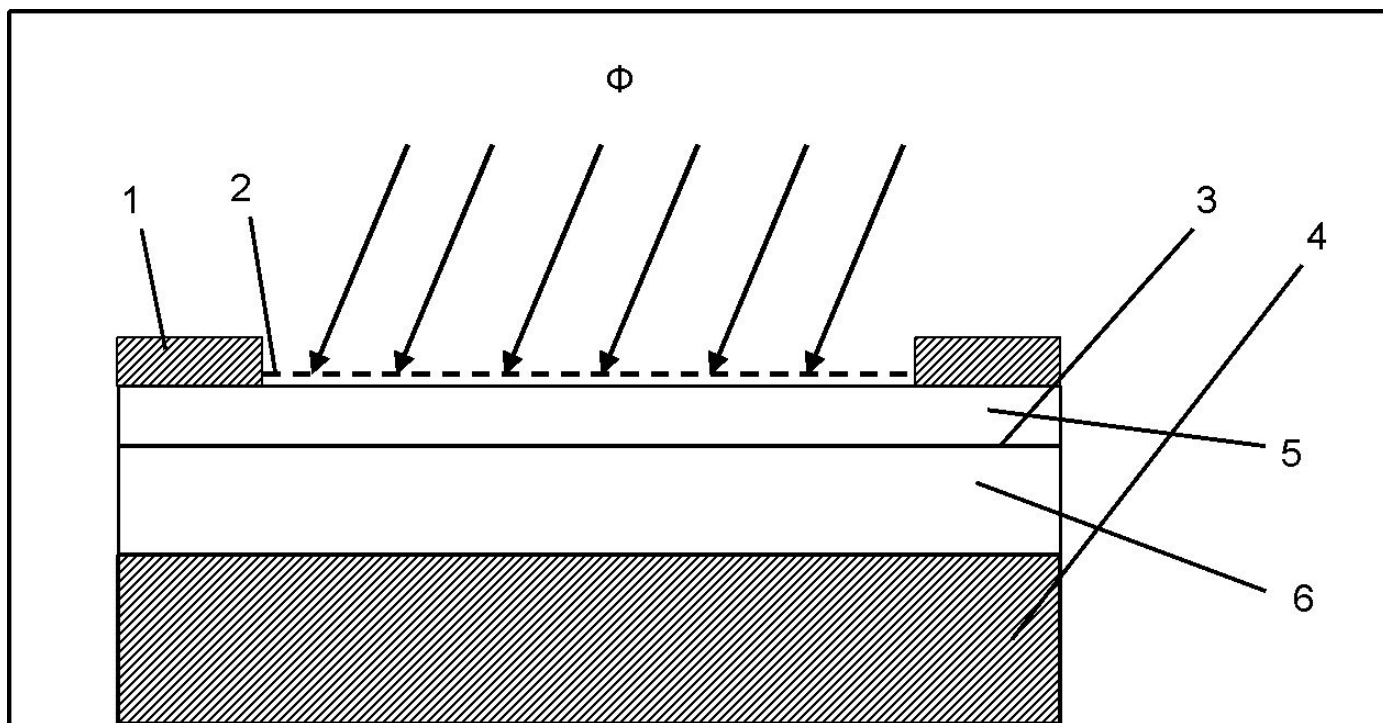



Схема селенового фотоэлемента из
запирающим шаром

Вентильные фотоэлементы

Вентильные фотоэлементы изготавливают на основе селена, германия, кремния, серчатого серебра. В этой лабораторной работе мы имеем дело из селеновым фотоэлементом

- ❖ На полированную железную пластинку, которая есть одним из электродов фотоэлемента, **наносят шар селена** из проводимостью **p-типа** (основные носители - дырки).
- ❖ Сверху на **шар селена напыляют** тонкий, прозрачный для световых лучей **шар серебра**, который исполняет роль другого электрода.
- ❖ За счет диффузии атомов серебра в **шар селена** последний приобретает проводимость **n-типа** (основные носители - электроны).

- ❖ Между чистым селеном и селеном с примесями серебра возникает область *p-n* перехода. Свет легко проходит сквозь прозрачную пленку и вызывает явление **внутреннего фотоэффекта** в шаре селена (в основном в шаре селена n-типа).
- ❖ В результате разделения зарядов – электронов и дырок – электрическим полем *p-n* перехода возникает **электродвижущая сила**, при этом железная пластинка имеет положительный заряд.

- 
- ❖ Если пленку серебра соединить с железной пластинкой проводником, подключив в цепь гальванометр, то последний покажет присутствие электрического тока, что течет во внешней цепи от железа **Fe (+)** к верхнему электроду **M (-)**.

Таким образом:

- 1) **Вентильный фотоэлемент** ведет себя при освещении как генератор ЭДС, при чем величина фототока i_{ϕ} является пропорциональной к **величине светового потока Φ** , который падает на активную поверхность фотоэлемента:

$$i_{\phi} = K_{\phi} \cdot \Phi$$

2) Коэффициент пропорциональности называется **интегральной чувствительностью**. Он численно равен силе тока в цепи фотоэлемента, который возникает при **условии освещения** активной поверхности световым потоком в **1 люмен**:

$$k = \frac{i_{\phi}}{\Phi} = \frac{i_{\phi} A}{\Phi}$$

3) Чувствительность **селеновых фотоэлементов** очень значительна и может достигать *500 мкА/лм.*

4) Если активная поверхность фотоэлемента освещается потоком света Φ , то:

$$\hat{O} = \hat{A}S$$

где: Φ - освещенность поверхности фотоэлемента. Итак, имеем

$$i\hat{o} = \hat{e}\hat{O} = \hat{e}\hat{A}S$$

5) Поскольку **интегральная чувствительность фотоэлемента K** и его активная поверхность S - величины постоянные, то величина фототока i_{ϕ} является пропорциональной к освещенности **E** .

Освещенность фотоэлемента

Освещенность фотоэлемента в случае **Точечного источника света** (когда расстояние между лампой и фотоэлементом значительно больше, чем размеры нитки накаливания лампы) рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{I}{R^2}$$

Задание 1

Сделать градуирование вентиляного фотоэлемента

- Ознакомиться с лабораторной установкой для градуирования фотоэлемента
- Подключить источник света к источнику тока.
- Для 5-6 расстояний R между фотоэлементом и дисточником света определить силу фототока.

- [
-
- Для каждого из этих расстояний рассчитать освещенность E за формулой

$$E = \frac{I}{R^2} (\text{в } \hat{e}).$$

- Результаты внести в таблицу.
- За данными таблицы построить график

$$i\hat{o} = f(E)$$

]

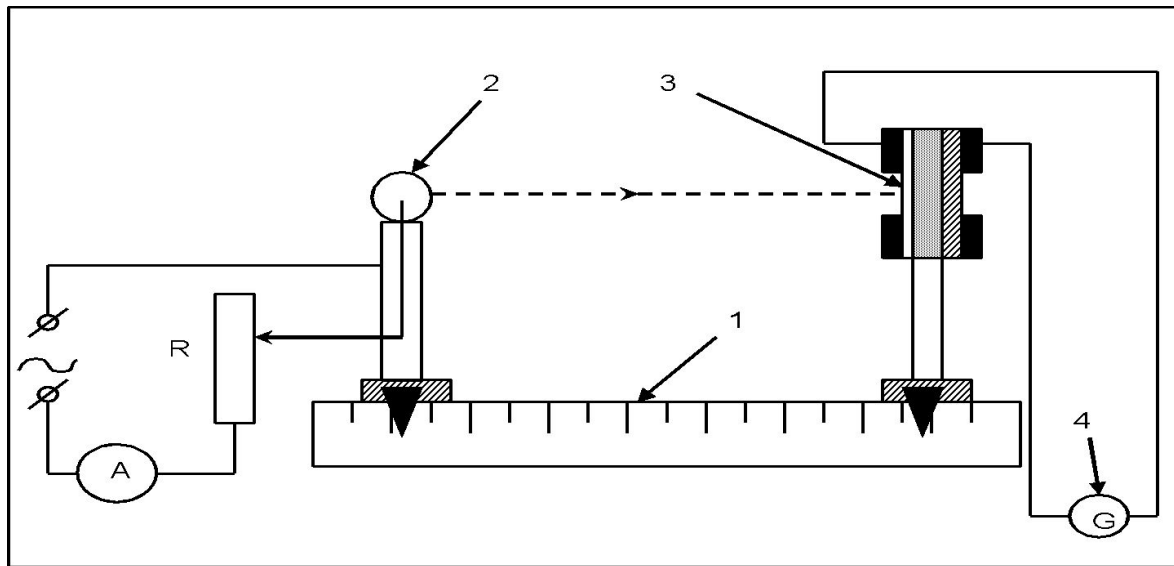


Рис. 9.37. Установка для градуирования фотоэлемента.

- 1) Результат внести в таблицу.
- 2) По данным таблицы построить график

$$i_{\hat{o}} = f(E)$$

- Полученный график может быть использован для измерения освещенности любой поверхности.
- Для этого достаточно разместить фотозэлемент на этой поверхности и определить $i_{\hat{O}}$
- Значение освещенности поверхности, что соответствует полученному значению $i_{\hat{O}}$ определяется с помощью графика $i_{\hat{O}} = f(E)$

Задание 2


Определить интегральную чувствительность фотоэлемента.

На участке графика, где наблюдается линейная зависимость между i_{ϕ} и освещенностью E (для очень больших расстояний R взять точку и определить для нее i_{ϕ} и E).

Вычислить площадь активной поверхности фотоэлемента *за такой формулой*:

$$S = \frac{\pi d^2}{4}$$

где d - диаметр поверхности фотоэлемента (указан на приборе).



Вычислить величину чувствительности
фотоэлемента по такой формуле:

$$k = \frac{i_{\delta}}{SE}$$

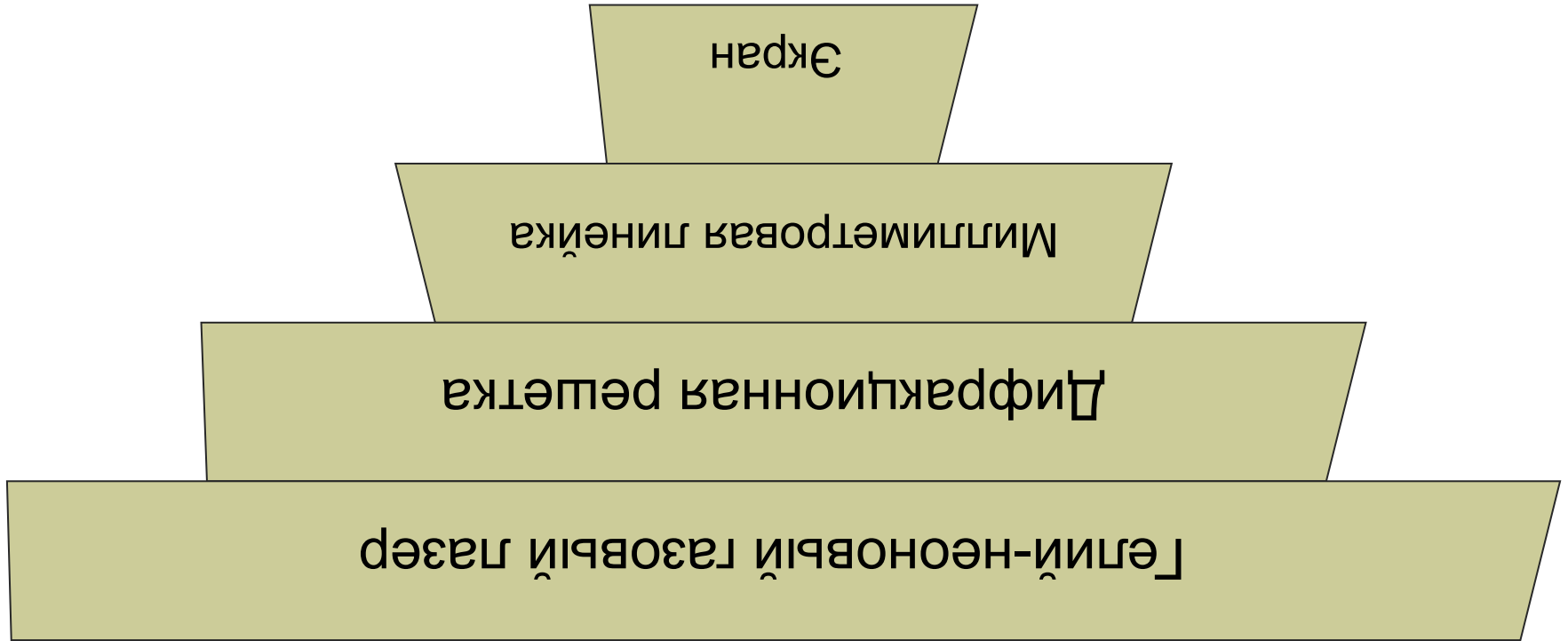
где значения i_{δ} , E и S получены в пп. 1, 2.

9.6.3 Лабораторная работа “Изучение работы оптического квантового генератора”.

Цель работы:

- Изучить строение и принцип действия газового лазера,
- Определить основные технические характеристики лазера – длину волны его излучения и энергию кванта.

Приборы и оборудование:



Рассмотрим строение и принцип действия газового гелий-неонового лазера

1) Прибор состоит из:

трубки , наполненной смесью газов:
гелия (под парциальным давлением 1 ммрт. ст.) и неона (под парциальное давление 0.1 мм).

2) Атомы неона являются излучающими (рабочими), атомы гелия - вспомогательными, которые необходимы для создания инверсной населенности энергетических уровней атомов неона.

3) Возбуждение атомов гелия достигают с помощью тлеющего электрического разряда. Для создания тлеющего разряда в трубку вмонтированы электроды, которые соединены с источником электрического тока.

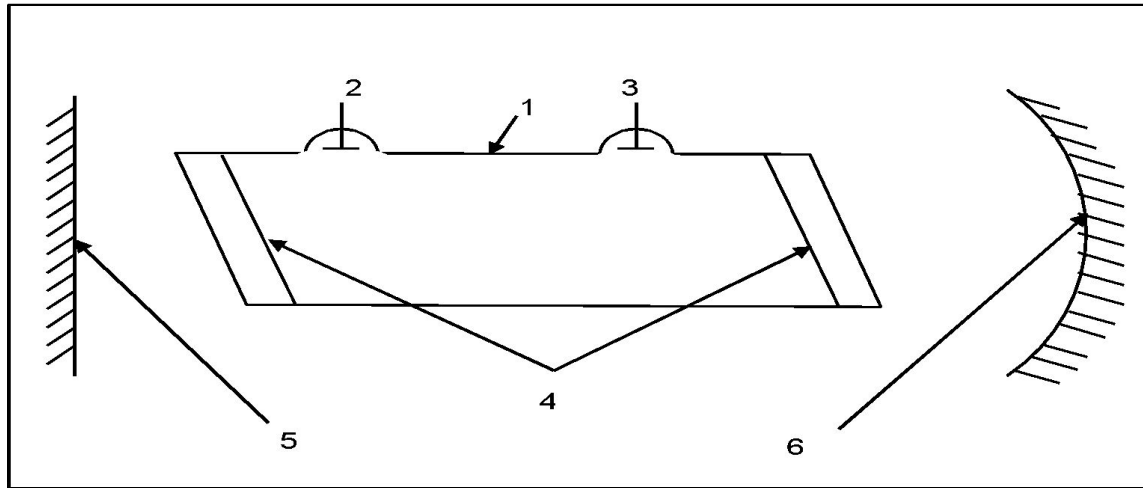




Рис. 9.38. Строение газового гелий-неонового лазера.


На рис. 9.38 изображена система энергетических уровней атомов гелия и неона.

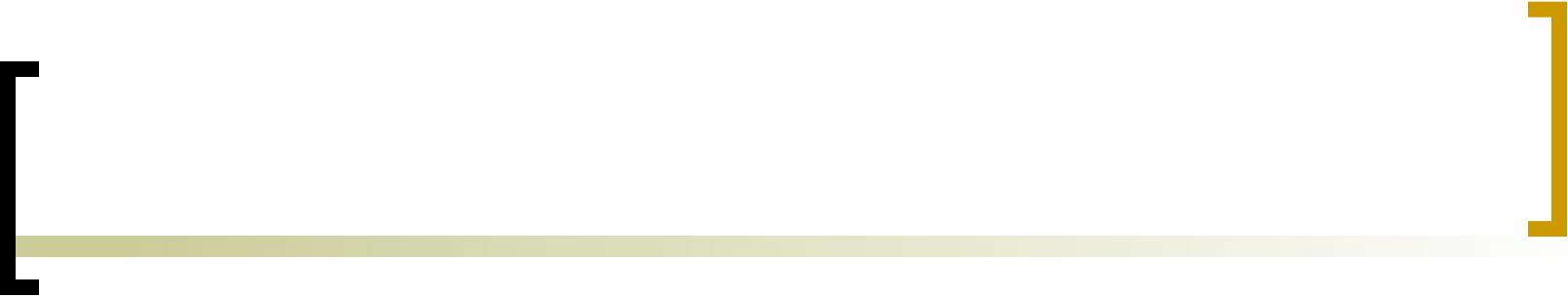
- Под воздействием **электрического разряда** атомы гелия переходят на **возбужденный уровень 2**.
- Вследствии неупругого столкновения **атомы гелия передают энергию атомам неона**, которые, возбуждаясь, накапливаются на двух близко размещенных **метастабильных уровнях 3**.
- **Таким образом**, в трубке создается среда с инверсной заселенностью **энергетических уровней**.

- [
- Спонтанный переход отдельных атомов *Ие* из двух метастабильных **уровней 3** на промежуточный **уровень 2** вызывает появление фотонов, которые вызывают индуцированное (принудительное) когерентное излучение с длинами волн $\lambda_1 = 632,8$ нм (красный диапазон) и $\lambda_2 = 1153$ нм (инфракрасный диапазон).
-]

- 
- A decorative graphic at the top of the slide consists of a horizontal line. On the left side, a large black left square bracket '[' is positioned above the line. On the right side, a large yellow right square bracket ']' is positioned above the line.
- Для увеличения мощности излучения трубку 1 размещают в зеркальном резонаторе (рис. 9.38).

- 
- A large black left square bracket and a large yellow right square bracket are positioned at the top of the slide, with a thin yellow horizontal line extending between them across the width of the page.
- Отражаясь от зеркал и проходя много раз вдоль всей трубки, поток фотонов привлекает к индуцированным переходам все большее количество атомов Ne, вследствие чего интенсивность излучения увеличивается.

- 
- A decorative graphic at the top of the slide consists of a horizontal line with a light green-to-white gradient. On the left side, a large black bracket '[' is positioned above the line. On the right side, a large yellow bracket ']' is positioned above the line.
- Трубка 1 с торцов закрыта плоскопараллельными пластинками 4, которые размещены под углом Брюстера к оси трубки.

- 
- A decorative graphic at the top of the slide consists of a thin horizontal line in a light olive green color. On the left side of this line, there is a large, thick black left square bracket '['. On the right side, there is a large, thick yellow right square bracket ']' that overlaps the end of the horizontal line.
- Такое положение пластинок приводит к плоской поляризации лазерного излучения.

Для определения длины волны излучения лазера в этой лабораторной работе предлагается использовать дифракционную решетку. Она представляет собой стеклянную пластинку, на которую через равные промежутки a нанесены параллельные непрозрачные штрихи шириной b . Величина $a + b = d$ называется периодом (или постоянной) дифракционной решетки. При освещении решетки монохроматическим светом происходит явление дифракции, вследствие которой на экране, размещенному за решеткой, наблюдается дифракционная картина.

При нормальном падении света на решетку главные дифракционные максимумы характеризуются условием

$$d \sin \theta = k \lambda$$

Если нам известны значения d , θ и k , то длину волны излучения, что проходит сквозь дифракционную решетку, определяют по такой формуле:

$$\lambda = d \sin \theta / k$$

Поскольку, как правило, углы дифракции fk есть малыми, можна считать, что

$$\sin fk = tg \cdot fk = \frac{I_k}{L}$$

Где:

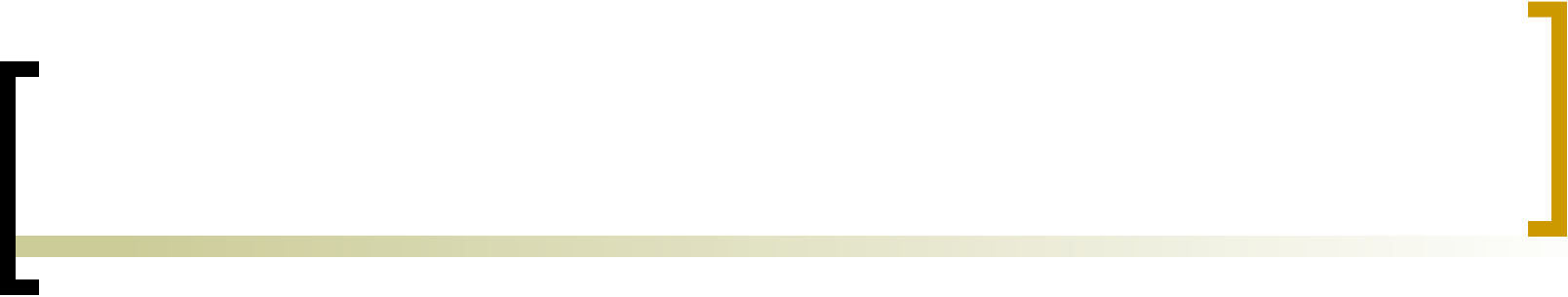
I_k - расстояние на экране между нулевого и k -того максимумами порядков;


L - расстояние между решеткой и экраном.

Задание I.

Определить длину волны излучения лазера.

- ❖ Перемещая экран, получить на нем четкое изображение дифракционной картины. При этом нужно добиться, чтобы на экране наблюдались максимумы не меньше трех порядков.


- 
- ❖ Измерить с помощью миллиметровой линейки расстояние l между решеткой и экраном.

- 
- ❖ Измерить расстояние b между максимумами нулевого (центральное пятно) и первого порядков.



- ❖ Определить значения tgf_1 для максимума первого порядка.
- ❖ Определить длину волны λ_1 излучения лазера по формуле

$$\lambda = d \sin \frac{fk}{k}$$

- 
- ❖ Сделать аналогичные измерения и расчеты для максимумов второго и третьего порядков.
 - ❖ Результаты измерений и расчетов внести в таблицу.

- [
-
- ❖ Вычислить среднее значение длины волны λ излучения лазера

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}{3}$$


Задание 2

Определить энергию кванта излучения по такой формуле:

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

Контрольные вопросы:

1. Назовите основные свойства индуктивного излучения?
2. Опишите строение и принцип действия гелий-неонового лазера?
3. Как образуется инверсная заселенность энергетических уровней атомов в гелий-неоновом лазере?

- 
- A large black left square bracket and a large yellow right square bracket are positioned at the top of the slide, with a thin yellow horizontal line extending between them across the width of the page.
4. Какое предназначение имеет резонатор в газовом лазере?
 5. Как экспериментально можно установить длину волны лазерного излучения?
 6. Как определить энергия фотона, что излучается лазером?



7. Назовите области применения лазера в медицине?