

1. Тепловое излучение. Энергетическая светимость и спектральная плотность энергетической светимости тел. Закон Кирхгофа.

Электромагнитное излучение, возникающее за счет внутренней энергии излучающего тела, называется тепловым излучением. Оно определяется температурой и оптическими свойствами тела.

Энергетическая светимость M_e [Вт/м²] – количество энергии, излучаемой за единицу времени по всем направлениям с единицы площади поверхности тела во всем диапазоне длин волн.

Спектральная плотность энергетической светимости $M_{\lambda,T}$ [Вт/м³] – количество энергии, излучаемой за единицу времени по всем направлениям с единицы площади поверхности тела в единичном диапазоне длин волн.

Энергетическая светимость и спектральная плотность энергетической светимости связаны следующим образом: $M_{\lambda,T} = dM_e/d\lambda$; $M_e = \int_0^{\infty} M_{\lambda,T} d\lambda$.

Спектральная плотность энергетической светимости $M_{\lambda,T}$ и коэффициент поглощения $a_{\lambda,T}$ любого тела связаны соотношением, называемым **законом Кирхгофа**: в состоянии теплового равновесия отношение спектральной плотности энергетической светимости к спектральному коэффициенту поглощения не зависит от природы тела и является для всех тел одной и той же универсальной функцией, равной спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела: $(M_{\lambda,T}/a_{\lambda,T})_1 = (M_{\lambda,T}/a_{\lambda,T})_2 = M_{\lambda,T}^0$.

2. Абсолютно черное тело. Закон Стефана–Больцмана. Закон смещения Вина.

Тело, которое при всех температурах полностью поглощает все падающее на него излучение во всем диапазоне длин волн, называется **абсолютно черным**. Спектральный коэффициент поглощения абсолютно черного тела равен единице для всех длин волн, т.е.: $a_{\lambda,T} = a_T = 1$.

Закон Стефана – Больцмана: Энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры: $M_e^0 = \sigma T^4$, где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² · К⁴) – постоянная Стефана – Больцмана.

Закон смещения Вина: длина волны λ' , на которую приходится максимум излучения в спектре абсолютно черного тела, обратно пропорциональна абсолютной температуре: $\lambda' = b/T$, где $b = 2,9 \cdot 10^{-3}$ м·К.

3. Квантовая гипотеза Планка. Формула Планка для спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела.

Квантовая гипотеза Планка состояла в том, что для элементарных частиц, любая энергия поглощается или испускается только дискретными порциями (квантами). Эти порции состоят из целого числа квантов с энергией таких, что эта энергия пропорциональна частоте ν с коэффициентом пропорциональности, определенным по формуле: $\epsilon = h\nu$, где $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка.

Формула Планка для расчета спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела имеет вид: $M_{\lambda,T}^0 = 2\pi hc^2/\lambda^5 \cdot 1/\exp(hc/\lambda kT)$ -

1, где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

4. Корпускулярно–волновой дуализм излучения. Фотоны. Эффект Комптона.

Корпускулярно-волновой дуализм свойств ЭМ излучения. Это означает, что природу света можно рассматривать с двух сторон: с одной стороны это волна, свойства которой проявляются в закономерностях распространения света, интерференции, дифракции, поляризации. С другой стороны свет - это поток частиц, обладающие энергией, импульсом. Корпускулярные свойства света проявляются в процессах взаимодействия света с веществом (фотоэффект, эффект Комптона).

Фотон – элементарная частица, квант электромагнитного излучения.

Энергия фотона: $\varepsilon = h\nu$, где $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка.

Масса фотона: $m = h \cdot \nu / c^2$. Эта формула получается из формул $\varepsilon = h\nu$ и $\varepsilon = m \cdot c^2$. Масса, определяемая формулой $m = h \cdot \nu / c^2$, является массой движущегося фотона. Фотон не имеет массы покоя ($m_0 = 0$), так как он не может существовать в состоянии покоя.

Эффект Комптона – рассеяние электромагнитного излучения на свободном электроне, сопровождающееся уменьшением частоты излучения. В этом процессе электромагнитное излучение ведёт себя как поток отдельных частиц – корпускул, что доказывает двойственную – корпускулярно-волновую – природу электромагнитного излучения. Комptonовское рассеяние – это рассеяние на свободном электроне отдельного фотона с энергией $E = h\nu = hc/\lambda$ и импульсом $p = E/c$.

Для рассеяния на покоящемся электроне частота рассеянного фотона:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_C (1 - \cos\theta) \quad \text{рис. 1.3} \quad , \text{ где } \alpha \text{ — угол рассеяния (угол между направлениями распространения фотона до и после рассеяния).}$$

Комptonовская длина волны - параметр размерности длины, характерный для релятивистских квантовых процессов. $\lambda_C = h/m_0c = 2,4 \cdot 10^{-12}$ м – комptonовская длина волны электрона.

5. Фотозффект. Законы внешнего фотозффекта.

Фотозффект— это испускание электронов из вещества под действием падающего на него света.

1) Количество фотозэлектронов N'_e , вырываемых из катода за единицу времени, пропорционально интенсивности света, падающего на катод (закон Столетова). Или иначе: ток насыщения пропорционален мощности падающего на катод излучения $\dot{N}'_e = P/\epsilon_\phi$.

2) Максимальная кинетическая энергия фотозэлектронов зависит только от частоты света ν и не зависит от его интенсивности.

3) Для каждого вещества существует «красная граница» фотозффекта, т. е. минимальная частота ν_0 света (зависящая от химической природы вещества и состояния его поверхности), при которой свет любой интенсивности фотозффекта не вызывает. Уравнение Эйнштейна: $\epsilon = A_{\text{вых}} + mv_{\text{max}}^2/2$, где $\epsilon = h\nu$ – энергия поглощенного фотона, $A_{\text{вых}}$ – работа выхода электрона из вещества, $mv_{\text{max}}^2/2$ – максимальная кинетическая энергия вылетевшего электрона.

6. Давление света.

Давление света — давление, которое оказывает свет, падающий на поверхность тела.

Если рассматривать свет как поток фотонов, то, согласно принципам классической механики, частицы при ударе о тело должны передавать импульс, другими словами — оказывать давление. Такое давление иногда называют радиационным давлением. Для вычисления давления света можно воспользоваться следующей формулой:

$p = E/c (1+p)$, где E - количество лучистой энергии, падающей нормально на 1 м^2 поверхности за 1 с ; c — скорость света, p - коэффициент отражения.

Если свет падает под углом к нормали, то давление можно выразить формулой:

$$\vec{p} = w(\vec{i} - \rho\vec{i}') \cos\theta$$

— объёмная плотность энергии излучения, ρ — коэффициент отражения, \vec{i}

— единичный вектор направления падающего пучка, \vec{i}'

— единичный вектор направления отражённого пучка.

1. Ядерная модель атома водорода. Спектр атома. Теория Бора для атома водорода и водородоподобных систем.

Модель Бора выявила истинное значение спектральных законов и позволила установить, как эти законы отражают квантовый характер внутренней структуры атома - устойчивость структуры атома оказалась неразрывно связанной с существованием квантов. В модели Бора каждый атом обладает некоторой последовательностью квантовых (стационарных) состояний. Каждый вид атома имеет свою последовательность квантовых значений энергии, соответствующих различным возможным стационарным состояниям.

Постулаты Бора:

1) В атоме существует ряд дискретных стационарных состояний, которым соответствуют определенные значения энергии атома E_1, E_2 и т.д. В стационарном состоянии атом не излучает и не поглощает энергии.

2) Переходя из одного стационарного состояния в другое, атом излучает и поглощает квант энергии $\varepsilon = h\nu$, равный разности энергий E_n и $E_{n'}$ двух стационарных состояний: $h\nu = E_{n'} - E_n$.

Атом водорода ($Z = 1$) имеет наиболее простой линейчатый спектр излучения. Частоты спектральных линий для атома водорода и водородоподобных атомов определяются по формуле: $\nu = R_\nu(1/n^2 - 1/n'^2)$, где $R_\nu = Z^2 m e^4 / 8 \varepsilon_0^2 h^3 = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ c}^{-1}$ – постоянная Ридберга.

Также эта формула может быть записана через длину волны λ : $1/\lambda = R_\lambda(1/n^2 - 1/n'^2)$, где $R_\lambda = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$.

2. Корпускулярно–волновая природа частиц вещества. Волны де Бройля, их вероятностный смысл.

Корпускулярно-волновой дуализм — это теория о том, что свет представляется на микроуровне одновременно и как мельчайшие частицы (корпускулы), и как волны. В частности, свет — это и корпускулы (фотоны), и электромагнитные волны.

Волны де Бройля — волны, связанные с любой микрочастицей и отражающие их квантовую природу. Любая движущаяся частица (например, электрон) ведёт себя не только как локализованный в пространстве перемещающийся объект - корпускула, но и как волна, причём длина этой волны даётся формулой $\lambda = h/p$, где $h = 6.6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{сек}$ – постоянная Планка, а p – импульс частицы. Эта волна и получила название волны де Бройля.

Согласно статистической интерпретации волны де Бройля следует рассматривать как волны вероятности. Более определенно: интенсивность волны де Бройля в каком-либо месте пространства пропорциональна вероятности обнаружить частицу в этом месте.

Если рассматривать свет как поток частиц (фотонов), то для фотона мы не можем определить, в какую точку на экране он попадет. Для фотона можно рассчитать только вероятность попадания его в ту или иную точку (w). И эта вероятность $w \sim I \sim A^2$. Чтобы описать распределение вероятности

нахождения частиц в пространстве в квантовой механике используют волновую функцию $\psi(x,y,z,t)$ (пси функцию). Пси функцию определяют следующим образом: $dW = |\psi(x,y,z,t)|^2 dV$. dW – вероятность того, что частица находится в некотором элементарном объеме dV . Физический смысл имеет не ψ -функция, а ее квадрат модуля, который определяет вероятность обнаружения частицы в данном объеме (точка):

$$|\psi(x,y,z,t)|^2 = \frac{dW}{dV}.$$

3. Соотношения неопределенностей Гейзенберга.

Принцип неопределённости Гейзенберга - в квантовой механике так называют принцип, дающий нижний (ненулевой) предел для произведения дисперсий величин, характеризующих состояние системы.

Соотношения неопределённости Гейзенберга — это теоретический предел точности любых измерений. Они справедливы для так называемых идеальных измерений, иногда называемых измерениями фон Неймана. Они тем более справедливы для неидеальных измерений или измерений Ландау.

Соотношение неопределенности Гейзенберга показывает, что между точностью, с которой одновременно может быть установлено положение частицы, и точностью ее импульса существует определенное соотношение: $\Delta q \Delta p \geq \hbar$, где Δ - среднеквадратичное отклонение.

произведение неопределённости измерения импульса Δp_x на неопределённость измерения координаты Δx не может быть меньше постоянной Планка: $\Delta p_x \cdot \Delta x \geq \hbar$

4. Волновые свойства микрочастиц. Экспериментальные подтверждения гипотезы де-Бройля и принципа неопределенностей Гейзенберга.

Микрочастицами называют элементарные частицы (электроны, протоны, нейтроны, фотоны и другие простые частицы), а также сложные частицы, образованные из сравнительно небольшого числа элементарных частиц (молекулы, атомы, ядра атомов и т.п.). Волновые свойства: Гипотеза Де-Бройля; дифракция частиц; корпускулярно-волновой дуализм микрочастиц.

Гипотеза де Бройля была подтверждена экспериментально в опытах американских физиков Дэвиссона и Джермера. В вакууме узкий пучок моноэнергетических электронов, получаемый с помощью электронно-лучевой трубки, направлялся на мишень. Отраженные электроны улавливались детектором, соединенным с гальванометром. По силе электрического тока в гальванометре судили о количестве электронов, зарегистрированных детектором. Число электронов, отраженных в некоторых направлениях, оказалось больше, а в некоторых меньше, чем следовало ожидать. Возникало избирательное отражение в определенных направлениях. Опыты явились блестящим подтверждением идеи де Бройля о том, что движение электрона или какой-либо другой частицы связано с волновым процессом.

5. Волновая функция и ее свойства

Волновая функция имеет статистический смысл: квадрат модуля волновой функции определяет плотность вероятности нахождения частицы (электрона): $dw/dV = |\Psi|^2$.

Здесь dw вероятность нахождения частицы в элементе объема от V до $V+dV$.

Свойства волновой функции:

$$\iiint_{-\infty}^{+\infty} |\Psi|^2 dx dy dz = 1$$

1) Правило нормировки:

Правило выражает тот факт, что вероятность обнаружить частицу с данной волновой функцией во всем пространстве равна единице.

2) Импульс частицы в каждом из направлений x, y, z пропорционален первой производной волновой функции, деленной на саму волновую функцию, а именно:

$p_x = -i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial x} / \Psi; p_y = -i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial y} / \Psi; p_z = -i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial z} / \Psi$, где p_x, p_y, p_z — проекции импульсов на соответствующие оси координат, $i = \sqrt{-1}$ - мнимая единица, $\hbar = h/2\pi$ - постоянная Планка.

3) Кинетическая энергия частицы $(p_x^2 + p_y^2 + p_z^2) / 2m$ пропорциональна второй производной, или кривизне волновой функции, деленной на эту

$$E_K = -\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} \right) / \Psi$$

волновую функцию

6. Стационарное уравнение Шредингера. Его решение.

Стационарное уравнение Шредингера для движения электрона в кулоновском поле ядра атома водорода и водородоподобных атомов имеет вид:

$$\Delta \psi + (8\pi^2 m / h^2)(E - U)\psi = 0,$$

где Ψ — волновая функция, Δ - оператор Лапласа, E — полная энергия электрона в атоме, $U = -(Ze^2/4\pi\epsilon_0 r)$ — потенциальная энергия.

Решением этого уравнения является малая пси функция $\psi = \psi(x, y, z)$

Квадрат модуля пси функции определяет вероятность того, что частица будет обнаружена в пределах объема dV $dp = |\Psi|^2 dV = |\psi|^2 dV$

Вероятность обнаружить частицу в какой-либо точке пространства = 1, следовательно $\int dp = \int |\Psi|^2 dV = 1$ — условие нормировки пси функции

Квадрат модуля пси функции дает плотность вероятностей нахождения частицы в соответствующем месте пространства $\frac{dp}{dV} = |\psi|^2$

Пси функцию называют волновой функцией

7. Частица в бесконечно глубокой потенциальной яме. Квантование энергии частицы. Собственные значения волновой функции.

Потенциальная яма — область пространства, где присутствует локальный минимум потенциальной энергии частицы.

Электрон в атоме может иметь только определенные дискретные (квантованные) значения энергии, которые совпадают с выражением

$$E = -(Z^2 m e^4 / 8 \epsilon_0^2 h^2 n^2),$$

где n — главное квантовое число.

Используя граничные условия, имеем:

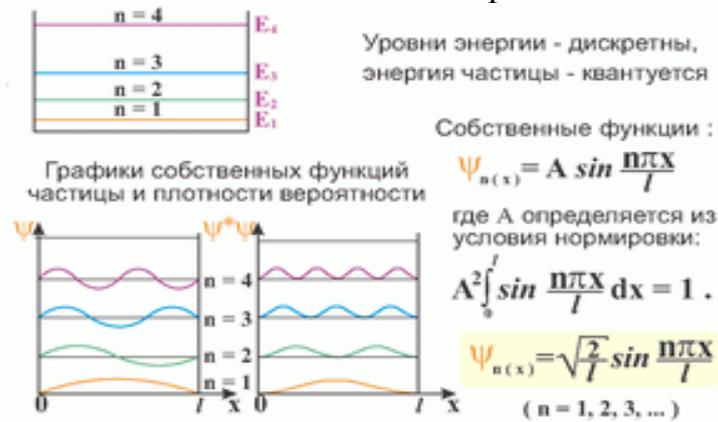
$$\Psi_{(x=0)} = a \sin \alpha = 0 \text{ Отсюда, } \alpha = 0$$

$$\Psi_{(x=l)} = a \sin \omega l = 0 \text{ Отсюда, } \omega l = \pm n\pi \text{ (} n = 1, 2, \dots \text{)}$$

Учитывая значения ω , получим:

$$E_n = \hbar^2 \pi^2 / 2ml n^2 \text{ (} n = 1, 2, \dots \text{)}$$

E_n – собственные значения энергии.

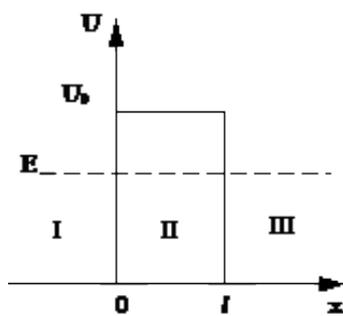


Принцип квантования энергии гласит, что любая система взаимодействующих частиц, способная образовывать стабильное состояние - будь то кусок твердого тела, молекула, атом или атомное ядро, - может сделать это только при определенных значениях энергии.

8. Прохождение частиц через потенциальный барьер. Туннельный эффект.

Потенциальный барьер – ограниченная в пространстве область, в которой потенциальная энергия частицы, движущейся в силовом поле, больше, чем по обе стороны от нее. Потенциальный барьер соответствует силам отталкивания.

Туннельный эффект - преодоление микрочастицей потенциального барьера в случае, когда её полная энергия (остающаяся при туннелировании неизменной) меньше высоты барьера. Туннельный эффект — явление исключительно квантовой природы, невозможное в классической механике; аналогом туннельного эффекта в оптике является прохождение световой волны сквозь слой вещества, показатель преломления которого меньше, чем у граничащих с ним сред, в условиях, когда по законам геометрической оптики это невозможно.



В областях I и III потенциальная энергия равна нулю: $U (-\infty < x \leq 0) = U (a \leq x < \infty) = 0$; . В области II $(0 < x < a)$ потенциальная энергия $U = U_0 > 0$. Именно эта область является потенциальным барьером.

9. Основное состояние атома водорода с точки зрения квантовой механики. Уравнение Шредингера и его решение.

Атом водорода в квантовой механике. Принцип Паули. Рассмотрим систему, состоящую из неподвижного ядра с зарядом $Z \cdot e$ (Z -целое число) и движущегося вокруг него электрона. При такой системе называется водородоподобным ионом; при $Z = 1$ она представляет атом водорода. В атоме водорода или водородоподобном ионе потенциальная энергия:

$$U = -\frac{q^2}{4\pi \epsilon_0 r}$$

В настоящее время спектры атомов и молекул объясняются законами квантовой механики, основным уравнением которой является уравнение Шредингера. Уравнение Шредингера в вопросе 6

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi + U(x, y, z, t) \cdot \Psi = i \cdot \hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}$$

, уравнение Шредингера, зависящим от времени.

10. Квантовые числа. Орбитальный механический и магнитный моменты электрона в атоме.

Квантовые числа в 11 вопросе.

Момент импульса, обусловленный перемещением в пространстве, называют **орбитальным**.

Механический орбитальный момент электрона:

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

, где l – орбитальное квантовое число, $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$. Таким образом, момент импульса электрона, как и энергия, квантуется, т.е. принимает дискретные значения

Орбитальный магнитный момент электрона:

$$p_m = -\frac{e}{2m} L = -\frac{e \hbar}{2m} \sqrt{l(l+1)}$$

где $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$ – магнитное квантовое число.

11. Квантовые числа. Пространственное квантование. Спин электрона. Принцип Паули.

Главное квантовое число – n – определяет энергетический уровень электрона, удалённость энергетического уровня от ядра и размер электронного облака. Главное квантовое число принимает любые целочисленные значения, начиная с $n = 1$

Орбитальное квантовое число – l – определяет геометрическую форму атомной орбитали. Орбитальное квантовое число принимает любые целочисленные значения, начиная с $l = 0$

Магнитное квантовое число – m_l – определяет ориентацию орбитали в пространстве относительно внешнего магнитного или электрического поля. Магнитное квантовое число принимает любые целочисленные значения от $-l$ до $+l$, включая 0.

Спиновое квантовое число – m_s – определяет магнитный момент, возникающий при вращении электрона вокруг своей оси. Спиновое квантовое число может принимать лишь два возможных значения $+1/2$ и $-1/2$.

Спин - собственный момент импульса (или магнитный момент) элементарных частиц, имеющий квантовую природу и не связанный с перемещением частицы как целого.

Отношение величины магнитного момента к величине спина называется гиромагнитным отношением, и, в отличие от орбитального углового момента, оно не равно магнетону (μ_0): $\hat{\mu} = g \cdot \mu_0 \hat{s}$ Введённый здесь множитель g называется g-фактором частицы;

Спин электрона равен $1/2$.

Орбитальное квантовое число l определяет значение орбитального момента количества движения электрона на данной орбитали. Допустимые значения: $0, 1, 2, 3, \dots, n-1$.

Орбитальное квантовое число определяет форму поверхности максимальной вероятности нахождения электрона и ее симметрию.

Спиновое квантовое число m_s . Каждый электрон также характеризуется собственным механическим моментом движения, который получил название *спин*. Спиновое квантовое число m_s имеет только два значения $+1/2$ и $-1/2$, которые связаны с его направлением.

Принцип Паули ограничивает число электронов, которые могут находиться на одной орбитали. Согласно принципу Паули, на любой орбитали может находиться не более двух электронов и то лишь в том случае, если они имеют противоположные спины (неодинаковые спиновые числа). Поэтому в атоме не должно быть двух электронов с одинаковыми четырьмя квантовыми числами (n, l, m_l, m_s).

12. Строение электронной оболочки атомов. Периодическая система элементов. Распределение электронов в многоэлектронных атомах.

Атом состоит из ядра и электронной оболочки. Электронная оболочка атома – это совокупность всех электронов в данном атоме. От строения электронной оболочки атома напрямую зависят химические свойства данного хим. элемента. Согласно квантовой теории, каждый электрон в атоме занимает определенную орбиталь и образует электронное облако, которое является совокупностью различных положений быстро движущегося электрона. Для характеристики орбиталей и электронов используют квантовые числа.

Периодическая система элементов — классификация химических элементов, устанавливающая зависимость различных свойств элементов от их заряда атомного ядра. Система является графическим выражением периодического закона. Каждый столбец (группа) определяет основные физико-химические свойства, а строки представляют собой периоды, в определённой мере подобные друг другу.

Распределение электронов в многоэлектронных атомах основано на трех положениях: принципе минимума энергии, принципе Паули и правиле Хунда.

1. Заполнение энергетических уровней и подуровней происходит согласно принципу минимальной энергии: *минимальной энергией обладают уровни и подуровни, ближайшие к ядру: 1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 4s, 3d и т. д.*

2. *в атоме не может быть электронов, имеющих одинаковый набор всех четырех квантовых чисел.*

3. *в наиболее устойчивом состоянии атома электроны размещаются в пределах электронной подоболочки так, чтобы их суммарный спин был максимален.*

13. Рентгеновские лучи. Характеристическое рентгеновское излучение. Закон Мозли.

Рентгеновское излучение — электромагнитные волны, энергия фотонов которых лежит на энергетической шкале между ультрафиолетовым излучением и гамма-излучением, что соответствует длинам волн от 0,005 до 100 нм.

Характеристические рентгеновские лучи образуются при выбивании электрона одного из внутренних слоёв атома с последующим переходом на освободившуюся орбиту электрона с какого-либо внешнего слоя. Они обладают линейчатым спектром, аналогичным оптическим спектрам газов.

Закон Мозли - закон, связывающий частоту спектральных линий характеристического рентгеновского излучения химического элемента с его порядковым номером. Согласно Закону Мозли, корень квадратный из частоты ν спектральной линии характеристического излучения элемента есть линейная функция его порядкового номера Z : $\sqrt{\nu} = \frac{Z - S_n}{n}$, где R — постоянная Ридберга, S_n — постоянная экранирования, n — главное квантовое число.

14. Оптические квантовые генераторы (лазеры). Принцип их действия и основные элементы.

Лазеры представляют собой генераторы оптического излучения. Основой работы ОКГ является генерирование монохроматических волн оптического диапазона под воздействием индуцированного излучения.

Принцип действия лазеров основан на использовании процесса вынужденного (стимулированного, индуцированного) испускания фотона возбужденным атомом или молекулой под воздействием излучения, имеющего ту же частоту. Самое важное в этом процессе то, что фотон, возникший при вынужденном испускании, совершенно тождественен с вызвавшим его внешним фотоном по направлению, частоте, фазе и поляризации. На языке волновой оптики это означает, что вынужденное излучение когерентно со стимулирующим. Этот принцип справедлив для всего спектра электромагнитного излучения. Среда с инверсной заселенностью называется **активной**. Излучение с частотой, соответствующей инверсному переходу, проходя через активную среду (АС), вызывает лавину вынужденных фотонов, «летающих» строго в одном направлении, и вместо обычного ослабления получается усиление излучения в направлении падающего луча.

Лазер обязательно имеет три основных элемента: 1) *активную среду*, в которой создаются состояния с инверсией населенностей; 2) *систему накачки* (устройство для создания инверсии в активной среде); 3) *оптический резонатор* (устройство, выделяющее в пространство избирательное направление пучка фотонов и формирующее выходящий световой пучок).

1. Квантовая статистика состояний электронов в металле. Функция распределения Ферми–Дирака. Энергия Ферми. Понятие о вырождении электронного газа в металле.

Модель свободных электронов в металлах предполагает, что при образовании кристаллической решетки от атомов отщепляются некоторые слабее всего связанные с ними (валентные) электроны. Отщепленные электроны становятся общими для всех атомов и могут свободно перемещаться в кристалле. Именно эти электроны, в отличие от электронов, заполняющих внутренние электронные оболочки атомов, обеспечивают электропроводность металлов. Поэтому их называют электронами проводимости.

При 0 К энергия всех электронов меньше энергии Ферми. Ни один из электронов покинуть кристалл не может и никакой термоэлектронной эмиссии не наблюдается. С увеличением температуры возрастает число термически возбужденных электронов, способных выйти из металла, что обуславливает явление термоэлектронной эмиссии.

Уровень Ферми - уровень энергии, ниже которого все состояния при $T = 0\text{К}$ заняты электронами.

Функция Ферми-Дирака описывает равновесное состояние электронов. Если при какой-то температуре электронов нет, то будет происходить термогенерация электронов и дырок, и постепенно они распределятся по

$$f_{\text{Ф-Д}}(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) + 1}$$

функции Ферми-Дирака.

Система частиц называется **вырожденной**, если ее свойства существенно отличаются от свойств систем, подчиняющихся классической статистике. Поведение как бозе-газа, так и ферми-газа отличается от классического газа, они являются вырожденными газами. Вырождение газов становится существенным при весьма низких температурах и больших плотностях. **Параметром вырождения** называется величина A . При $A \ll 1$, т. е. при малой степени вырождения, распределения Бозе — Эйнштейна и Фер-

ми — Дирака переходят в классическое распределение Максвелла — Больцмана

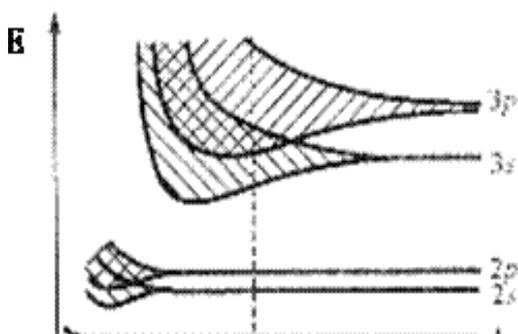
$$A = e^{\mu/(kT)}$$

2. Основы зонной теории твердых тел. Образование энергетических зон.

Зонная теория твёрдого тела — это теория валентных электронов, движущихся в периодическом потенциальном поле кристаллической решётки

В основе зонной теории лежат следующие главные приближения^[1]:

1. Твёрдое тело представляет собой идеально периодический кристалл.
2. Равновесные положения узлов кристаллической решётки фиксированы, то есть ядра атомов считаются неподвижными (адиабатическое приближение). Малые колебания атомов вокруг равновесных положений, которые могут быть описаны как фононы, вводятся впоследствии как возмущение электронного энергетического спектра.
3. Многоэлектронная задача сводится к одноэлектронной: воздействие на данный электрон всех остальных описывается некоторым усредненным периодическим полем.



Взаимодействие атомов, их электромагнитных полей в твердом теле (кристалле) приводит к тому, что вместо отдельных уровней и подуровней образуются энергетические зоны — уровни и подуровни расщепляются (группируются) в зоны (рисунок, левая часть). Количество уровней в каждой зоне настолько велико, что энергетический спектр в ней можно считать непрерывным.

3. Тепловые свойства твердых тел. Фононы.

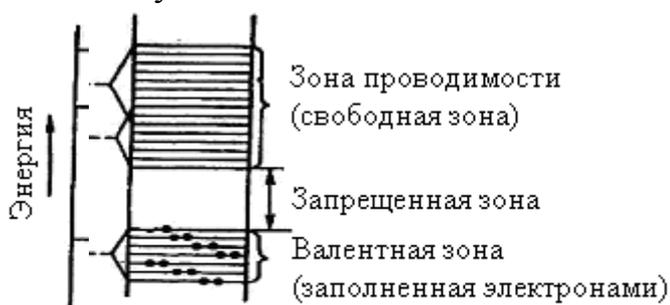
Твёрдое тело обладает широким спектром колебаний, в нём есть высокие и низкие частоты. Низкочастотные колебания лежат в звуковом и ультразвуковом диапазоне и представляют собой упругие волны, распространяющиеся в кристалле. Минимальная длина волны: $\lambda_{\min} = 2l$. Колебания с минимальными длинами волн не имеют физического смысла, т.к. не соответствуют реальным смещениям частиц решетки. Эти колебания являются стоячими волнами и не переносят энергию вдоль решётки. При этом низкочастотные колебания вносят максимальный вклад в энергию тепловых колебаний кристалла. Максимальная частота колебаний: ν_{\max} . С уменьшением λ и увеличением ν , скорость упругих волн уменьшается и при

выполнении $\lambda_{\min} = 2l$ скорость распространения становится равной нулю. Энергия упругих волн изменяется дискретно и величина изменения не может быть меньше, чем $h\nu$. Изменения энергии должно быть всегда кратно $h\nu$. Фонон — квазичастица, представляющая собой квант колебательного движения атомов кристалла.

4. Электропроводность твердых тел с точки зрения зонной теории. Металлы, полупроводники и диэлектрики. Расположение зон в твердых телах. Внутризонные и междузонные переходы электронов.

С точки зрения зонной теории все твердые тела можно подразделить на две основные группы: материалы, у которых валентная зона перекрывается зоной проводимости, и материалы, у которых валентная зона и зона проводимости разделены запрещенной зоной. В первом случае незначительное внешнее энергетическое воздействие переводит электроны на более высокие энергетические уровни, что обуславливает хорошую электропроводность материалов. Во втором случае переходы на более высокие энергетические уровни связаны с необходимостью внешнего энергетического воздействия, превышающего ширину запрещенной зоны. Материалы, в энергетической диаграмме которых отсутствует запрещенная зона, относятся к категории проводников, материалы с узкой запрещенной зоной (менее 3 эВ) — к категории полупроводников и материалы с широкой запрещенной зоной (более 3 эВ) — к категории диэлектриков.

Уровни возбужденного атома



Внутризонный переходы- переходы электронов с одного энергетического уровня на другой в пределах разрешённой зоны

Междузонные переходы- переходы электронов между энергетическими уровнями соседних разрешённых зон

5. Электрические свойства полупроводников. Собственная электронная и дырочная проводимость и ее зависимость от температуры.

Для полупроводников величина удельной электропроводности может быть определена по формуле $\gamma_c = |e|(n_n \mu_n + n_p \mu_p)$.

Здесь γ_c — удельная электропроводность чистых полупроводников, которая называется собственной, μ_n и μ_p — соответственно, подвижность электронов и дырок.

Приближенно можно считать, что подвижности электронов и дырок в чистом полупроводнике одинаковы $\mu_n \sim \mu_p$, тогда, получаем

$$\gamma_c = C \exp(-\Delta E / 2kT)$$

Примесная проводимость реализуется при замещении базовых атомов кристалла атомами другого вещества, валентность которого отличается на единицу от валентности основных атомов. Даже при введении атомов примеси в малых концентрациях электропроводность полупроводников значительно увеличивается

6. Примесная проводимость полупроводников. Донорные и акцепторные уровни в полупроводниках.

В полупроводниках с примесью, валентность которой на единицу больше валентности основных атомов, носителями тока являются электроны; возникает электронная примесная проводимость (проводимость «n-типа»). Полупроводники с такой проводимостью называются электронными (или полупроводниками n-типа). Примеси, являющиеся источником электронов, называются донорами, а энергетические уровни этих примесей — донорными уровнями.

В полупроводниках с примесью, валентность которой на единицу меньше валентности основных атомов, носителями тока являются дырки; возникает дырочная проводимость (проводимость p-типа). Полупроводники с такой проводимостью называются дырочными (или полупроводниками p-типа). Примеси, захватывающие электроны из валентной зоны полупроводника, называются акцепторами, а энергетические уровни этих примесей акцепторными уровнями.

7. Контактные явления в полупроводниках. p–n переход.

Граница соприкосновения двух полупроводников, один из которых имеет электронную, а другой — дырочную проводимость, называется *электронно-дырочным переходом* (или *p-n-переходом*).

КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ- неравновесные электронные явления, возникающие при прохождении электрич. тока через контакт полупроводника с металлом или электролитом или через контакт двух различных полупроводников (гетеропереход) либо через границу двух областей одного и того же полупроводника с разным типом носителей заряда и разной их концентрацией.

Приведем в контакт p– и n– полупроводники. Основные носители заряда (дырки в p–полупроводнике и электроны в n–полупроводнике) начинают диффундировать через границу контакта и тем самым создают ток, который называется диффузионным током $i_{\text{диф}}$.

При этом часть носителей заряда рекомбинирует (т.е. электрон встает на место дырки), а другая часть в тонком пограничном слое толщиной $10^{-6} - 10^{-4}$ см образует контактное электрическое поле напряженностью E_k .

1. Состав атомного ядра. Дефект массы. Энергия связи. Удельная энергия связи. Устойчивость ядер.

Атомное ядро состоит из нуклонов — положительно заряженных протонов и нейтральных нейтронов, которые связаны между собой при помощи сильного взаимодействия. Атомное ядро, рассматриваемое как класс частиц с определённым числом протонов и нейтронов, часто называется нуклидом.

Нуклоны состоят из более простых частиц трех типов, названных кварками. Кварковая компонента нуклонов реализуется в виде двух возбуждённых барионных кластеров, испускающих главным образом нуклоны

Количество протонов в ядре называется его зарядовым числом Z — это число равно порядковому номеру элемента, к которому относится атом в таблице Менделеева. Количество нейтронов в ядре называется его изотопическим числом N . Полное количество нуклонов в ядре называется его массовым числом A (очевидно $A = N + Z$) и приблизительно равно средней массе атома, указанной в таблице Менделеева.

Энергия связи ядра — энергия, которую необходимо затратить для расщепления ядра на отдельные нуклоны. Равна энергии всех нуклонов в свободном состоянии.

Дефект массы характеризует уменьшение суммарной массы при обозначении ядра из нуклонов: $\Delta M = Z m_p + N m_n - M_a = E_{св} / c^2$.

Чем больше энергия связи, тем больше устойчивость ядра.

Для осуществления реакции между двумя или несколькими частицами необходимо, чтобы взаимодействующие частицы (ядра) сблизилась на расстояние порядка 10^{-13} см, то есть характерного радиуса действия ядерных сил.

2. Ядерные силы. Их свойства.

Атомное ядро, состоящее из определенного числа протонов и нейтронов, является единым целым благодаря специфическим силам, которые действуют между нуклонами ядра и называются **ядерными**.

1. Ядерные силы являются **короткодействующими силами притяжения**. Они проявляются лишь на весьма малых расстояниях между нуклонами в ядре порядка 10^{-15} м. Расстояние $(1,5 - 2,2) \cdot 10^{-15}$ м называется **радиусом действия** ядерных сил, с его увеличением ядерные силы быстро уменьшаются. На расстоянии $(2-3) \cdot 10^{-15}$ м ядерное взаимодействие между нуклонами практически отсутствует.

2. Ядерные силы обладают свойством **насыщения**, т.е. каждый нуклон взаимодействует только с опред. числом ближайших соседей. Такой характер ядерных сил проявляется в приближенном постоянстве удельной энергии связи нуклонов при зарядовом числе $A > 40$.

3. **Зарядовая независимость**, т.е. они не зависят от заряда нуклонов, поэтому ядерные взаимодействия между протонами и нейтронами одинаковы. Зарядовая независимость ядерных сил видна из сравнения энергий связи **зеркальных ядер**. Так называются ядра, в которых одинаково общее число нуклонов, но число протонов в одном равно числу нейтронов в другом.

4. Ядерные силы **не являются центральными** и зависят от взаимной ориентации спинов взаимодействующих нуклонов. Это подтверждается различным характером рассеяния нейтронов молекулами орто- и параводорода. В молекуле ортоводорода спины обоих протонов параллельны друг другу, а в молекуле параводорода они антипараллельны. Опыты показали, что рассеяние нейтронов на параводороде в 30 раз превышает рассеяние на ортоводороде.

3. Закон радиоактивного распада. Характеристики распада ядер.

Радиоактивный распад – процесс превращения неустойчивых атомных ядер в ядра других элементов, который сопровождается испусканием частиц.

$N = N_0 e^{-\lambda t}$ – закон радиоактивного распада, где N – число нераспавшихся ядер, N_0 – число начальных ядер.

Физический смысл постоянной распада – вероятность распада ядра за единицу времени. Характерные времена жизни для радиоактивных ядер $\tau > 10^{-14}$ с. Времена жизни ядер, обусловленные испусканием нуклонов 10^{-23} с $< 10^{-20}$ с. $T_{1/2}$ – период полураспада – время, за которое распадается половина начального количества ядер. Активность радиоактивного источника – число распадов в единицу времени: $A = \lambda N$.

Атомный номер Z Номер хим. элемента в периодической системе. Равен числу протонов в ядре и числу e^- в электронной оболочке.

Массовое число A Число нуклонов в ядре.

Энергия связи ядра	$E_{\text{св}}$	Энергия, выделяющаяся при образовании ядра из свободных нуклонов. Эта та энергия, необходимая для разделения ядра на свободные нуклоны.
Дефект массы ядра	Δm	Физ. величина, равная разнице м/у массой свободных нуклонов и нуклонов, находящихся в ядре.
Удельная энергия ядра	$\epsilon_{\text{св}}$	Физ. величина, равна $E_{\text{св}}$ ядра, приходящейся на 1 нуклон

4. Законы смещения при радиоактивном распаде. Закономерности излучения ядер.

Радиоактивный распад – процесс превращения неустойчивых атомных ядер в ядра других элементов, который сопровождается испусканием частиц.

Виды радиоактивного распада:

- 1) α – распад – сопровождается испусканием атомов гелия.
- 2) β – распад – испускание электронов и позитронов.
- 3) γ – распад – испускание фотонов при переходах между состояниями ядер.
- 4) Спонтанное деление ядер.
- 5) Нуклонная радиоактивность.

α – распад: ${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2 \text{He}$. α -распад наблюдается у тяжёлых ядер. Спектр α – распада дискретный. Длина пробега α – частицы в воздухе: 3-7см; для плотных веществ: 10^{-5} м. $T_{1/2} 10^{-7} \text{с} \div 10^{10}$ лет.

β – распад обусловлен слабым взаимодействием. Слабым оно является по отношению к сильным ядрам. В слабых взаимодействиях участвуют все частицы, кроме фотонов. Суть в вырождении новых частиц. $T_{1/2} 10^{-2} \text{с} \div 10^{20}$ лет. Свободный пробег нейтрона 10^{19} км.

β – распад включает в себя 3 вида распада:

- 1) β^- или электронный. Ядро испускает электроны. В общем случае:
 ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + {}^0_{-1} e + \nu_e$.
- 2) β^+ или позитронный. Испускаются античастицы электрона – позитроны:
 ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + {}^0_{+1} e + \nu_e$ – реакция превращения протона в нейтрон. Самостоятельно реакция не проходит. Общий вид реакции: ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + {}^0_{+1} e + \nu_e$. Наблюдается у искусственных радиоактивных ядер.
- 3) Электронный захват. Происходит превращение ядра, захватывает К – оболочку и превращается в нейтрон: ${}^A_Z X + {}^0_{-1} e \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + \nu_e$. В результате электрического захвата из ядер вылетает только одна частица. Сопровождается характерным рентгеновским излучением.

5. Ядерные реакции. Реакции деления и синтеза атомных ядер.

Ядерная реакция — процесс превращения атомных ядер, происходящий при их взаимодействии с элементарными частицами, гамма-квантами и друг с

другом, часто приводящий к выделению колоссального количества энергии. При протекании ядерных реакций выполняются следующие законы: сохранения электрического заряда и числа нуклонов, сохранения энергии и импульса, сохранения момента импульса, сохранения четности и изотопического спина.

Реакция деления – деление атомного ядра на несколько более легких ядер. Деления бывают вынужденные и спонтанные.

Реакция синтеза – реакция слияния лёгких ядер в одно. Эта реакция происходит только при высоких температурах, порядка 10^8 К и называется термоядерной реакцией.