

Введение. Квантовая и оптическая электроника

План лекции:

1. Основные понятия и определения.
2. Особенности квантовой и оптической электроники.
3. Краткая историческая справка.
4. Об используемых системах единиц в научной литературе.
5. О фотонах и электронах.
6. Принцип наименьшего действия.
7. Функция Гамильтона и гамильтониан.
8. Литература.

1. Основные понятия и определения

Квантовая электроника — область науки и техники, исследующая и применяющая квантовые явления для усиления, генерации и преобразования когерентных электромагнитных волн.

Оптоэлектроника — область науки и техники, исследующая и применяющая процессы взаимодействия оптического излучения с веществом для передачи, приема, переработки, хранения и отображения информации.

Интегральная оптика — раздел оптоэлектроники, изучающий и применяющий оптические явления в тонкопленочных полупроводниковых и диэлектрических волноводах и структурах, изготовленных на единой подложке методами групповой (интегральной) технологии.

Оптическое излучение — электромагнитное излучение оптического диапазона.

1. Основные понятия и определения

Оптический диапазон спектра составляют электромагнитные колебания, длина волн которых лежит в пределах от 1 мм до 1 нм.

Внутри оптического диапазона выделяют **видимое** ($\lambda=0,38...0,78$ мкм), **инфракрасное** ($\lambda =0,78... 1000$ мкм) и **ультрафиолетовое** ($\lambda =0,001...0,38$ мкм) излучения.

Световые волны — электромагнитные волны оптического диапазона.

Монохроматическое излучение — оптическое излучение, характеризующееся какой-либо одной частотой (одной длиной волны) световых колебаний.

Квантовый усилитель — усилитель электромагнитных волн, основанный на использовании вынужденного излучения.

1. Основные понятия и определения

Квантовый генератор — источник когерентного излучения, основанный на использовании вынужденного излучения.

Лазер (оптический квантовый генератор) — квантовый генератор (усилитель) оптического излучения.

Мазер — квантовый генератор (усилитель) электромагнитного излучения радиодиапазона.

- Термины «**лазер**» (от англ. laser) и «**мазер**» (от англ. maser) образованы от начальных букв фразы *Light (Microwave) Amplification by Stimulated Emission of Radiation* — усиление света (СВЧ-волн) с помощью индуцированного излучения.

В этих названиях по существу определен принцип работы квантовых усилителей и генераторов.

1. Основные понятия и определения

Вынужденное излучение — когерентное электромагнитное излучение, возникающее в результате вынужденного испускания.

Вынужденное испускание — когерентное испускание фотона при квантовом переходе системы в результате взаимодействия с внешним электромагнитным полем.

Когерентность — согласованное протекание во времени и в пространстве колебательных или волновых процессов. Электромагнитная волна называется когерентной, если её амплитуда, частота, фаза, направление распространения и поляризация постоянны или изменяются по определенному закону (упорядоченно).

2. Особенности квантовой и оптической электроники

Квантовая и оптическая электроника определяет новые возможности как электроники, так и оптики, поскольку:

1. Частота электромагнитных колебаний (несущая частота ν_0) в оптическом диапазоне существенно выше, чем в радиодиапазоне, что обеспечивает высокую информационную емкость оптического канала связи.

2. Длина световых волн существенно меньше, чем длина радиоволн, что позволяет получить высокую концентрацию оптического излучения в пространстве и сформировать узкую диаграмму направленности излучения с углом расходимости $0,1^\circ$ и менее.

3. Передача информации осуществляется фотонами – электрически нейтральными частицами, не взаимодействующими с внешними электрическими и магнитными полями. Это определяет возможность идеальной гальванической развязки входа и выхода.

4. Применение оптических методов записи, хранения и обработки информации открывает новые возможности для построения компьютерной техники включая возможность достижения высокой плотности записи ($\sim 10^8$ бит/см²) в оптических запоминающих устройствах.

3. Краткая историческая справка

Оптические методы передачи информации использовались с древних времён в виде зажженных факелов или костров ночью, а днем — в виде сигнальных дымов.

В освоении оптического излучения можно выделить два исторических этапа.

Первый связан с изучением наблюдаемого глазом видимого света и соответствует развитию **классической оптики**. Вначале была теория зрительных лучей, затем появилась корпускулярная теория и одновременно волновая теория, которая стала господствующей

Второй этап развития оптики тесно связан с изучением оптических спектров поглощения и испускания, что привело к необходимости введения понятий о **кванте действия h** как минимальном действии, которые ввел в 1900 г. М. Планк. В настоящее время общепризнанной является теория, признающая корпускулярно-волновую двойственность света.

4. Об используемых системах единиц в научной литературе

В курсе общей физики для инженерных специальностей обычно используется **международная система единиц (СИ)**. При расчётах по формулам этой системы окончательные численные результаты сразу получаются в практических единицах – вольтах, амперах, омах, джоулях и пр.

Для научных расчётов в физике часто пользуются и другие системы единиц, из которых наиболее употребительна **гауссова система единиц (СГС)**, которую также иногда называют «абсолютная система единиц», и «естественная система единиц». Это вызвано удобством записи в этих системах некоторых физических законов и проведении промежуточных вычислений. В любом случае затем всегда можно перейти к необходимой системе единиц, в том числе и к системе СИ.

4. Об используемых системах единиц в научной литературе

Механические величины в СГС отличаются от величин в СИ только размером (вместо метра в СИ – сантиметр – в СГС, и вместо килограмма в СИ – грамм в СГС).

Для электрических величин законы Кулона и Био-Савара-Лапласа выглядят следующим образом:

Закон	Абсолютная система единиц (СГС)	Система СИ
Кулона	$F = \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}$	$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}$
Био-Савара-Лапласа	$B = \frac{1}{c} \frac{\mu I}{r^3} [d\vec{l}, \vec{r}]$	$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\mu I}{r^3} [d\vec{l}, \vec{r}]$

В таблице c – скорость света, см/с.

4. Об используемых системах единиц в научной литературе

Перевод единиц из гауссовой системы в систему СИ:

Наименование	Гауссова система	Система СИ
Скорость света	c	$1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$
Напряженность электрического поля	E	$\sqrt{4\pi\epsilon_0} E$
Потенциал	φ	$4\pi\epsilon_0\varphi$
Электрическое смещение	D	$\sqrt{4\pi/\epsilon_0} D$
Заряд, плотность заряда, ток, плотность тока, поляризованность	q, ρ, I, j, P	$\frac{1}{\sqrt{4\pi\epsilon_0}} (q, \rho, I, j, P)$
Магнитная индукция, магнитный поток	B, Φ	$\sqrt{4\pi/\mu_0} (B, \Phi)$
Напряженность магнитного поля	H	$\sqrt{4\pi\mu_0} H$
Магнитный момент, намагниченность	\mathfrak{M}, I	$\sqrt{\mu_0/4\pi}, (\mathfrak{M}, I)$
Электрическая проницаемость, магнитная проницаемость (относительные)	ϵ, μ	ϵ, μ
Электрическая поляризуемость, магнитная восприимчивость	α, κ	$(4\pi)^{-1} (\alpha, \kappa)$
Удельная проводимость	λ	$\lambda/(4\pi\epsilon_0)$
Сопротивление	R	$4\pi\epsilon_0 R$
Емкость	C	$(4\pi\epsilon_0)^{-1} C$
Индуктивность	L	$(4\pi/\mu_0) L$

5. О фотонах и электронах

Фотон – элементарная частица, квант электромагнитной энергии.

Свойства фотона

1. Масса покоя m_{Φ} и энергия покоя $W_{0\Phi}$ фотона всегда равны нулю:

$$m_{\Phi} = 0, \quad W_{0\Phi} = 0$$

2. Скорость фотона всегда равна скорости света в вакууме $v_{\Phi} = c$.

3. Фотон обладает энергией $W_{\Phi} = \hbar\omega$.

4. Фотон обладает импульсом $\vec{p}_{\Phi} = \hbar\vec{k}$.

5. Фотон имеет момент импульса (спин) $|\vec{L}_{\Phi}| = \hbar$.

Фотон имеет длину волны $\lambda = 2\pi c / \omega$.

5. О фотонах и электронах

Электрон – элементарная частица, обладает отрицательным элементарным электрическим зарядом e , имеет спин $\hbar/2$ и характеризуется двумя величинами, имеющими размерность длины: классическим радиусом r_0 и комптоновской длиной волны λ .

Классический радиус определяется из равенства энергии покоя $W_0 = mc^2$ и энергии электростатического поля $W_e = e^2/(4\pi\epsilon_0 r_0)$:

$$W_0 = W_e \Rightarrow mc^2 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_0} \Rightarrow$$

$$r_0 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 mc^2} \approx 2,8 \cdot 10^{-15} \text{ м.}$$

5. О фотонах и электронах

Комптоновская длина волны $\hat{\lambda}$ определяется из равенства энергии покоя $W_0 = mc^2$ и энергии осцилляций $W_o = \hbar\omega_0$:

$$W_0 = W_o \Rightarrow mc^2 = \hbar\omega_0 \Rightarrow \omega_0 = \frac{mc^2}{\hbar} \Rightarrow$$

$$\hat{\lambda} = \frac{c}{\omega_0} = \frac{\hbar}{mc} \approx 3,9 \cdot 10^{-13} \text{ м.}$$

Отношение этих длин равно некоторой величине α , которая называется **«постоянная тонкой структуры»**:

$$\alpha = \frac{r_0}{\hat{\lambda}} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \approx \frac{1}{137}.$$

5. О фотонах и электронах

Постоянная тонкой структуры, $(1/\alpha) = 137,036004\dots$, определяет соотношение размеров физических объектов микромира, что, образно говоря, может быть использовано как некая условная характеристика для «этажей» здания микромира (таблица 1).

	Характерный размер	Степень $(1/\alpha)$ – «этаж» микромира
Классический радиус электрона	$r_0 \approx 2,8 \cdot 10^{-13}$ см	$(1/\alpha)^0$ «Фундамент»
Комптоновская длина волны электрона	$\hat{\lambda} = r_0/\alpha$	$(1/\alpha)^1$ «Первый этаж»
Боровский радиус атома водорода	$r_B = r_0/\alpha^2$	$(1/\alpha)^2$ «Второй этаж»
Порядок размера длины волны, испускаемой атомами	$\lambda = 4\pi r_0/\alpha^3$	$\sim (1/\alpha)^3$ «Третий этаж»

6. Принцип наименьшего действия

В квантовой теории в уравнении Шредингера используется понятие «гамильтониан», которое в несколько изменённом виде заимствовано из классической механики. Рассмотрим это подробнее.

Известно, что наряду с формулировкой классической механики на основе законов Ньютона, использующих понятие силы, возможны также и другие подходы:

1. На основе функции Лагранжа.
2. На основе функции Гамильтона.

Для области квантовой и оптической электроники наиболее удобным оказалось использование функции Гамильтона. Ценность этого подхода заключается в том, что в отличие от понятия силы, которое неприменимо, в квантовой механике, понятие функции Гамильтона в несколько видоизменённом виде остаётся там справедливым, поэтому гамильтонова формулировка допускает ¹⁵ обобщение на случай описания явлений микромира.

6. Принцип наименьшего действия

Для формулировки классической механики на основе функции Лагранжа вводится понятие «действие» S , его приращение:

$$dS = (T - U)dt ,$$

где T – кинетическая энергия, U – потенциальная энергия, t – время.

Информация для размышления:

$$dS = (T - U)dt = \frac{1}{2}mv^2 dt - Udt = \frac{1}{2}mv \frac{dx}{dt} dt - Udt = \frac{1}{2}pdx - Udt$$

Разность энергий называется функцией Лагранжа:

$$T - U = L(q, \dot{q}, t)$$

где q – обобщённая координата, \dot{q} – её производная по времени.

Здесь для наглядности и упрощения записи формул предполагается, что система обладает одной степенью свободы.

6. Принцип наименьшего действия

Интегрируя получаем формулу для действия в виде:

$$S = \int L(q, \dot{q}, t) dt$$

Изменение S при замене $q(t)$ на $q(t) + \delta q(t)$ составляет

$$\delta S = \int_{t_1}^{t_2} L(q + \delta q, \dot{q} + \delta \dot{q}, t) dt - \int_{t_1}^{t_2} L(q, \dot{q}, t) dt$$

Разложим в ряд выражение в первом интеграле

$$\int_{t_1}^{t_2} L(q + \delta q, \dot{q} + \delta \dot{q}, t) dt = \int_{t_1}^{t_2} \left[L(q, \dot{q}, t) + \frac{\partial L}{\partial q} \delta q + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \delta \dot{q} \right] dt$$

подставим это выражение в предыдущее и произведём варьирование, т.е. положим $\delta S = 0$. В результате получим

$$\int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{\partial L}{\partial q} \delta q + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \delta \dot{q} \right) dt = 0$$

6. Принцип наименьшего действия

Учитывая, что $\delta\dot{q} = \frac{\partial}{\partial t} \delta q$ после преобразований получаем уравнение Лагранжа:

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = 0$$

Уравнение Лагранжа и уравнение Ньютона

Рассмотрим движущуюся частицу, обладающую как кинетической, так и потенциальной энергией. В этом случае функция Лагранжа имеет вид:

$$L = \frac{m\dot{q}^2}{2} - U$$

Подставляя эту функцию в уравнение Лагранжа, и учитывая, что $-\frac{\partial}{\partial q} U = F$, $\dot{q} = v$, где F – сила, v – скорость, получаем формулу:

$$\frac{\partial}{\partial t} (mv) = F$$

Полученная формула выражает **второй закон Ньютона**.

7. Функция Гамильтона и гамильтониан

Рассмотрим теперь **функцию Гамильтона**.

Она определяется следующим образом

$$H(p, q, t) = T + U = 2T - L$$

Для системы частиц функция Гамильтона имеет вид:

$$H(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_n; \vec{p}_1, \dots, \vec{p}_n; t) = \sum_{i=1}^n \frac{\vec{p}_i^2}{2m_i} + U(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_n, t)$$

В классической механике уравнения движения в дифференциальной форме с использованием функции Гамильтона (для одномерного случая) имеют следующий вид:

$$\boxed{\frac{dx}{dt} = \frac{\partial H}{\partial p}}$$

$$\boxed{\frac{dp}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x}}$$

7. Функция Гамильтона и гамильтониан

Уравнения Гамильтона – это система дифференциальных уравнений первого порядка. Фактически функция Гамильтона описывает распределение полной энергии системы частиц в пространстве в каждый момент времени.

Уравнения Гамильтона и уравнение Ньютона

Для одной частицы функция Гамильтона имеет вид:

$$H = \frac{\vec{p}^2}{2m} + U(x)$$

Из первого уравнения следует тождество:

$$\frac{dx}{dt} = v = \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{p^2}{2m} + U \right) = \frac{p}{m} = v$$

второе уравнение даёт:

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{2m} + U \right) = -\frac{\partial U}{\partial x} = F$$

— это уравнение второго закона Ньютона для частицы.

7. Функция Гамильтона и гамильтониан

В квантовой механике основным является уравнение

Шредингера:

$$j\hbar \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi + U \Psi,$$

где $\Psi = \Psi(\vec{r}, t)$ — волновая функция микрочастицы,

$U = U(\vec{r}, t)$ — силовая функция, $\vec{r} = (x, y, z)$ — пространственная

координата, и t — время, $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ — оператор Лапласа

(записан в декартовых координатах), m — масса микрочастицы,

\hbar — постоянная Планка, $j = \sqrt{-1}$ — мнимая единица.

Часто уравнение Шредингера записывают в символической форме:

$$j\hbar \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \hat{H} \Psi$$

где $\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + U$ — оператор, называемый оператором

Гамильтона, или **гамильтонианом**, он представляет собой в

операторной форме сумму кинетической и потенциальной

энергий квантовой системы.

7. Функция Гамильтона и гамильтониан

Если в классической механике для описания распределения энергии в системе частиц используется функция Гамильтона, то в квантовой механике – оператор Гамильтона – **гамильтониан**.

Приём, связанный с заменой величины её оператором вообще характерен для перехода от классического описания системы частиц к квантово-механическому описанию этой системы.

Гамильтониан, также как и функция Гамильтона, имеет размерность, выраженную в единицах энергии. Волновая функция в этом случае позволяет определить энергию квантово-механической системы в заданной точке пространства в каждый момент времени.

8. Литература

1. **Пяхтин, А. Н.**
Оптическая и квантовая электроника: Учеб. для вузов/
А. Н. Пяхтин. — М.: Высш. шк., 2001. — 573 с.: ил.
2. **Ю. Айхлер, Г.-И. Айхлер**
Лазеры. Исполнение, управление, применение
Москва: Техносфера, 2008. — 440с. ISBN 978-5-94836-167-3
3. **Дулкин В. И., Пахомов Л. Н.**
Квантовая электроника. Приборы и их применение: Учеб. пособие
Москва: Техносфера, 2006.- 432с. ISBN 5-94836-076-8
4. **Пойзнер Б.Н.** **Физические основы лазерной техники: Учебное пособие. — Томск: Томский государственный университет, 2006. — 210 с.**