

# Оптоэлектронные и квантовые приборы и устройства

Лекция 1:

**В.М. Шандаров**

Томский государственный университет систем  
управления и радиоэлектроники

# Распределение учебного времени

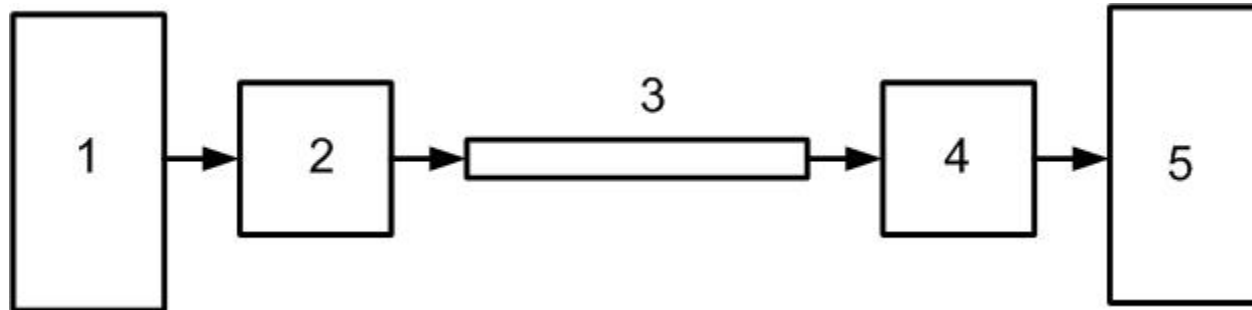
Лекции:	26 часов (6 семестр)
Практические занятия:	16 часов (6 семестр)
Лабораторные занятия:	16 часов (6 семестр)
Курсовая работа:	-
Самостоятельная (внеаудиторная) работа:	48 часов
Общая трудоемкость:	144 часов
<b>Экзамен:</b>	<b>6 семестр</b>

# Задачи курса

- **Основные задачи** изучения дисциплины:
- - изучение физических основ, принципов работы и построения оптоэлектронных и квантовых элементов, устройств и приборов, используемых в оптических системах;
- - изучение характеристик и параметров важнейших приборов и устройств, используемых в оптических системах связи.

К числу таких приборов и компонентов относятся **оптические квантовые генераторы и усилители, оптические модуляторы, фотоприемные устройства, нелинейно-оптические элементы, голографические и интегрально-оптические компоненты.**

# Схема волоконно-оптической системы



- 1, 5 – электронные блоки передающей и приемной частей;
- 2 – оптический излучатель с устройством модуляции излучения;
- 3 – волоконно-оптическая линия;
- 4 – фотоприемный элемент.

# Студенты должны:

- -знать физические основы оптоэлектронных и квантовых приборов;
- -знать устройство, особенности, основные характеристики и параметры изучаемых приборов;
- -знать основы нелинейной оптики, включая солитоны и голографию;
- -знать достоинства интегральной оптики и особенности построения ее элементов;
- -уметь критически и обосновано подходить к выбору различных оптоэлектронных и квантовых приборов и устройств для конкретных систем оптической связи, сопоставляя особенности используемых материалов и параметры приборов;
- -получить навыки практической работы с макетами различных лазеров, модуляторов, дефлекторов и других устройств.

# Разделы дисциплины

## Разделы дисциплины и виды занятий

№ п.п.	Раздел дисциплины	Лекции	ЛР	Практ.
1	Введение	1	-	-
2	Физические основы и особенности квантовых приборов	3	-	-
3	Оптические резонаторы и селекция мод	2	4	2
4	Типы и режимы работы лазеров	4	6	4
5	Материалы полупроводниковой микро- и оптоэлектроники. Гетеропереходы.	2	-	-
			-	2
6	Полупроводниковые источники излучения	4	4	4
7	Методы модуляции и управления оптическим излучением	2	-	4
8	Фотодиоды и фотоприемные устройства	2	-	-
9	Оптическое управление СВЧ устройствами	1	-	-
10	Элементы интегральной оптики (ИО). Основы нелинейной оптики.	4	4	2
	Физические основы голографии.		-	-
11	Основы применения оптоэлектронных и квантовых приборов в инфокоммуникационных технологиях и системах связи	1	-	-

# Литература

## Основная

1. **А.Н. Пихтин. Квантовая и оптическая электроника. – М: Абрис. 2012, 656 с. (42)**
2. С.М. Шандаров, А.И. Башкиров. Введение в квантовую и оптическую электронику: Учебное пособие / Федеральное агентство по образованию, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. - Томск: ТУСУР, 2007. – 93 [1] с. **(80)**

## Дополнительная

**1д.** В.М. Шандаров. Основы физической и квантовой оптики. – Томск: Томск. гос. Ун-т систем упр. и радиоэлектроники, [Электронный ресурс]: учебное пособие- Томск: ТУСУР, 2012. – 197 с. Режим доступа: <http://edu.tusur.ru/training/publications/750>

# Рождение квантовой физики

В физике в конце XIX - начале XX веков классический подход не позволял разрешить следующие проблемы:

- проблему теоретического описания излучения абсолютно черного тела;
- проблему фотоэлектрического эффекта, в частности существования красной границы фотоэффекта;
- проблему объяснения стабильности и размера атомов.



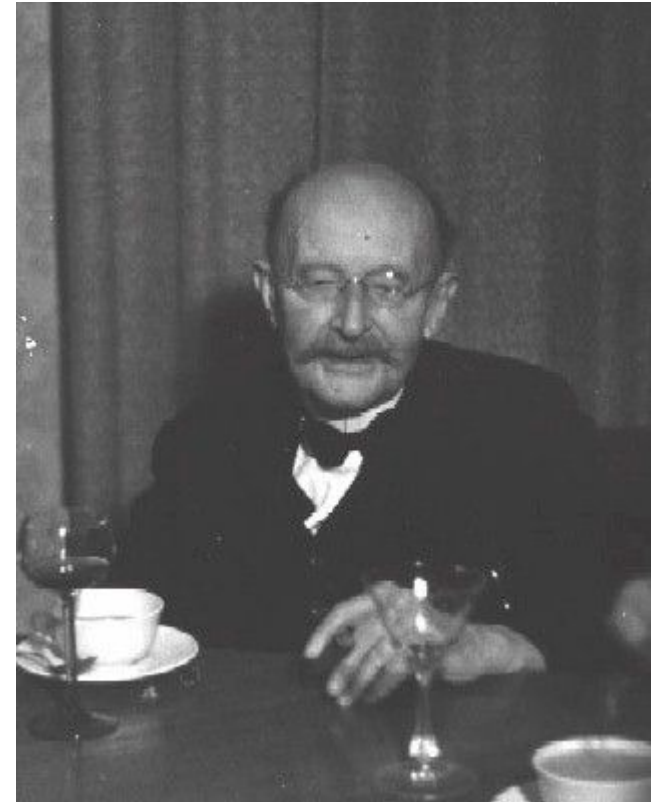
# Рождение квантовой физики

- Основная причина невозможности разрешения данных вопросов с позиций классической физики:

классическая электродинамика  
успешно объясняет лишь те оптические  
явления, где несущественна структура  
элементарных процессов  
взаимодействия излучения с  
веществом.

# Постоянная Планка

- В 1900 г. М. Планк получил выражение для распределения мощности излучения абсолютно черного тела по частотам, которое давало хорошее согласие теории с экспериментом как для низких, так и для высоких частот.
- Это решение могло быть получено только в предположении, что электромагнитное излучение испускается не непрерывно, а в виде порций энергии – квантов энергии.



**Макс Планк** (1858-1947) (Макс Карл Эрнест Людвиг) — немецкий физик, один из основоположников квантовой теории, иностранный член-корреспондент Петербургской АН (1913) и почетный член АН СССР (1926). Нобелевская премия (1918).

# Постоянная Планка

- Энергия кванта  $W$  по Планку пропорциональна частоте излучения:

$$W = h\omega$$

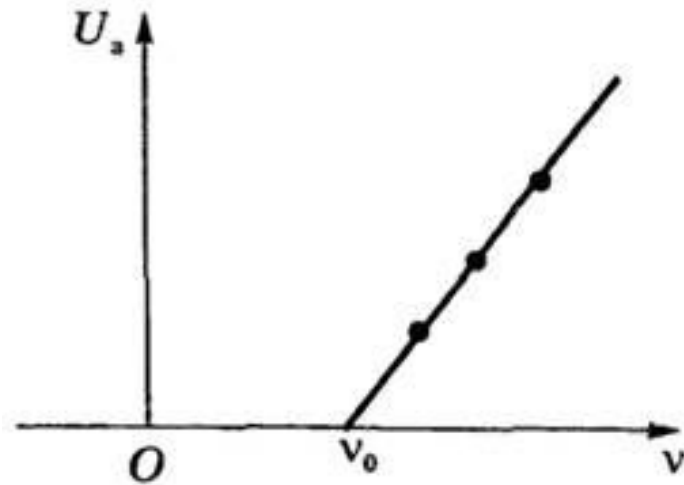
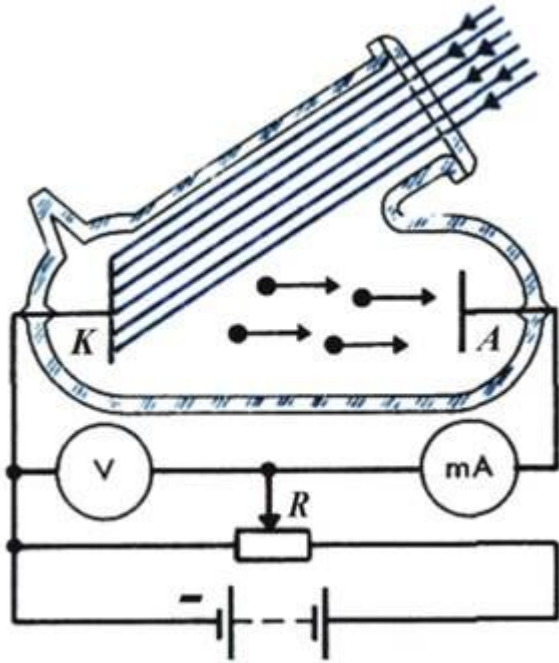
где  $h=1,05 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка.

Сообщение Планка о своей работе на съезде Немецкого физического общества в Берлине 14 декабря 1900 года, по сути, знаменовало день рождения квантовой физики.

# Постоянная Планка+вклад А. Эйнштейна

- *В 1905 году А. Эйнштейн* пришел к выводу, что монохроматическое излучение состоит из взаимно независимых квантов энергии, исходя из результата Планка. Для обоснования этой гипотезы Эйнштейн провел, в частности, анализ фотоэффекта (в экспериментах впервые наблюдавшегося Столетовым). **Представление о квантах энергии объясняло явление “красной границы фотоэффекта”.**

# «Красная граница» фотоэффекта



Формула Эйнштейна для фотоэффекта:

$$W_k = h \cdot \omega - A$$

$W_k$  – кинетическая энергия фотоэлектрона;  $A$  – работа выхода

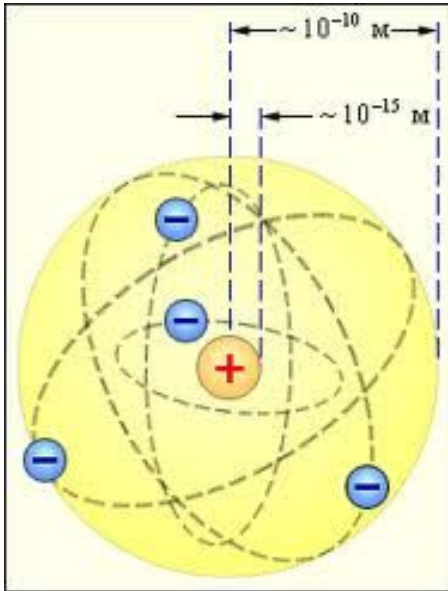
# Вклад А.Эйнштейна

- Эйнштейн постулировал также, что каждый квант обладает импульсом

$$\bar{p} = h \cdot \bar{k} \quad \text{где } \bar{k} \text{ – волновой вектор}$$

**Фактически, заключения Планка и Эйнштейна означали, что свет (или его элементарные частицы – фотоны, энергия которых определяется величиной кванта) в определенных ситуациях может проявлять свойства механических частиц.**

# Постулаты Бора



**В 1913 году датский физик Нильс Бор предложил теорию атома водорода. В ее основе лежали два постулата:**

- 1. Наличие разрешенных орбит, находясь на которых, электроны, вопреки требованиям классической электродинамики, не испускают излучения.*
- 2. Испускание или поглощение энергии происходит при переходе электрона с одной разрешенной орбиты на другую, или, иначе говоря, при переходе атома с одного энергетического уровня на другой.*

# Правило частот Бора

$$h\omega = E_n - E_m$$

**Теория Бора явилась важным шагом в развитии квантовой физики. Одной из ее ошибок было постулирование определенных (фиксированных) орбит электронов. В последовательной квантовой теории таких орбит нет, но есть энергетические уровни и правило частот Бора.**



# Корпускулярно – волновой дуализм

- В 1924 году Луи де Бройль (под впечатлением положения о двойственности природы света) высказал идею о том, что квантовые соотношения Планка и Эйнштейна  $W = h\omega$  и  $\bar{p} = h \cdot \bar{k}$ , характеризующие свет, справедливы и для всех материальных частиц.
- В соответствии с этой идеей де Бройль связал движение свободной частицы с волновой функцией:

$$\psi = A \cdot \exp[i(\omega t - \bar{k} \cdot \bar{r})] = A \cdot \exp[i(\omega t - k \cdot \xi)]$$

# Корпускулярно – волновой дуализм

Волновую функцию можно записать также в виде:

$$\psi = A \cdot \exp \left[ i \left( \frac{W}{h} \cdot t - \frac{p}{h} \cdot \xi \right) \right]$$

поскольку  $p = h \cdot k = \frac{2\pi}{\lambda} h$  и  $\omega = \frac{W}{h}$

Это выражение соответствует плоской волне и называется волной де Бройля.  $\lambda$  называют длиной волны де Бройля.

Движению свободной частицы соответствует волновой процесс с длиной волны  $\lambda = 2\pi \cdot h/p$  и частотой колебаний  $\omega = W/h$ , т.е. волновые характеристики частицы связаны с ее динамическими характеристиками  $W$  и  $p$ .

# Физическая интерпретация волн де Бройля

## Гипотезы по интерпретации волн де Бройля:

По одной, волны де Бройля представлялись в виде волн материи.

Согласно другой, частицы представлялись в виде пакетов волн.

В конце концов, стало ясно, что **волновые функции де Бройля имеют лишь статистический, вероятностный смысл.** Такая интерпретация была предложена немецким физиком Максом Борном.

Согласно М.Борну, вероятность локализации частицы в момент  $t$  в элементе  $dV$ :

$$dF = |\Psi(x, y, z, t)|^2 dV$$

$$F = \int_V |\Psi(x, y, z, t)|^2 dV$$

# Соотношения неопределенностей

Вероятностная трактовка физического смысла волновой функции  $\psi$  показывает, что координаты движущейся частицы для наблюдателя оказываются неопределенными. Можно говорить лишь о вероятности нахождения частицы в некоторой области пространства.

Возможная точность одновременного измерения координаты и импульса частицы определяется соотношением Гейзенберга:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \approx h$$

Аналогичное соотношение для энергии – времени:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h,$$

где  $\Delta E$  и  $\Delta t$  – неопределенность значения энергии и времени нахождения частицы в состоянии с такой энергией.



# Уравнение Шредингера

Важную роль в квантовой физике играет волновая теория квантовых явлений, сформулированная немецким физиком Эрвином Шредингером в 1926 г. Это феноменологическая теория, основанная на двух достаточно сильных допущениях.

Во – первых, полагается, что в рассматриваемых явлениях не рождаются или исчезают частицы (число частиц данного типа остается постоянным).

Во – вторых, в нерелятивистской теории Шредингера полагается, что скорость частиц много меньше, чем скорость света.

# Уравнение Шредингера

К уравнению Шредингера можно прийти, основываясь на формальной аналогии между видом волновой функции для волн де Бройля и выражением для поля плоской электромагнитной волны. Это можно сделать и более строго.

**В классической электродинамике плоские волны являются простейшим решением волнового уравнения:**

$$\frac{d^2 E}{dx^2} + k^2 E = 0 \quad \longrightarrow \quad E = A \cdot \exp[i(\omega t - kx)]$$

---

$$\psi = A \cdot \exp\left[i\left(\frac{W}{h}t - \bar{k} \cdot \bar{r}\right)\right] = A \cdot \exp\left[i\left(\frac{W}{h}t - k_x x - k_y y - k_z z\right)\right]$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + k^2 \psi = 0$$

# Уравнение Шредингера

$$\nabla^2 \Psi + k^2 \Psi = 0 \qquad k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2$$

Для свободной частицы  $k^2 = p^2 / \hbar^2$

$$p^2 = m^2 v^2 = 2m \cdot \frac{mv^2}{2} = 2m \cdot W_k$$

Тогда волновое уравнение можно представить в форме:

$$\nabla^2 \psi + \frac{2m}{\hbar^2} W_k \cdot \psi = 0$$

Это уравнение характеризует волновые свойства свободной частицы с массой  $m$ . Важный случай соответствует движению частицы в потенциальном поле внешних сил).

# Уравнение Шредингера

В этом случае ее кинетическая энергия равна:

$$W_k = W - U$$

где  $W$  – полная энергия, а  
энергия частицы.

$U = U(x, y, z)$  потенциальная

$$\nabla^2 \psi + \frac{2m}{\hbar^2} (W - U) \psi = 0$$

Это уравнение записано для случая гармонической временной зависимости или для состояния частицы с заданной энергией. Его называют уравнением Шредингера для стационарных состояний.



# Уравнение Шредингера

Для получения более общей формы этого уравнения для волновой функции в виде:

$$\psi(\vec{r}, t) = \exp(i \frac{W}{h} t) \cdot \psi_0(\vec{r})$$

Продифференцируем ее по времени t:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = i \frac{W}{h} \cdot \exp(i \frac{W}{h} t) \cdot \psi_0(\vec{r}) = i \frac{W}{h} \cdot \psi(\vec{r})$$

Отсюда получим:  $W\psi = -ih \frac{\partial \psi}{\partial t}$

Подставив это в уравнение Ш. для стационарных состояний, найдем:

# Уравнение Шредингера

$$\left[ \frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 - U \right] \psi = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}$$

Это соотношение справедливо и при произвольной зависимости  $\psi(t)$ . Оно является более общим и описывает, в том числе, и системы с произвольно изменяющейся во времени волновой функцией.

Из физических соображений ясно, что волновая функция, которую называют также функцией состояния квантовой системы, должна быть однозначной, конечной и непрерывной функцией пространственных координат и времени.