

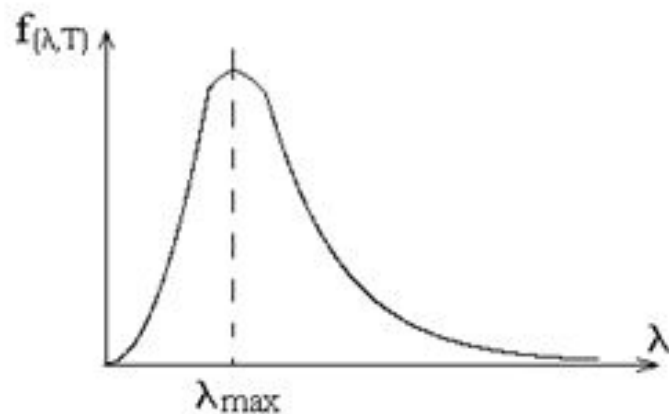
# Квантовые свойства электромагнитного излучения

В 1900 году Макс Планк выдвинул гипотезу о том, что обмен энергией между веществом и излучением происходит не непрерывным образом, а путем передачи дискретных и неделимых порций или квантов энергии.

Планк показал, что квант энергии пропорционален частоте излучения и получил согласующееся с экспериментом выражение для спектрального распределения энергии по длинам волн (частотам), выбирая соответствующим образом постоянную пропорциональности. Эта постоянная  $h$  с тех пор называется постоянной Планка.

# Гипотеза М. Планка

Экспериментально полученное распределение энергии по длинам волн (функция Кирхгофа) для излучения абсолютно черного тела (рисунок 1) совпало с теоретической функцией, предложенной Планком (1)



$$f(\lambda, T) = \frac{4\pi^2 c^2 \hbar}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{2\pi c \hbar}{k T \lambda}} - 1} \quad (1)$$

Рисунок 1. Зависимость спектральной плотности энергетической светимости от длины волны  $\lambda$ .

# Закон Стефана – Больцмана

Энергетическая светимость абсолютно черного тела (полностью поглощает упавшее на него излучение всех длин волн) прямо пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры.

$$R_T = \sigma T^4 \quad (2)$$

$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Вт м}^{-2} \text{ К}^{-4}$  постоянная Стефана–Больцмана.

# Закон смещения Вина

Длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела, обратно пропорциональна его абсолютной температуре.

$$\lambda_{\max} = b/T \quad (3)$$

$b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$  – постоянная Вина.

Пример 1. На какую длину волны приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела при температуре  $t = 17^\circ\text{C}$ ?

# Свойства фотонов

Фотон – минимальная порция электромагнитного излучения. Фотон обладает импульсом, движется со скоростью равной скорости света. Фотон не имеет массы покоя. Направление импульса фотона (4) совпадает с направлением его волнового вектора (вектор фазовой скорости световой волны)

$$p = \hbar k, \quad k = 2\pi/\lambda \quad (4)$$

Пример 2. Чему равен импульс фотона, длина волны которого соответствует фиолетовому цвету?

# Импульс и энергия фотонов

Фотон – минимальная порция электромагнитного излучения. Фотон обладает импульсом, движется со скоростью равной скорости света. Фотон не имеет массы покоя. Направление импульса фотона совпадает с направлением его волнового вектора (вектор фазовой скорости световой волны).

$$p = \hbar k, \quad k = 2\pi/\lambda \quad (4)$$

Энергия фотонов рассчитывается по формуле Планка:

$$E = h\nu$$

Пример 2. Чему равен импульс фотона, длина волны которого соответствует фиолетовому цвету?

# Фотоэффект

Внешним фотоэффектом называется испускание электронов с поверхности металлов под действием света. Фотоэффект объясняется взаимодействием фотонов со свободными электронами металлов. Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2} \quad (5)$$

Внутренний фотоэффект – явление перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости (электроны становятся свободными).

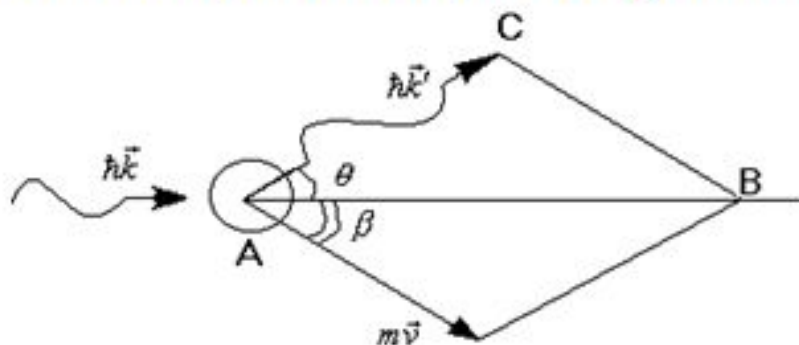
## Законы фотоэффекта

1. Закон Столетова. Существует граничная частота, ниже которой для данного материала катода фотоэффект отсутствует независимо от плотности светового потока энергии и продолжительности облучения катода. Эта граничная частота называется красной границей фотоэффекта. Значение этой границы зависит только от рода атомов. Энергия, которую нужно затратить, чтобы вырвать электрон из вещества, называется работой выхода.
2. Закон фотоэффекта. Максимальная энергия фотоэлектрона, покидающего катод, не зависит от плотности энергии светового потока и линейно зависит от частоты.
3. Закон фотоэффекта. При фиксированной частоте излучения число электронов, выбиваемых из катода в единицу времени, прямо пропорционально плотности светового потока энергии.



# Эффект Комптона

Комптон, исследуя рассеяние рентгеновских лучей различными веществами, обнаружил, что в рассеянных лучах наряду с излучением первоначальной длины волны содержатся также лучи большей длины. Разность длин волн оказалась зависящей только от угла, образуемого направлением рассеянного пучка с направлением первичного пучка. От длины волны и от природы рассеивающего вещества разность длин волн не зависит.



# Эффект Комптона

Данный эффект можно объяснить, рассматривая рассеяние как процесс упругого столкновения рентгеновских фотонов с практически свободными электронами вещества, при котором выполняются законы сохранения импульса и энергии:

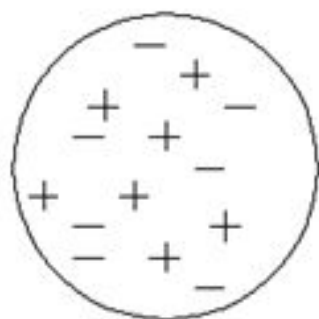
$$\hbar\vec{k} = m\vec{v} + \hbar\vec{k}' \quad (6)$$

$$h\nu + m_0c^2 = h\nu' + mc^2 \quad (7)$$

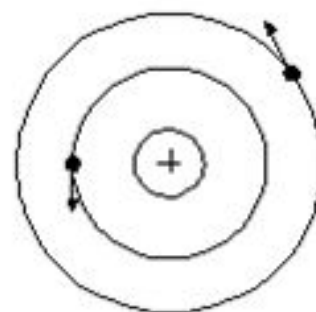
$$\Delta\lambda = \lambda_c(1 - \cos\theta) \quad (8)$$

где  $\lambda_c = \frac{2\pi\hbar}{m_0c} = 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м}$  — КОМПТОНОВСКАЯ ДЛИНА ВОЛНЫ электрона.

# Ядерная модель атома



Модель Томпсона



Модель Резерфорда

В модели Томпсона («кекс») атом представляет собой непрерывно распределённый в пространстве положительный заряд, в который были вкраплены отдельные отрицательные заряды. Электроны взаимодействуют с элементами положительно заряженной среды атома по закону Кулона.

# Ядерная модель атома

Благодаря этому возникают колебания электронов. Колебания электронов обуславливают излучение атомов. При отклонении электрона от положения равновесия, возникают силы, которые стремятся вернуть его в положение равновесия.

Модель Резерфорда (планетарная модель атома), приписывала атому строение, аналогичное строению Солнечной системы: в центре находится положительно заряженное ядро, вокруг которого, подобно планетам, движутся электроны, удерживаемые у ядра силами кулоновского притяжения.

# Ядерная модель атома

При всём удобстве планетарной модели атома по Резерфорду, очевидна её неустойчивость. Действительно, электроны движутся по орбитам с центростремительным ускорением. Тогда в соответствии с электродинамикой Максвелла, они должны непрерывно излучать. Но тогда они теряли бы энергию и, в конце концов, упали бы на ядро. Расчёты показали, что такой процесс «схлопывания» атома произошёл бы очень быстро. Чтобы разрешить возникшее противоречие, Нильс Бор выдвинул следующие требования к атомной излучающей системе, которые впоследствии называли постулатами Бора.

# Постулаты Бора

1. Электрон в атоме может находиться только в одном из дискретных стационарных состояний, удовлетворяющих правилу квантования ( $n$  – главное квантовое число):  $L = mv_n r_n = n\hbar$  (9). При этом излучение и поглощение энергии атомом не происходит.

2. При переходе атома из одного состояния с энергией  $E_n$  в состояние с энергией  $E_m$  происходит излучение кванта света, если  $E_n > E_m$  или его поглощение, если  $E_n < E_m$ . Частота излучения (поглощения) пропорциональна разности энергий этих состояний:

$$\nu = \frac{E_n - E_m}{h} \quad (10)$$

# Постулаты Бора

Энергию стационарных состояний атома, а также радиусы орбит и скорость движения на них электронов можно рассчитать используя правило квантования и закон динамики движения :

$$r_n = \frac{(n\hbar)^2}{ke^2 m_e} \quad (11)$$

$$E_n = - \frac{k^2 m_e e^4}{2\hbar^2} \frac{1}{n^2} \quad (12)$$

$$v_n = \frac{ke^2}{\hbar} \frac{1}{n} \quad (13)$$

# Структура энергетических уровней атома водорода

Расчет длин волн спектральных линий, возникающих при переходах электрона из одного стационарного состояния (с номером  $n_1$ ) в другое (с номером  $n_2$ ):

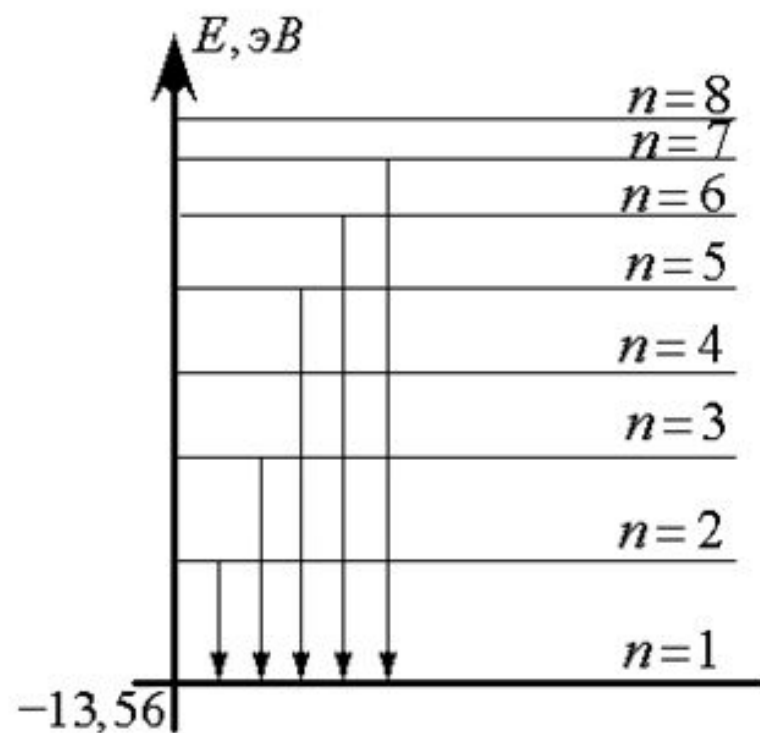
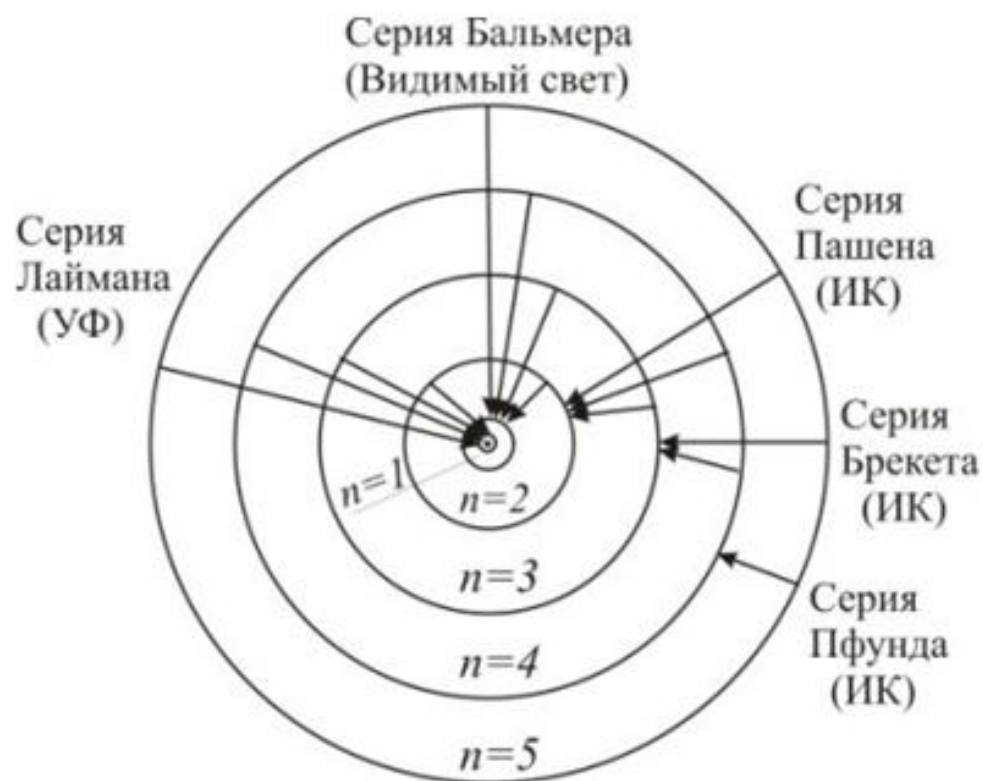
$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right) \quad (14)$$

где  $R = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$  – постоянная Ридберга.

При этом возникает несколько спектральных серий (групп линий) в зависимости от номера энергетического уровня  $n_2$ , на который переходит электрон:  $n_2 = 1$  – серия Лаймана,  $n_2 = 2$  – серия Бальмера,  $n_2 = 3$  – серия Пашена,  $n_2 = 4$  – серия Брэкетта,  $n_2 = 5$  – серия Пфундта.



# Серии спектральных линий при переходах электрона между энергетическими уровнями в атоме водорода



# Спектры испускания и поглощения атомов

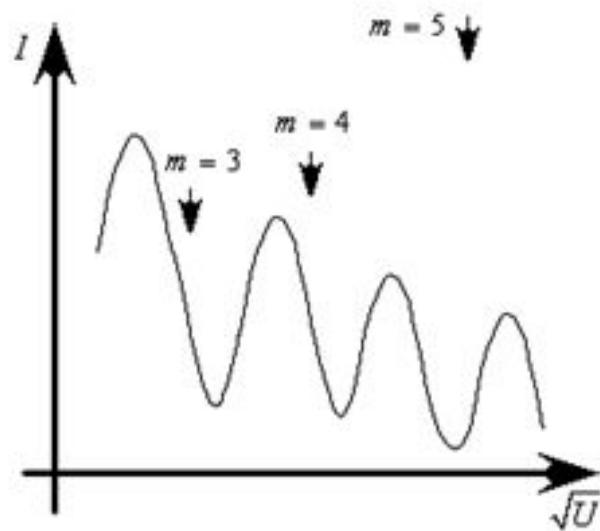
Все спектры (испускания, поглощения) делятся на линейчатые, полосатые и сплошные. Чем проще структура вещества, тем разрежённей его спектр. С другой стороны, чем меньше электронов содержит вещество, тем проще его спектр.

Линейчатые спектры характерны для атомов определённых веществ. Полосатые спектры дают молекулы газа в разряженном состоянии. Сплошным спектром обладает газ при высокой температуре или жидкость, а также твёрдые тела.

Доказательством дискретности внутренней энергии атома послужили опыты Франка и Герца, подтвердившие постулаты Бора.

# Дифракция электронов

Классическими опытами, в которых были обнаружены волновые свойства частиц, являются опыты Девисона и Джермера (1927 г.). В них наблюдалась дифракция электронов, рассеянных на грани кристалла.



Интенсивность пучка отражённых электронов измерялась по силе тока между источником и детектором.

Полученные зависимости соответствовали зависимостям, которые можно было бы получить, если бы исследовалась дифракция электромагнитной волны.

# Гипотеза де Бройля

Корпускулярно-волновой дуализм не является особенностью одних только оптических явлений, но имеет универсальное значение. По предположению де Бройля движение электрона или какой-либо другой частицы связано с волновым процессом, длина волны и частота которого:

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{p} = \frac{2\pi\hbar}{mv} \quad (15)$$

$$\omega = \frac{E}{\hbar}; \quad \nu = \frac{E}{h} \quad (16)$$

# Соотношение неопределенностей Гейзенберга

Своеобразие свойств микрочастиц проявляется в том, что электрон (и любая другая микрочастица) не может иметь одновременно точных значений координаты  $x$  и компоненты импульса  $p_x$ . Неопределенности значений  $x$  и  $p_x$  (канонически сопряженные величины как и  $\Delta E$  и  $\Delta t$ ) удовлетворяют соотношениям:

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2} \quad (17)$$

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2} \quad (18)$$

# Уравнение Шредингера

Состояние микрочастицы в квантовой механике характеризуется так называемой волновой функцией, обозначаемой буквой  $\Psi$  (пси). Вид этой функции получается из решения уравнения Шредингера:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi + U\Psi = i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (19)$$

Здесь  $m$  – масса частицы,  $U$  – ее потенциальная энергия,  $i$  – мнимая единица,  $\Delta$  – оператор Лапласа,  $\Psi = \Psi(x, y, z, t)$  – функция координат и времени.

# Уравнение Шредингера

Если силовое поле, в котором движется частица, стационарно, т.е.  $U$  не зависит явно от времени, то уравнение переходит в более простое уравнение Шредингера для стационарных состояний:

$$\Delta\Psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U)\Psi = 0 \quad (20)$$

Здесь  $\Psi = \Psi(x, y, z)$  – функция координат. Решения данного уравнения и рассматривает квантовая механика. Согласно Борну квадрат модуля волновой функции дает плотность вероятности нахождения частицы в соответствующем месте пространства (в данном квантовом состоянии).

# Уравнение Шредингера

В соответствии с этим для волновой функции должно выполняться условие нормировки:

$$\int_0^{\infty} \Psi \Psi^* dV = 1 \quad (21)$$

$\Psi^*$  – комплексно сопряжённая функция. В соответствии со своим смыслом волновая функция должна быть однозначной, конечной, непрерывной и иметь непрерывную и конечную производную. Совокупность этих требований носит название стандартных условий. Уравнение Шредингера имеет решения, удовлетворяющие стандартным условиям, лишь при некоторых избранных значениях энергии  $E$  (собственные значения энергии).



# Применение уравнения Шредингера

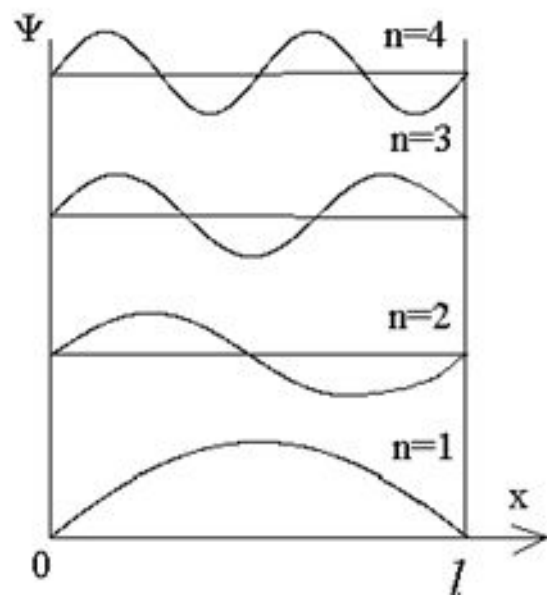
Решения, соответствующие собственным значениям энергии, называются собственными функциями частицы. Совокупность собственных значений энергии называется энергетическим спектром. Он может быть дискретным или сплошным. Нахождение собственных значений энергии и собственных функций частиц является основной задачей квантовой механики.

1. Частица в бесконечно глубокой одномерной потенциальной яме (частица может двигаться только вдоль оси  $x$  и ее движение ограничено непроницаемыми стенками в точках). Решая уравнение с использованием стандартных условий, можно получить собственные значения энергии частицы (дискретный спектр значений):

# Применение уравнения Шредингера

$$E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ml^2} n^2 \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (22)$$

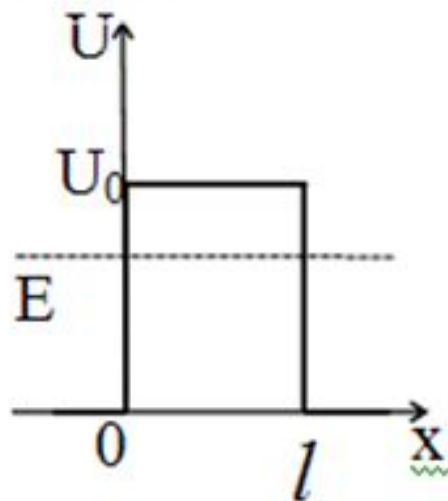
Нормированные собственные функции частицы в этом случае имеют вид (на рисунке показаны графики этих функций для разных  $n$ ):



$$\Psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin\left(\frac{\pi n x}{l}\right) \quad (23)$$

# Применение уравнения Шредингера

2. Прохождение частиц через потенциальный барьер. Пусть частица с энергией  $E$ , движущаяся слева направо вдоль оси  $x$ , встречает на своем пути потенциальный барьер высотой  $U_0$  и шириной  $l$ . Вероятность прохождения частицы через барьер (как при  $E > U_0$ , так и при  $E < U_0$ ) называется коэффициентом прозрачности  $D$  (24).



$$D \approx e^{-\frac{2}{\hbar} l \sqrt{2m(U_0 - E)}} \quad (24)$$

Правилами отбора называют ограничения и запрет на переходы между уровнями квантомеханической системы с поглощением или излучением фотона, наложенные законами сохранения и симметрией.

Спин – собственный момент импульса элементарных частиц, имеющий квантовую природу и не связанный с перемещением частицы как целого. Спином называют также собственный момент импульса атомного ядра или атома. Спин измеряется в единицах постоянной Планка.

Принцип Паули (принцип запрета) – один из фундаментальных принципов квантовой механики, согласно которому два и более тождественных фермиона (частицы с полуцелым спином) не могут одновременно находиться в одном и том же квантовом состоянии.

Принцип Паули также можно сформулировать следующим образом: в пределах одной квантовой системы, в данном квантовом состоянии, может находиться только один фермион, состояние другого должно отличаться хотя бы одним квантовым числом.

## Лазеры

Лазеры или оптические квантовые генераторы – это современные источники когерентного излучения, обладающие целым рядом уникальных свойств. Создание лазеров явилось одним из самых замечательных достижений физики второй половины XX века, которое привело к революционным изменениям во многих областях науки и техники. К настоящему времени создано большое количество лазеров с различными характеристиками – газовых, твердотельных, полупроводниковых, излучающих свет в различных оптических диапазонах. Лазеры могут работать в импульсном и непрерывном режимах. Мощность излучения лазеров может изменяться в пределах от долей милливатта до  $10^{12}$  –  $10^{13}$  Вт (в импульсном режиме).

Лазеры находят широкое применение в военной технике, в технологии обработки материалов, в медицине, оптических системах навигации, связи и локации, в прецизионных интерференционных экспериментах, в химии, просто в быту и т. д. Хотя первый оптический квантовый генератор был построен сравнительно недавно (1960 г.), современную жизнь уже невозможно представить без лазеров.

Одним из важнейших свойств лазерного излучения является чрезвычайно высокая степень его монохроматичности, недостижимая в излучении нелазерных источников. Это и все другие уникальные свойства лазерного излучения возникают в результате согласованного, кооперативного испускания световых квантов многими атомами рабочего вещества.