

*Частное учреждение образовательная организация  
высшего образования Медицинский университет “Реавиз”*



***Лекция***

***3***

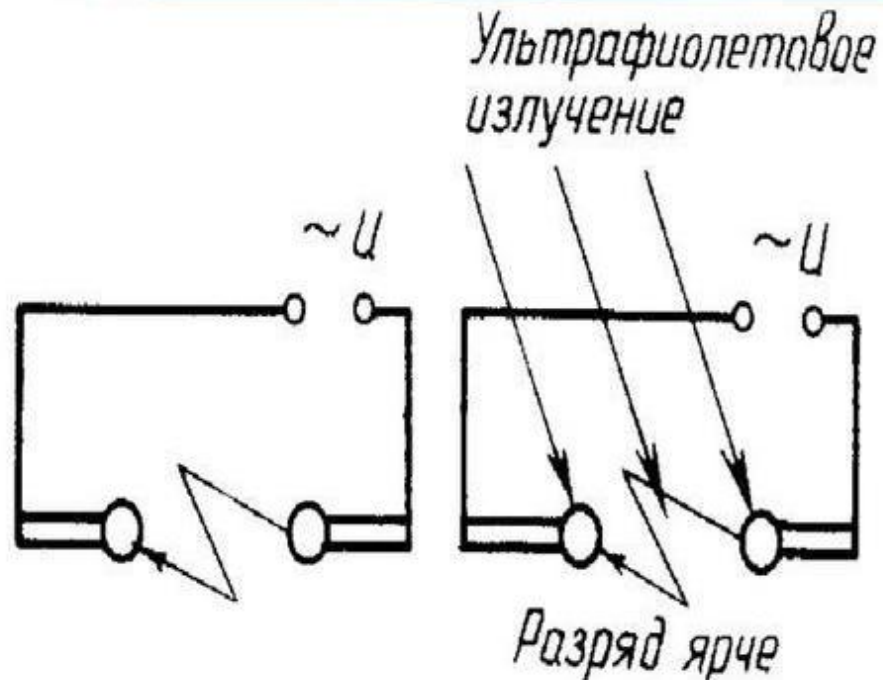
***Основы квантовой физики.  
Лазеры.***

# План

- 1. Корпускулярно-волновое взаимодействие электромагнитных волн**
- 2. Дискретность атомных состояний.**
- 3. Взаимодействие электромагнитных полей с атомами и молекулами веществ.**
- 4. Лазеры. Применение в стоматологии.**

# 1. Корпускулярные свойства электромагнитных волн

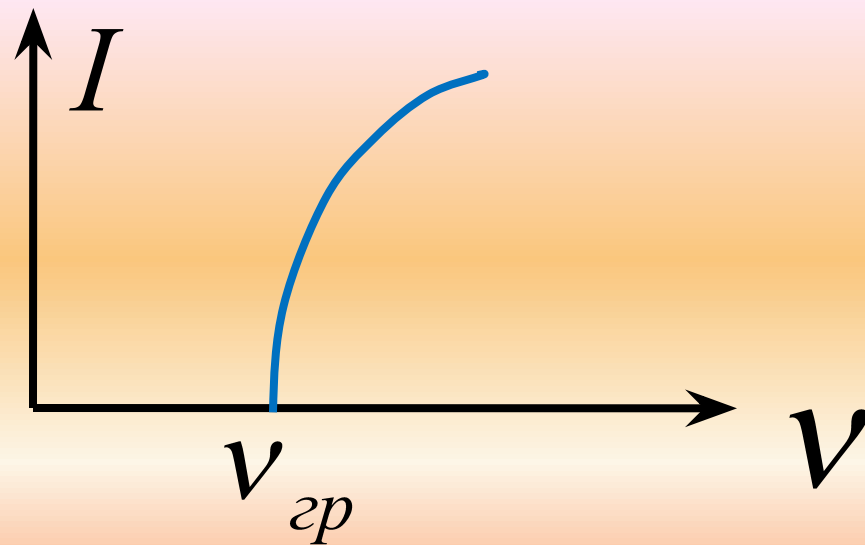
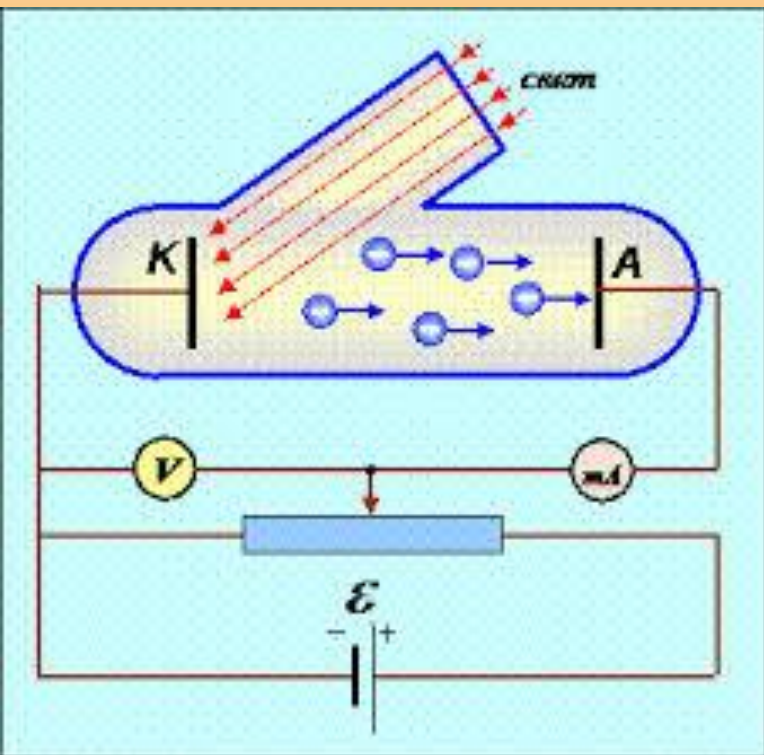
1887 г. Генрих Герц.  
Открытие фотоэффекта



При генерации электромагнитных волн посредством возбуждения электрических колебаний в открытом контуре с разрядником Г. Герц обнаружил (1887 г.), что длина искры между металлическими электродами увеличивается, если катод освещается ультрафиолетовым светом !

# Эксперименты, подтверждающие гипотезу световых квантов.

## 1. Фотоэффект.



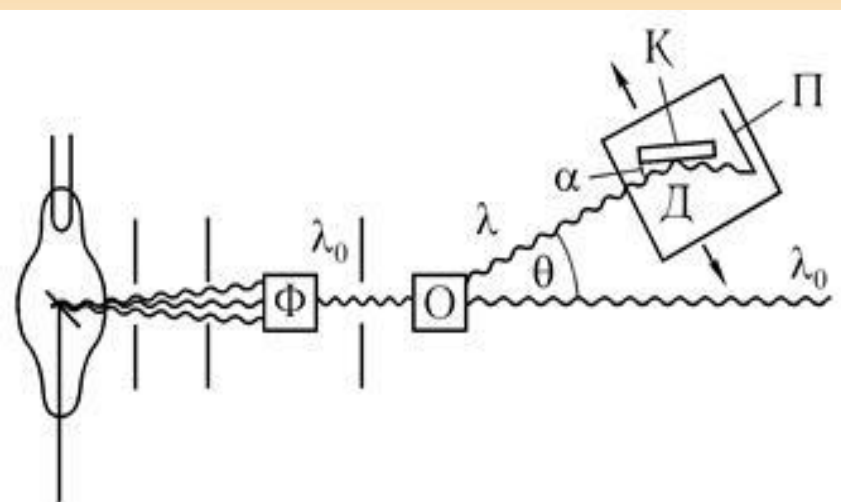
Зависимость силы фототока  $I$  от частоты падающего на катод светового потока при постоянных плотности потока  $\Phi$  энергии и разности потенциалов  $U$ .

# **Законы фотоэффекта**

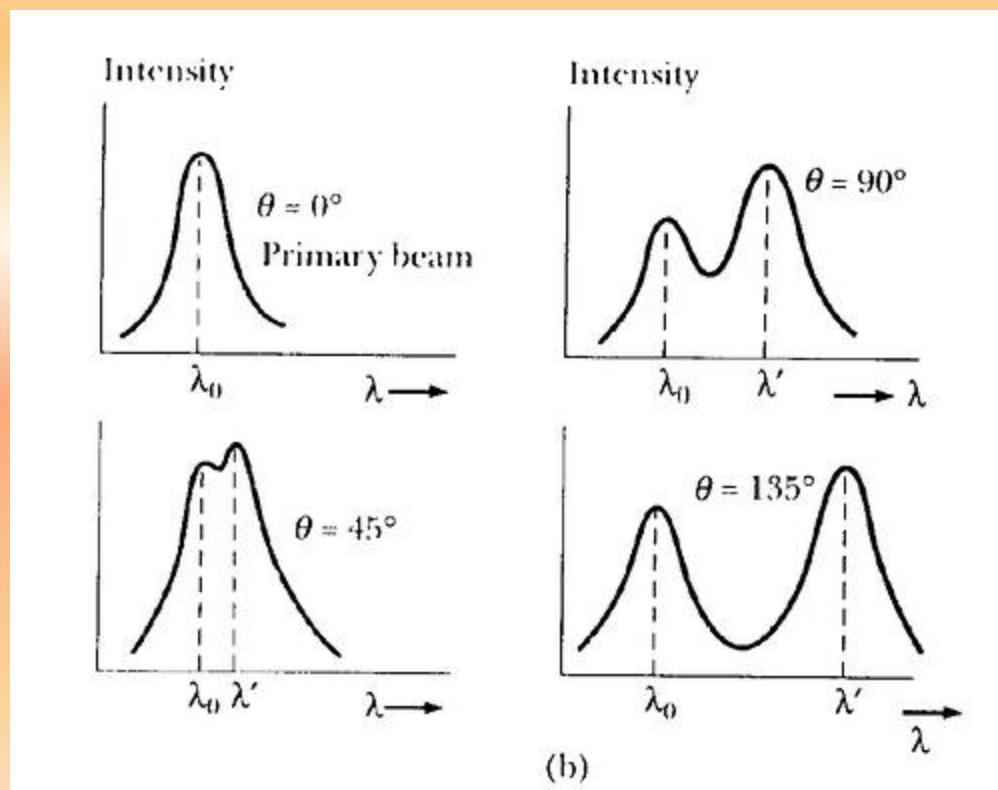
- 1. Число фотоэлектронов, вырываемых из катода в единицу времени, при фиксированной частоте падающего на катод света пропорционально интенсивности света.**
- 2. Максимальная начальная (максимальная кинетическая энергия) не зависит от интенсивности падающего света, а определяется лишь его частотой.**
- 3. Для каждого вещества существует минимальная частота  $\nu_m$  падающего света ниже которой фотоэффект невозможен.**

## 2. Эффект Комптона.

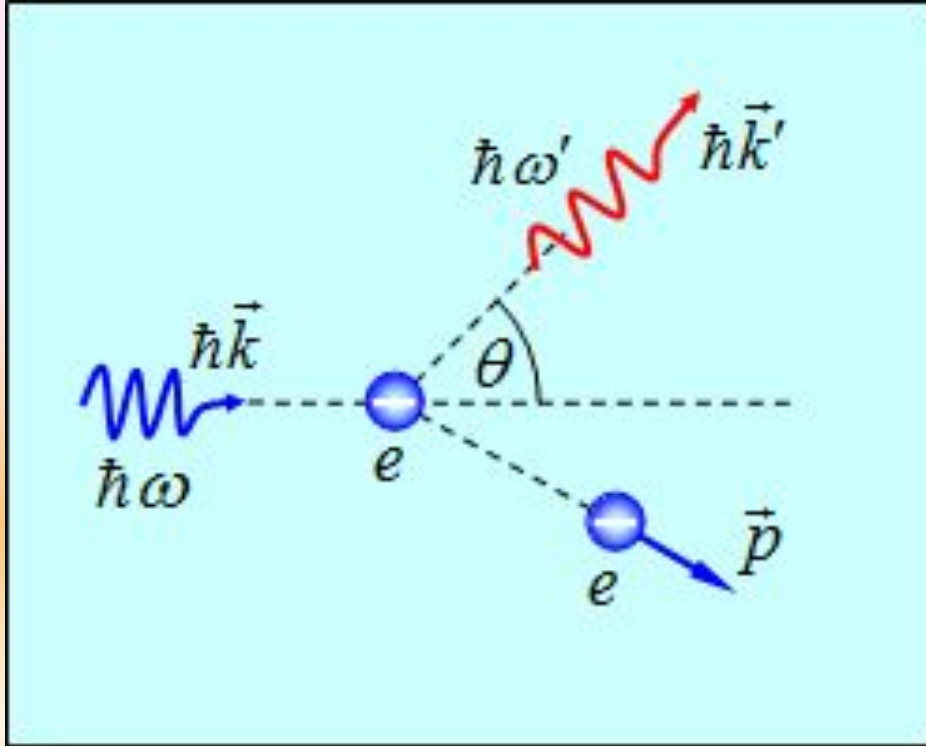
В 1922 г. американский физик **А. Комптон** открыл явление увеличения длины волны рентгеновского излучения при рассеянии на свободных электронах. Этот эффект послужил **экспериментальным доказательством** того, что **квант света** обладает **ИМПУЛЬСОМ**:



**Ф** – фильтр;  
**О** – графитовая мишень  
**К** – кристалл



Зависимость интенсивности в рассеянии в различных направлениях от длины волны



$$\lambda - \lambda_0 = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$

(3.1)

Рассеяние фотона на электроне

$$p = \hbar k \quad (3.2)$$

Импульс фотона

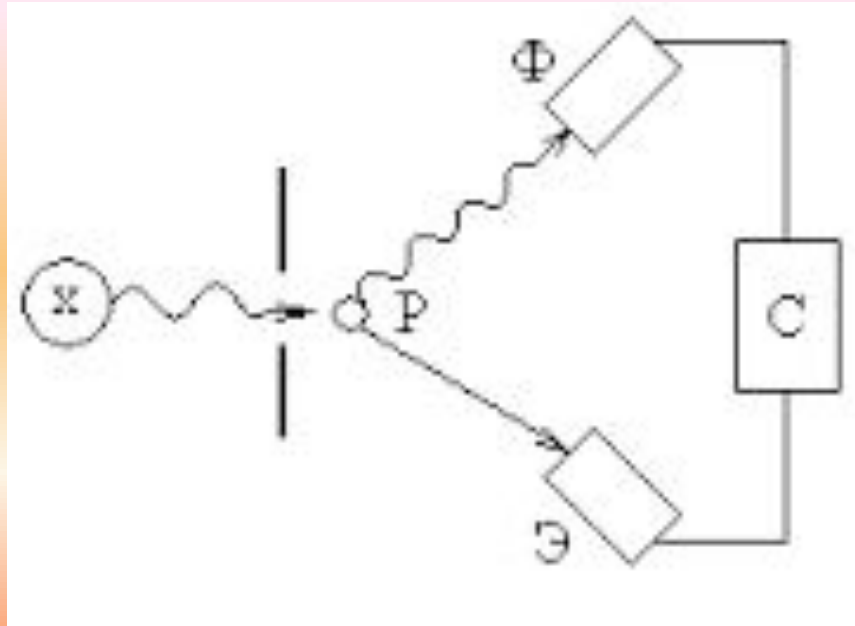
$$E = \hbar \omega \quad \text{- Энергия фотона}$$

(3.3)

где

$$k = \omega / c$$

### 3. **Опыты Боте и Гейгера (наблюдение индивидуальных актов столкновения).**



### 4. **Опыты Вавилова (наблюдение флуктуаций интенсивности светового потока)**

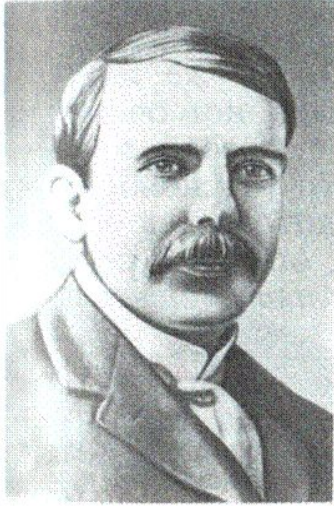
Согласно эйнштейновской теории относительности, квант электромагнитного поля **фотон**, считается частицей с массой покоя равной **нулю**, и имеющий скорость, равную **скорости света** в любой инерциальной системе отчета.



**2.**

***Дискретность атомных состояний.***

# Несовместимость планетарной модели атома с представлениями классической физики.



Резерфорд Эрнст (1871–1937)  
Английский физик, один из создателей учения о радиоактивности и строении атома. Открыл альфа- и бета-излучение и объяснил его природу. Создал совместно с Ф. Содди теорию радиоактивности, предложил планетарную модель атома, осуществил первую искусственную ядерную реакцию

Поскольку электрон движется по окружности, он обладает **центростремительным ускорением**. Ускоренные элементарные частицы должны **непрерывно излучать электромагнитные волны**. В результате потери энергии, радиус орбиты электронов должен непрерывно сокращаться и электрон должен **упасть на ядро**.

**Частоты излучения** атома должны быть кратны **частоте обращения электрона** вокруг ядра, что противоречило экспериментам.

# Квантовые свойства атомов.

## Постулаты Бора.

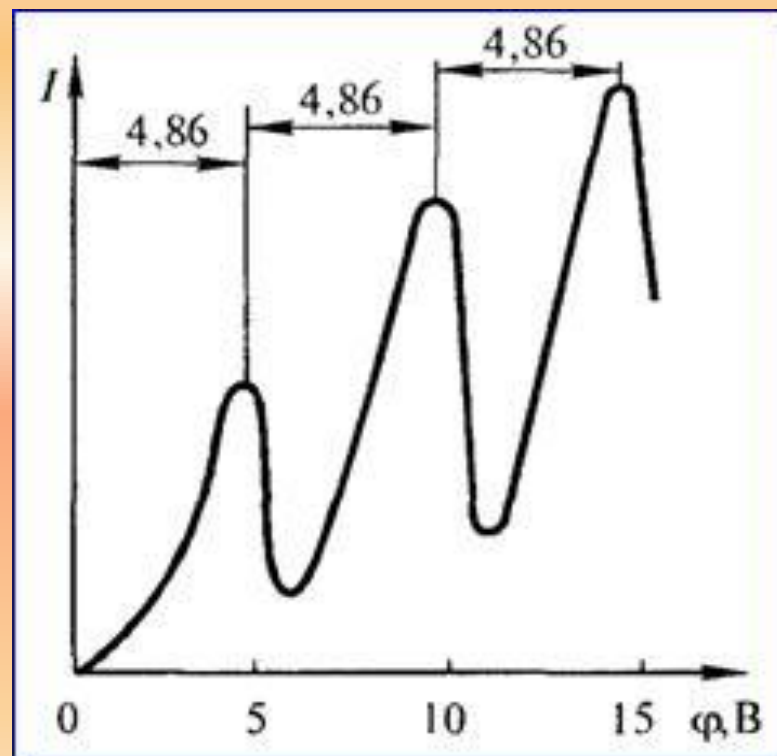
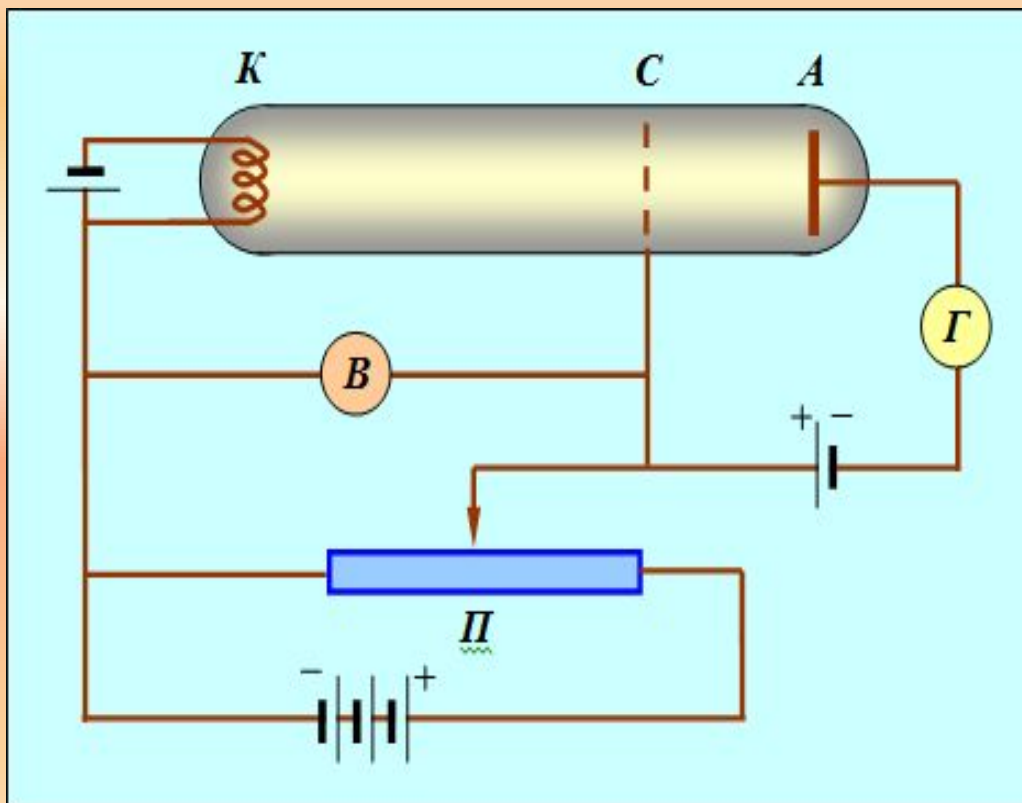
1. Атомы могут длительное время находиться в определенных, **стационарных** состояниях, в которых не излучают и не поглощают свет. Энергии стационарных состояний  $E_1 E_2 E_3 \dots$  образуют **дискретный** спектр.
2. При переходе атома из одного начального стационарного состояния с энергией  $E_n$  в другое конечное состояние с энергией  $E_m$  происходит излучение кванта **монохроматического** света, причем

$$\nu = (E_n - E_m) / h \quad (3.4)$$

$$h = 6.62 * 10^{-34} \text{ Дж} * \text{с}$$

$$\hbar = h / 2\pi = 1.05 * 10^{-34} \text{ Дж} * \text{с}$$

# Экспериментальное подтверждение наличия дискретности атомных состояний. Опыты Франка, Герца.

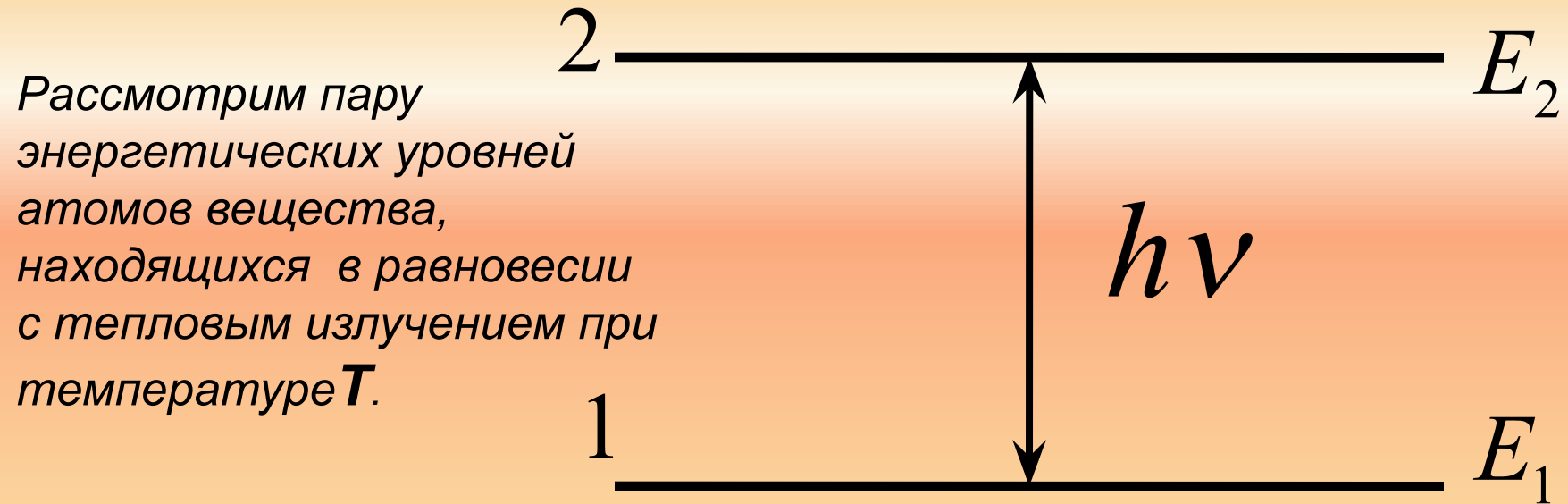


Вольтамперная характеристика, полученная в опытах Франка Герца.

3

***Взаимодействие  
электромагнитных полей с  
атомами и молекулами  
веществ.***

# Спонтанное и вынужденное излучение атомов.



*Обозначим число атомов в состоянии с энергией  $E_1$  через  $N_1$ , соответственно в состоянии с энергией  $E_2$  через  $N_2$ .*

В состоянии теплового равновесия заселенности уровней  $N_1$   $N_2$  подчиняются **распределению Больцмана** :

$$N_i = \text{const} * e^{-E_i / kT} \quad (3.5)$$

## 1. Спонтанное излучение.

Квант света испускается при самопроизвольном переходе атома из Состояния “2” в состояние “1”. Вероятность этого процесса пропорциональна числу атомов на верхнем энергетическом уровне :

$$P_{21}^{\text{спонт}} = A_{21} * N_2 \quad (3.6) \quad A_{21} - \text{коэффициент Эйнштейна}$$

## **2. Вынужденное поглощение (поглощение).**

*Атом поглощает квант света испускается и переходит из состояния “1” в состояние “2”. Вероятность этого процесса, индуцируемого излучением, пропорциональна спектральной плотности излучения на частоте, а также числу атомов на нижнем энергетическом уровне :*

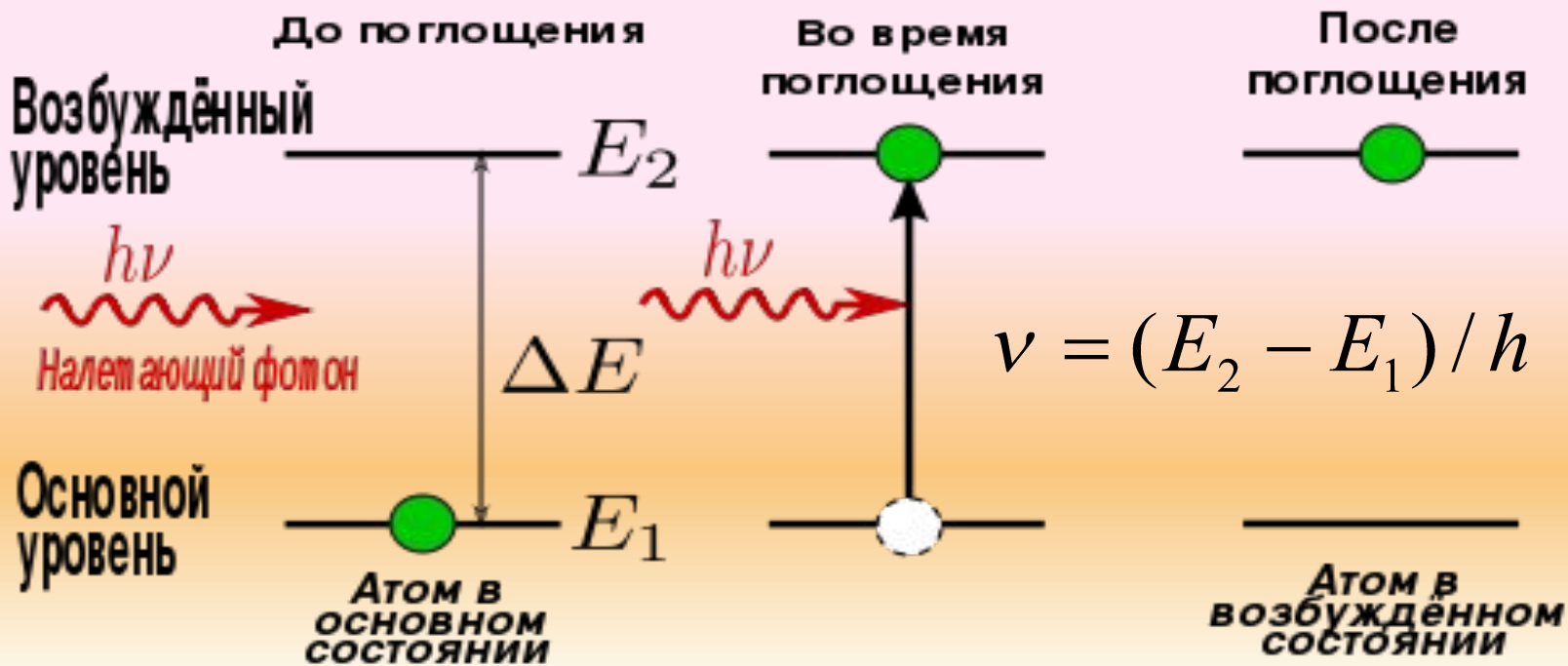
$$P_{12}^{\text{погл}} = B_{12} * N_1 * u(\omega, T) \quad (3.7)$$

## **3. Вынужденное излучение.**

*Переход атома из состояния “2” в состояние “1” происходит под действием резонансного кванта света и сопровождается излучением точно такого же кванта.*

$$P_{21}^{\text{вын}} = B_{21} * N_2 * u(\omega, T) \quad (3.8)$$





$$E_2 - E_1 = \Delta E = h\nu$$

Квантовая система в состоянии  $E_2$  неравновесна и стремится вернуться в исходное состояние  $E_1$ .

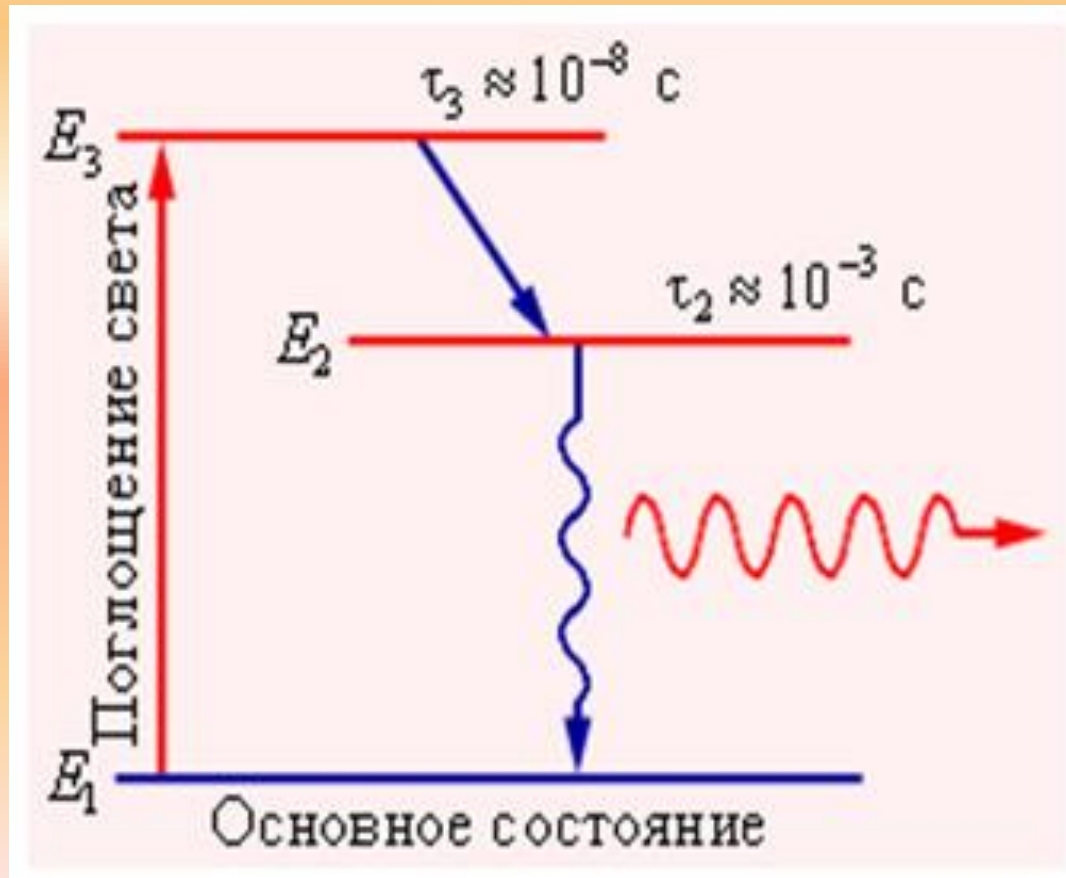
- 1) **Безызлучательный переход** (энергия передается в виде кинетической энергии атомам и превращается в тепло. )
- 2) **Спонтанное излучение** (люминесценция), при которой излучается квант электромагнитной энергии резонансной частоты произвольной поляризации и фазы.
- 3) **Вынужденное излучение.**

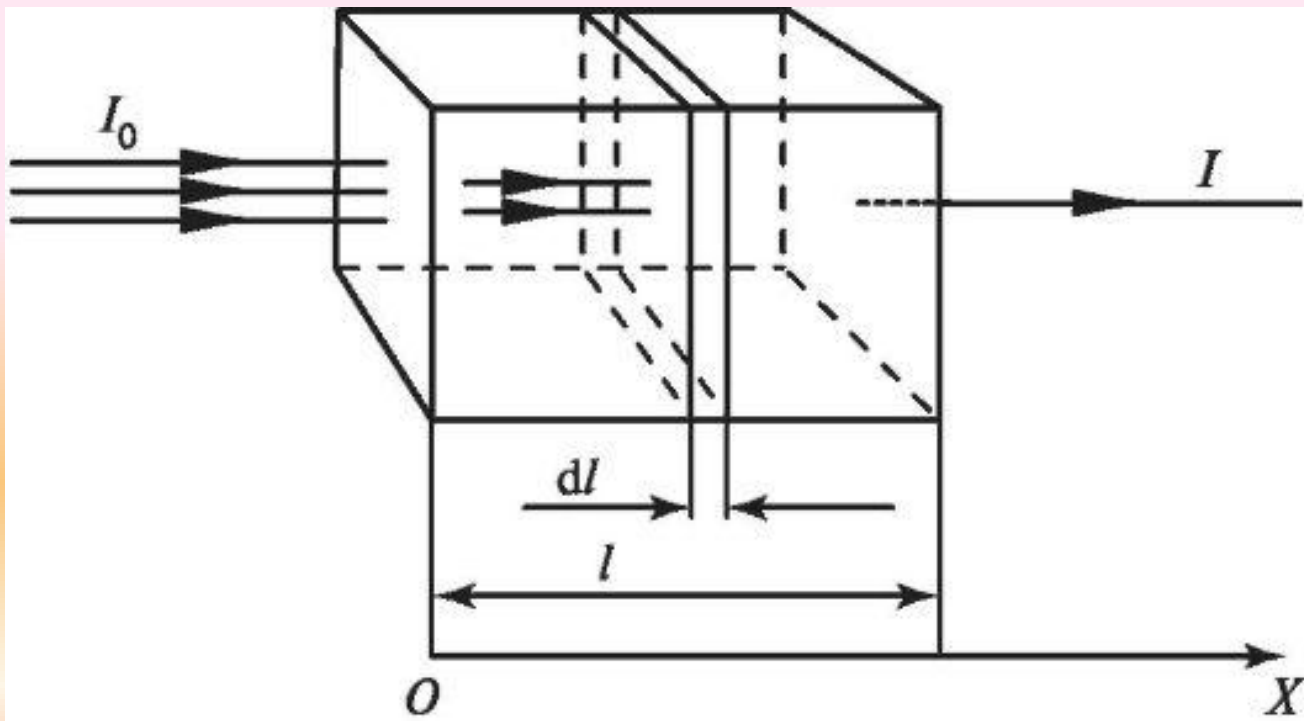
Характеристика излучения	Спонтанное излучение	Вынужденное излучение
Частота	$\nu = (E_2 - E_1) / h$	
Направление излучения	Произвольное	То же, что и у стимулирующего
Поляризация	Произвольная	То же
Фаза излучения	Произвольная	Та же, что и у стимулирующего

# **Оптические явления, связанные с квантовой природой света**

# 1. Поглощение света веществом.

При прохождении **световой волны** через вещество, энергия света может совпасть с разностью энергетических уровней атомов среды (газ, жидкость). При таком совпадении происходит **переход электронов из низшего состояния на более высокое**. При этом происходит **поглощение света** веществом.





$$dl = dx$$

$$dI = -kI dx$$

$$dI / I = -k dx$$

$$\int dI / I = -k \int dx$$

$$\ln I = -kx + \ln C$$

$$I = Ce^{-kx}$$

Учитывая, что  $I = I_0$  при  $x = 0$ , находим  $C = I_0$

$$I = I_0 e^{-k(\lambda)x}$$

**$k$**  – коэффициент  
поглощения (3.9)

**Закон Бугера - Ламберта**

Для растворов справедлива зависимость  $k = \alpha * C$

$C$  – концентрация вещества

$$I = I_0 e^{-\alpha C x} \quad (3.10)$$

**Закон Бугера – Ламберта - Бера**

$$T = I / I_0 = e^{-\alpha C x} \quad \text{– коэффициент пропускания}$$

$$D = -\lg T \quad \text{– оптическая плотность образца}$$

# Спектры поглощения

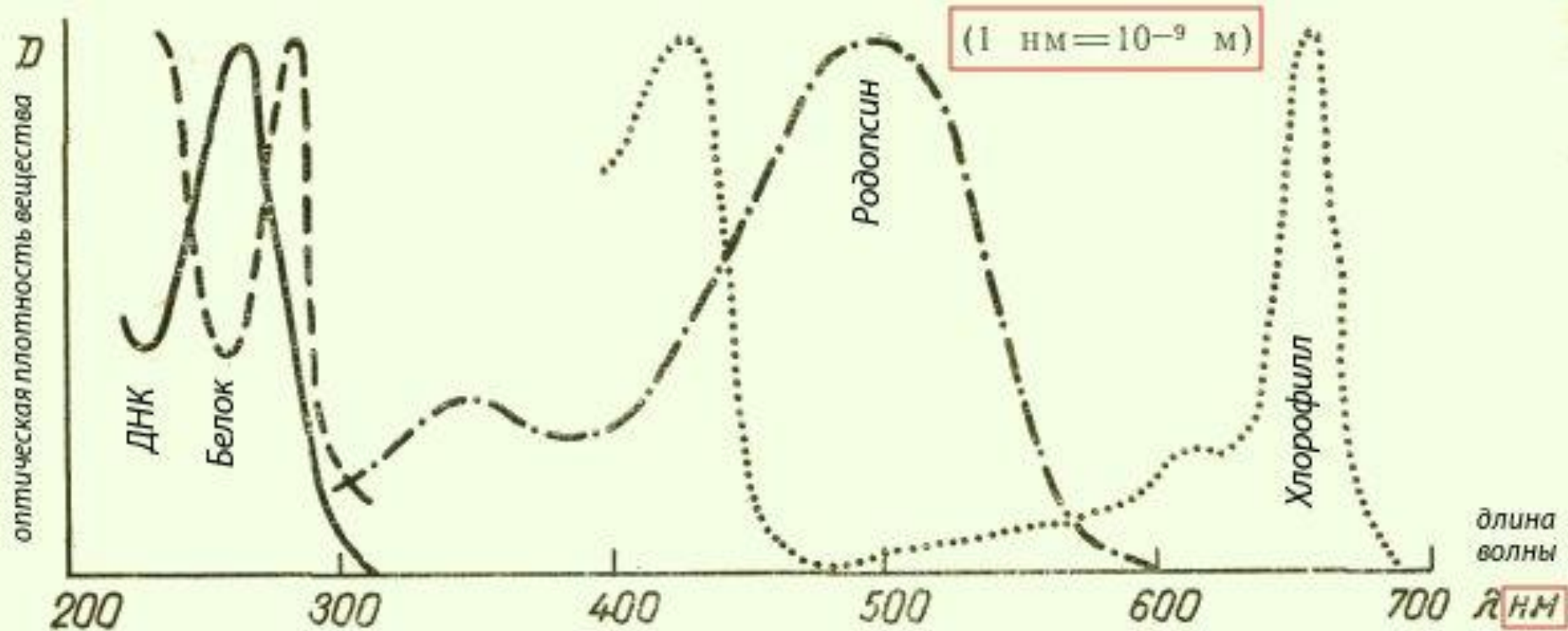


Рис. 1. Спектры поглощения некоторых биологически важных соединений



# Спектрометры , спектрофотометры

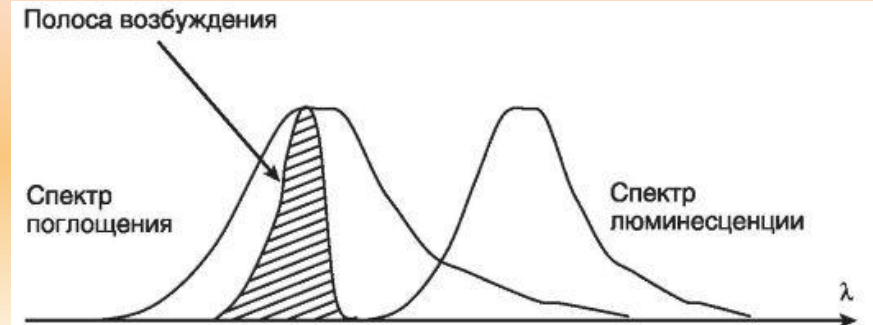
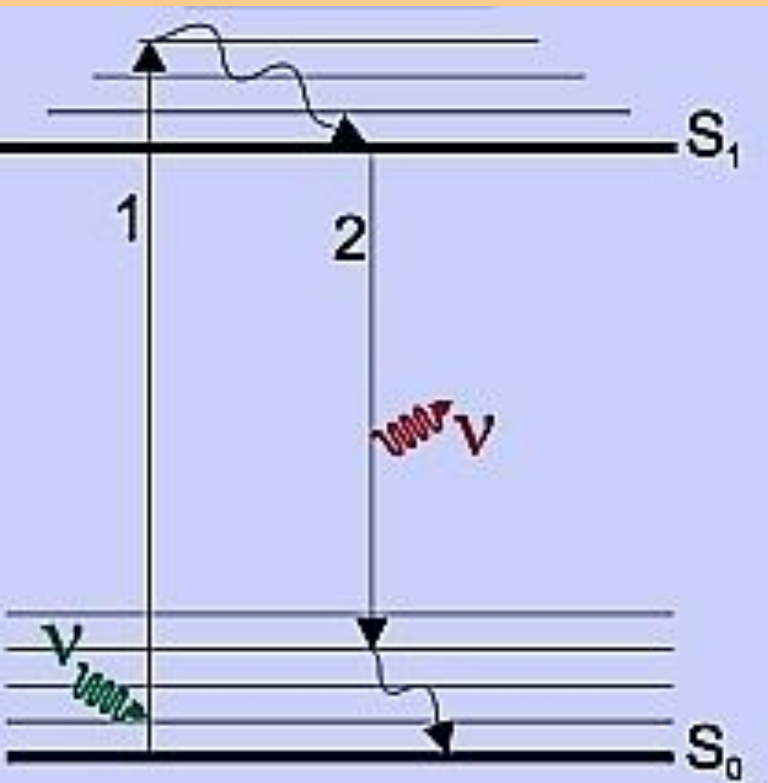


**(кварцевые кюветы для жидких образцов)**



## 2. Люминесценция

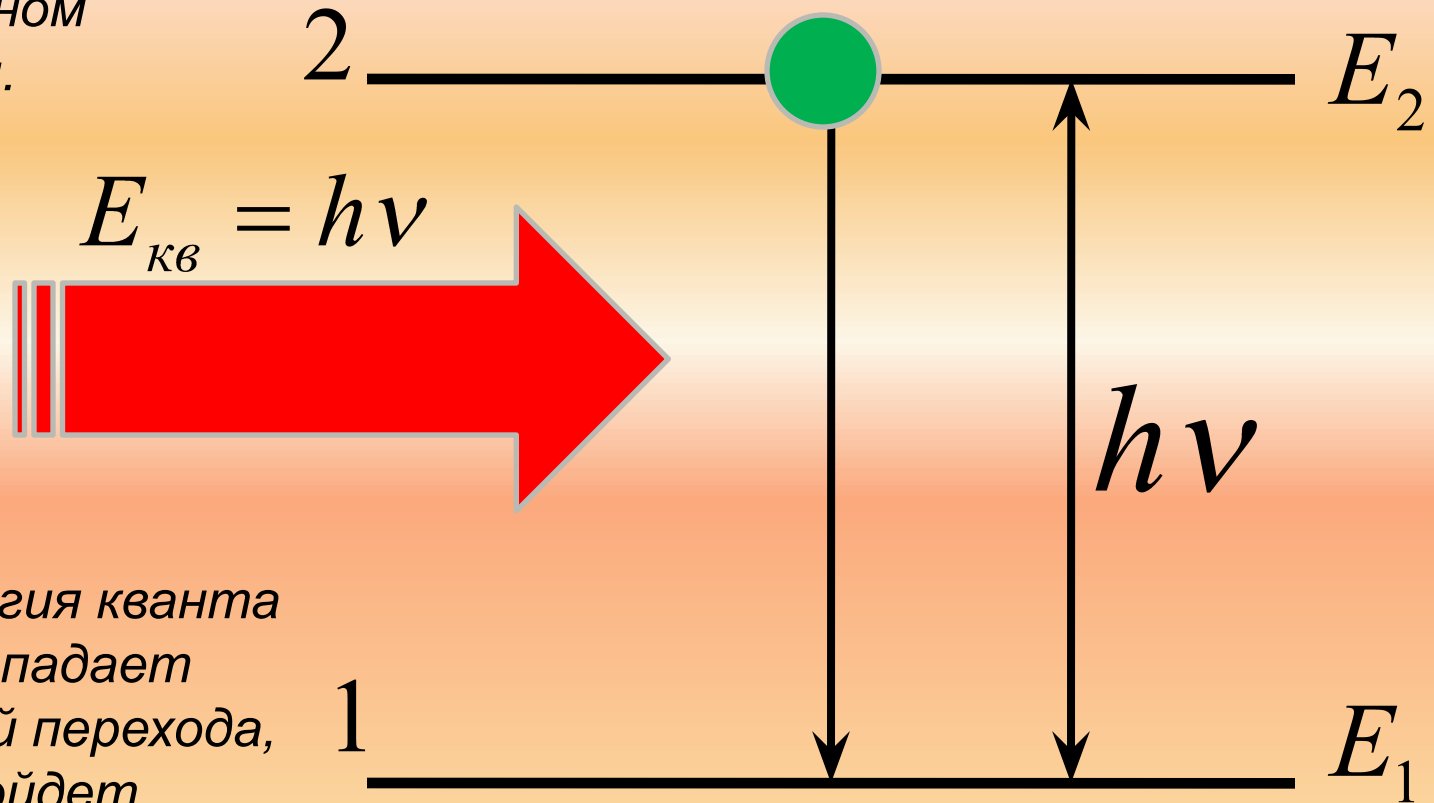
**Люминесценцией** называется такое **излучение**, при котором промежуток времени между **поглощением** кванта света, возбудившим молекулу, и **испусканием** кванта света в результате обратного перехода молекулы в основное состояние **больше периода колебаний световой волны**.



**Люминесцентная диагностика зубов**

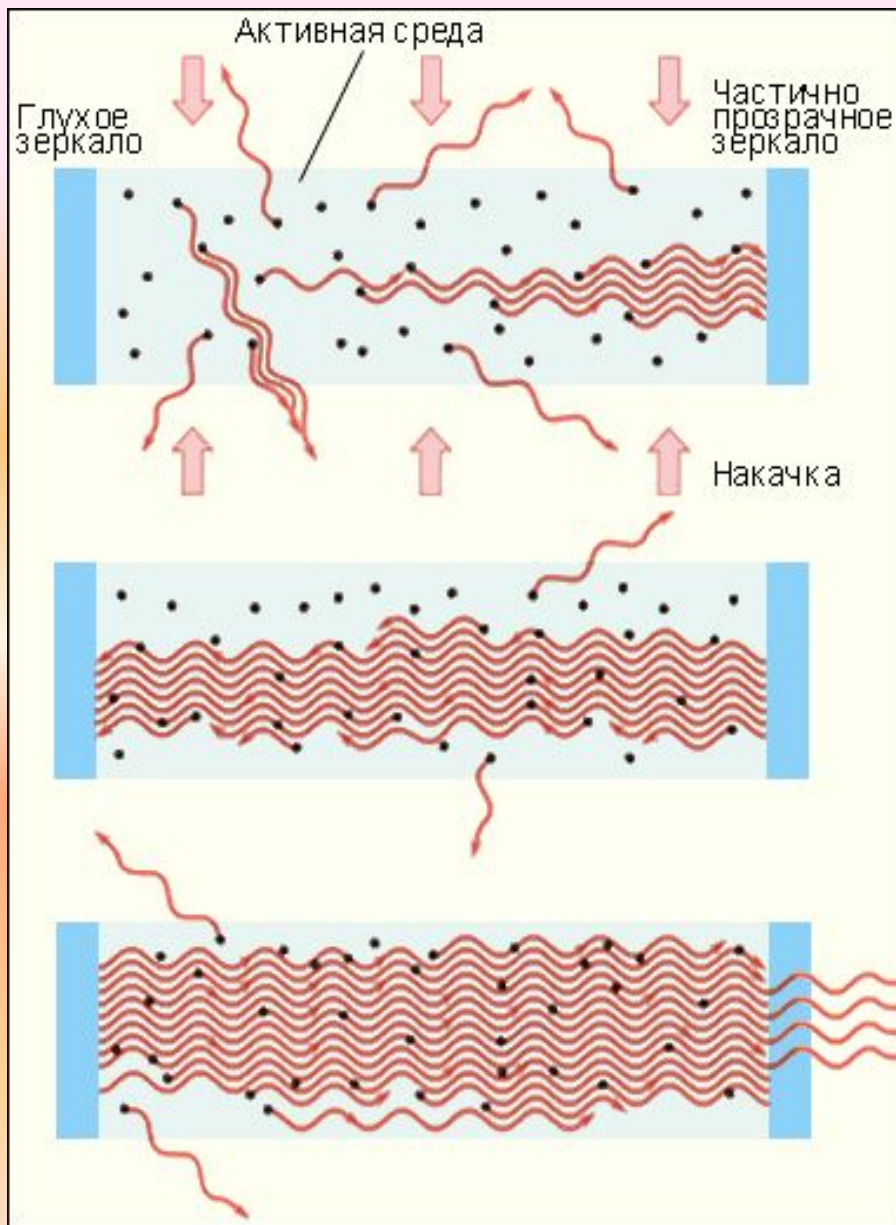
### 3. Вынужденное излучение.

Рассмотрим атом,  
находящийся в  
возбужденном  
состоянии.



Если энергия кванта  
света совпадает  
с энергией перехода,  
то произойдет  
переход атома из состояния  
“2” в состояние “1”.

**4.** *Лазеры. Применение в стоматологии.*



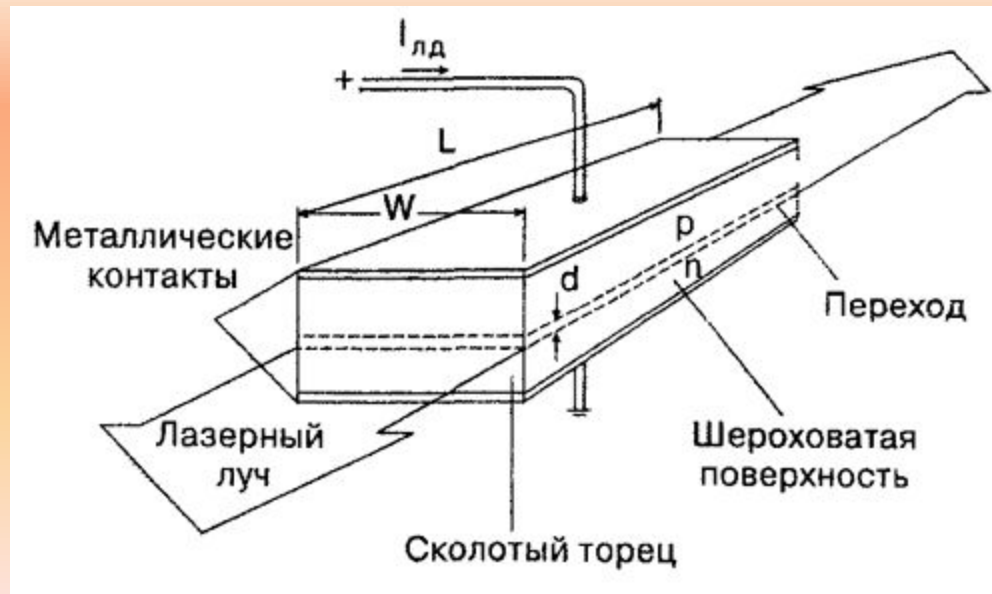
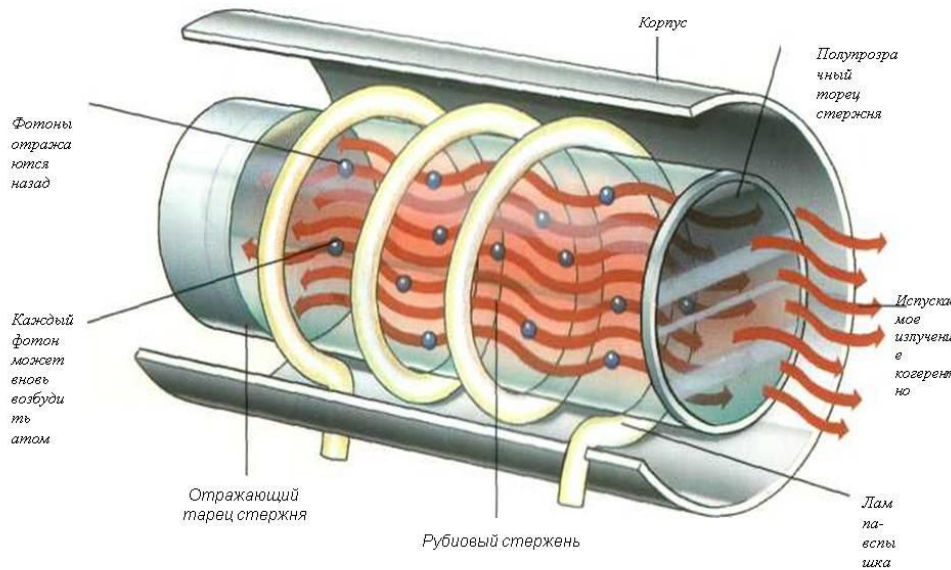
**Активное вещество** – газ, твердое тело, жидкость.

**Источник накачки** – лампа, вспышки, разряд (для газа).





# Устройство рубинового лазера



# Свойства лазерного излучения.

## 1. Монохроматичность.

Лазерное излучения имеет одну длину волны света. Ширины спектральных линии газовых лазеров составляют  $\sim 1\text{Å}$  ( $10^{-10}$  м)

## 2. Малая расходимость луча.

В газовых лазерах расходимость луча составляет  $\sim 0.1 - 10$  мрад.  
В полупроводниковых может превышать 100 мрад.

## 3. Высокая яркость луча.

Яркость определяется как мощность на единицу площади и на единицу телесного угла. Фокусировка некоторых лазеров позволяет получать до  $10^{19}$  Вт / см<sup>2</sup>

## 4. Когерентность.

Лазерное излучение характеризуется как **пространственной**, так и **временной** когерентностью. **Пространственная когерентность** характеризуется постоянством разности фаз св.волн в двух точках пространства, в разные моменты времени. Если соотношение фаз сохраняется в течение некоторого конечного времени, последнее называют **временем когерентности**.

# Процессы в биотканях, при воздействии лазера.

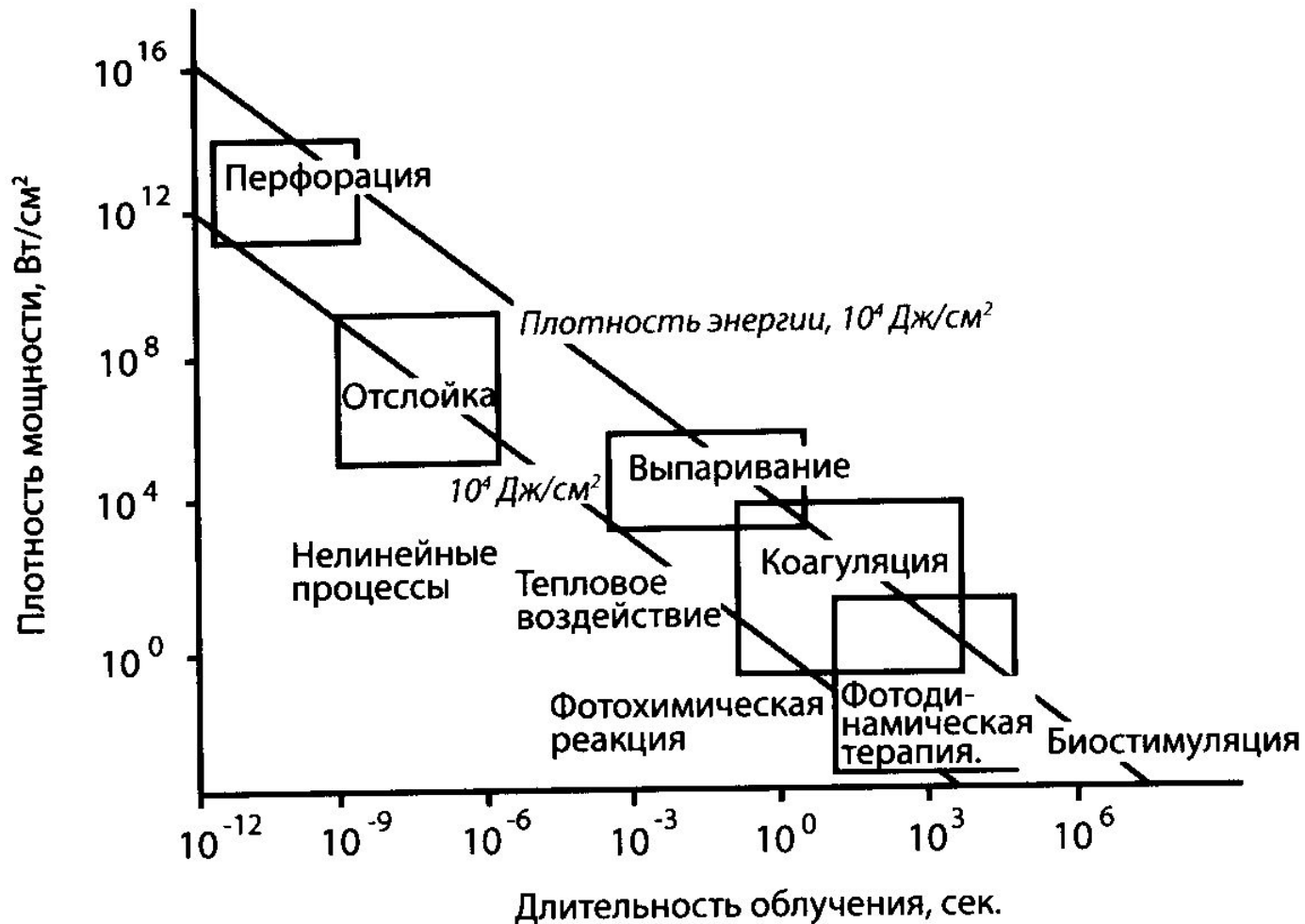


Рис. Величины плотности мощности и длительности импульсов при использовании лазеров в медицине



Таблица Примеры коммерческих лазеров для хирургии

Тип лазера, режим генерации	Длина волны, импульсная мощность	Глубина проникновения в ткань, механизм действия	Применение
Лазер на эксимере (ArF) - импульсный (нс)	193 нм 10 мДж	Глубина 1 мкм (фотохимич.) фотоабляция	Офтальмология (лечение роговицы глаза), по методу LASIK
Ag+ Аргоновый лазер - непрерывный режим = cw	488, 514 нм 1—5 Вт	Глубина 0,5 мм (гемоглобиновая абсорбция) коагуляция	Дерматология, хирургия сетчатки глаза (лазер Ag заменяется твердотельным)
Лазер на Nd: ИАГ (КТР) - с удвоенной частотой, - импульсный (нс), квази-cw	532 нм 1—20 Вт 1 Дж	как Ag+-лазер + селективный фототермолиз	То же + удаление татуировок и косметические процедуры
Лазер на красителе - непрерывный, - импульсный	488—800 нм 5 Вт	Глубина — несколько мм коагуляция, фотохимия	Дерматология, онкология (редко), фотодинамическая терапия
Лазер на александрите - импульсный (нс)	700—800 нм 0,1 Дж	Глубина — несколько мм фотодисрупция, термодействие	Разрушение камней, удаление волос и татуировок
Диодный лазер - непрерывный	около 900 нм или 630 нм 10—100 Вт	Глубина — 1 см коагуляция	Хирургия, гинекология, урология, фотодинамическая терапия
Лазер на Nd: ИАГ - непрерывный	1064 нм 10—50 Вт	Глубина — 1 см коагуляция	Хирургия, урология, дерматология, гинекология и др.
Ti-сапфировый лазер/Nd-YLF - импульсный (фс)	800 нм/1053 нм мДж	Фотодисрупция (оптомеханические) эффекты	Хирургия сетчатки глаза (фемто-LASIK)
Лазер на Nd: ИАГ - импульсный (нс)	1064 нм 10—100 мДж	Фотодисрупция (оптомеханические) эффекты	Офтальмология, литотрипсия, пигментодермия
Ho-лазер - квазиимпульсный	2000 нм 100 В	Глубина — 0,1 мкм водопоглощение, термодействие	Урология
Er-лазер - импульсный	2900 нм 10 мДж	Глубина — 2 мкм водопоглощение, фотоабляция (термич.)	Дерматология, стоматология (сверление)
CO <sub>2</sub> -лазер - непрерывный, - импульсный	10600 нм 50 Вт	Глубина — 10 мкм водопоглощение, термодействие	Хирургия, в том числе нейрохирургия, лицевая хирургия, дерматология

# **Лазеры в стоматологии.**

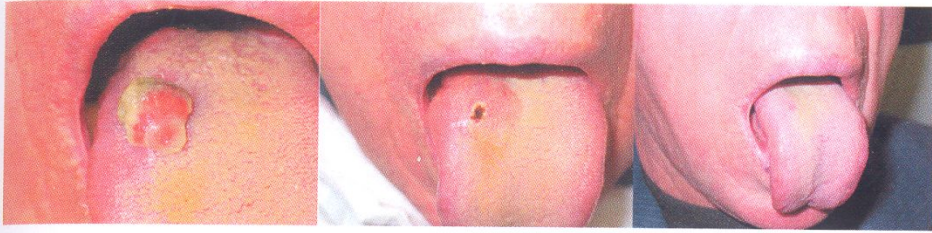


Рис. Лечение фибромы на языке: до операции, сразу после и через 3 недели.



Рис. Лечение кисты на нижней губе: до операции, сразу после операции и через 3 недели.



Рис. Лечение гипертрофического гингивита и короткой уздечки: а – до лечения; б – после обработки пораженных мест; в-после коррекции уздечки; г – через 1 сутки; д – через 1 неделю; е – через 6 месяцев.

**На представленных рисунках представлены примеры лечения различных видов патологий мягких тканей полости рта с помощью лазерного излучения с длиной волны 0.97 мкм.**





Рис. ФДТ генерализированного гингивита: а – до лечения; б – нанесение геля «Радахлорин»; в – освещение излучением 0,66 мкм; г – через 2 года.

*На рисунке представлен процесс и результаты лечения гипертрофированного гингивита с помощью фото – динамической терапии с использованием иеля “Радахлорин “ в качестве фотосенсибилизатора. В качестве источника лазерного излучения использовался аппарат “Лакта – МИЛОН” с длиной волны излучения 0.66 мкм.*





**Рис.** Лечение гранулемы: до лечения, контактное выпаривания гранулемы, сразу после операции.

**На данном рисунке представлены пример использования лазерного излучения с длиной волны 0.97 мкм для лечения гранулемы. При лечении гранулемы контактно световодом делается ход к месту расположения световода, после чего она выпаривается. Стерилизация места воздействия препятствует рецидиву заболевания.**



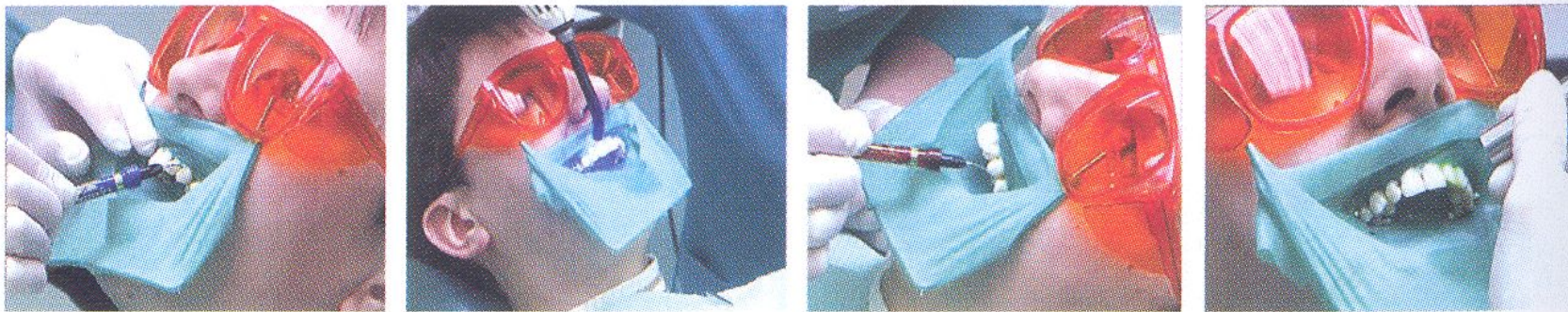


Рис. Последовательность лазерного отбеливания.

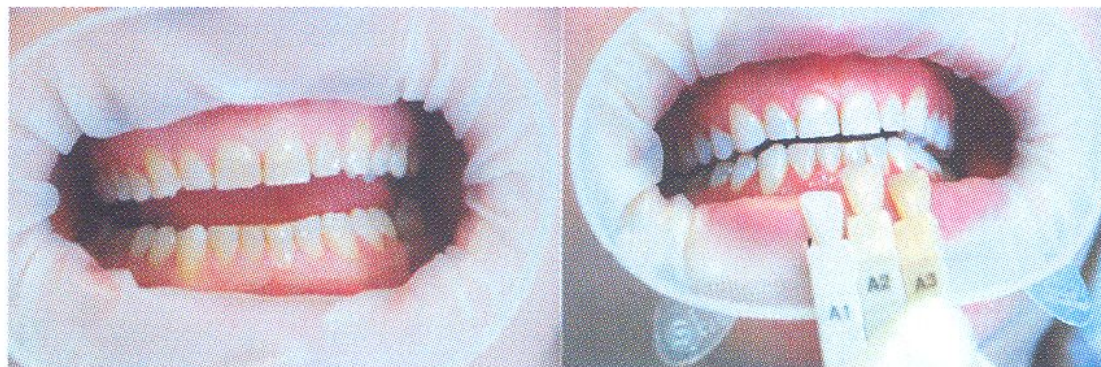


Рис. Зубы до и после отбеливания.

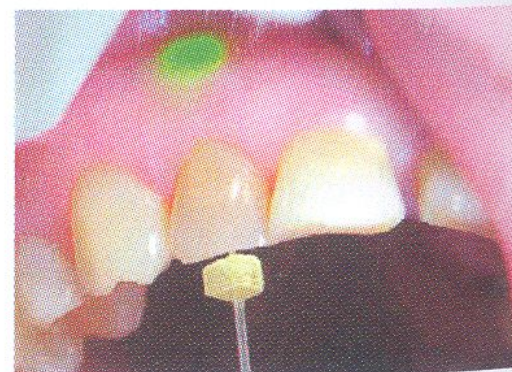
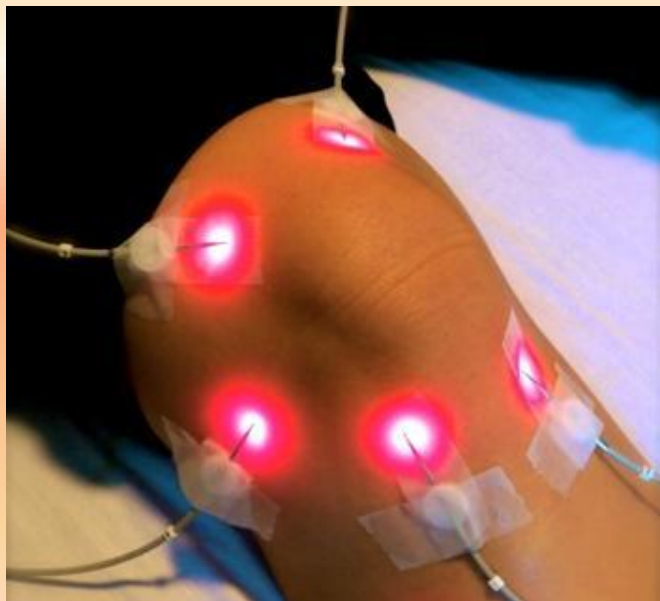
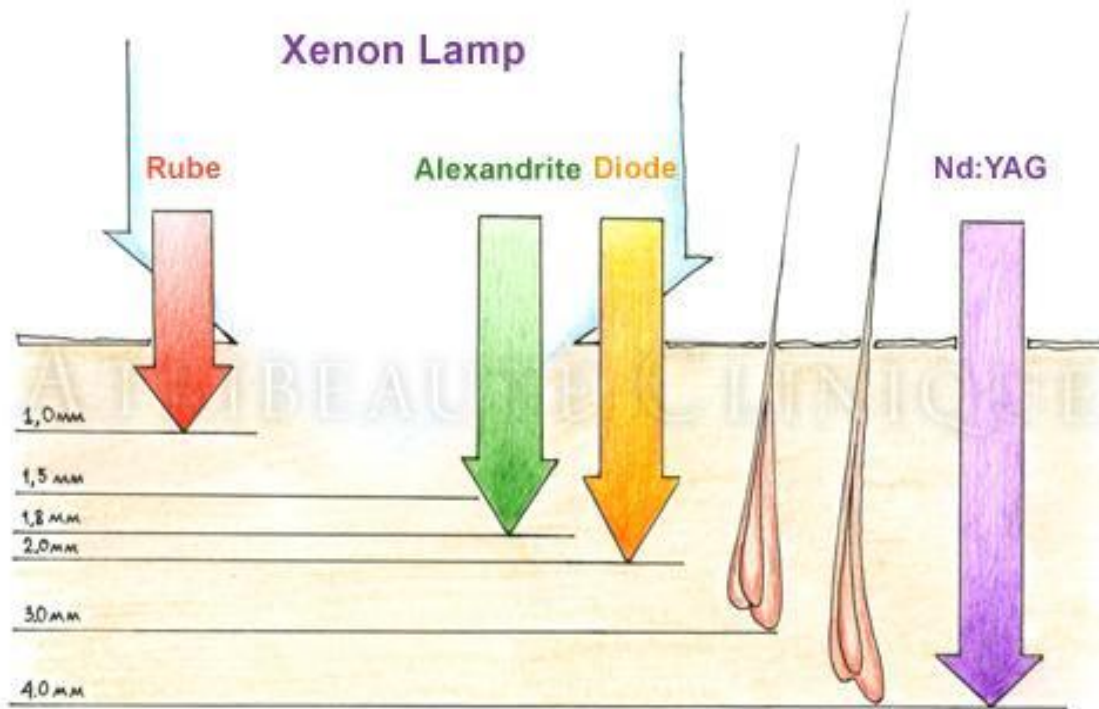


Рис. Стерилизация корневого канала.

*С помощью лазерного излучения можно осуществлять отбеливание зубов. Для отбеливания используется излучения 0.97 мкм. На границу зуба с десной наносится защитный гель, который фиксируется с помощью УФ лампы. После этого на отбеливаемые поверхности наносится отбеливающий гель. Нанесенный гель освещается пучком лазерного излучения. В результате выделяется кислород, производящий отбеливающий эффект.*



# Лазеры)



Лазерная терапия  
Лазерное облучение крови (ЛОК)

## Лазерное лечение шрамов

