

Учреждение образования «Гомельский
государственный медицинский университет»

Кафедра медицинской и биологической физики

Лекция № 6 – Поглощение и рассеяние света.
Атомные спектры. Люминесценция света. Лазеры.

2021

План лекции

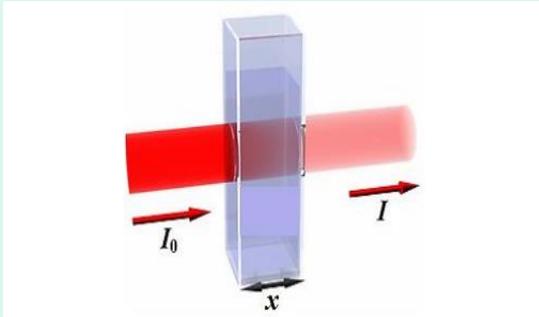
- ◆ Поглощение света и его законы.
- ◆ Фотоколориметрия и спектрофотометрия.
- ◆ Оптические атомные спектры.
- ◆ Постулаты Бора.
- ◆ Эмиссионный и абсорбционный спектральный анализ, его медицинское применение.
- ◆ Рассеяние света и его законы.
- ◆ Нефелометрия.
- ◆ Люминесценция света.
- ◆ Лазеры.

Литература

- Медицинская и биологическая физика: Учеб. для вузов / А.Н. Ремизов, А.Г. Максина, А.Я. Потапенко. – М.: Дрофа, 2004. – 560 с.
- Ливенцев Н.М. Курс физики Т.1. 6-е изд., доп. — Москва: Высшая школа, 1978. — 336 с.: ил.
- Савельев И.В. Курс общей физики: в 5 кн. Книга 4. Волны. Оптика. – М.: АСТ: Астрель, 2008.

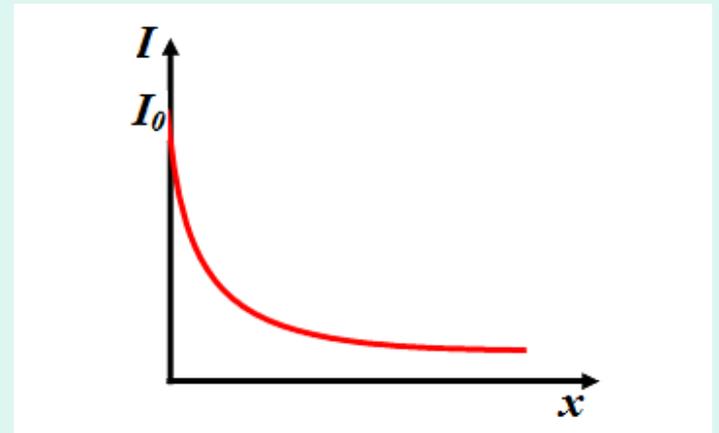
Поглощение света и его законы

Поглощение света – явление уменьшения энергии световой волны при ее распространении в веществе вследствие преобразования энергии волны в другие виды энергии.



$$I = I_0 e^{-\kappa x} \quad - \text{закон Бугера} \\ (1729 \text{ г.})$$

Интенсивность света при прохождении однородного вещества уменьшается по экспоненциальному закону

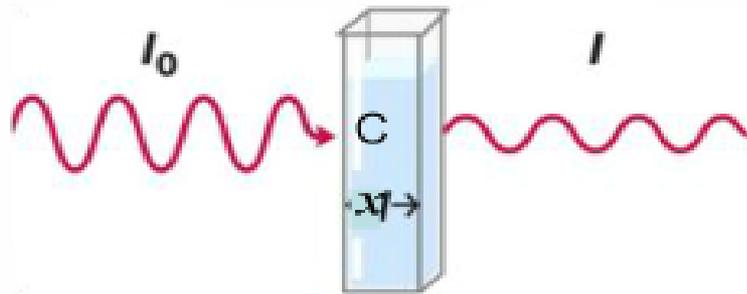


Величина показателя поглощения вещества зависит от природы вещества и длины волны падающего излучения

Поглощение света и его законы

Для растворов *небольших концентраций* “*C*” справедлив закон Бера:

$$k = \alpha \cdot C$$



α – *удельный* (в расчете на единицу концентрации) *показатель поглощения* вещества, зависит от λ .

Для растворов **закон поглощения света** принимает вид, известный как **закон Бугера – Ламберта – Бера**:

$$I = I_0 e^{-\alpha C x}$$

Единицы измерения $[k] = \text{cm}^{-1}$; $[C] = \text{M}$ или (moles/liter); $[\alpha] = \text{M}^{-1}\text{cm}^{-1}$.

Поглощение света и его законы

Коэффициент пропускания T - отношение интенсивности света, прошедшего образец, к интенсивности падающего на него света:

$$T = \frac{I}{I_0} = \frac{I_0 e^{-\alpha Cx}}{I_0} = e^{-\alpha Cx}.$$

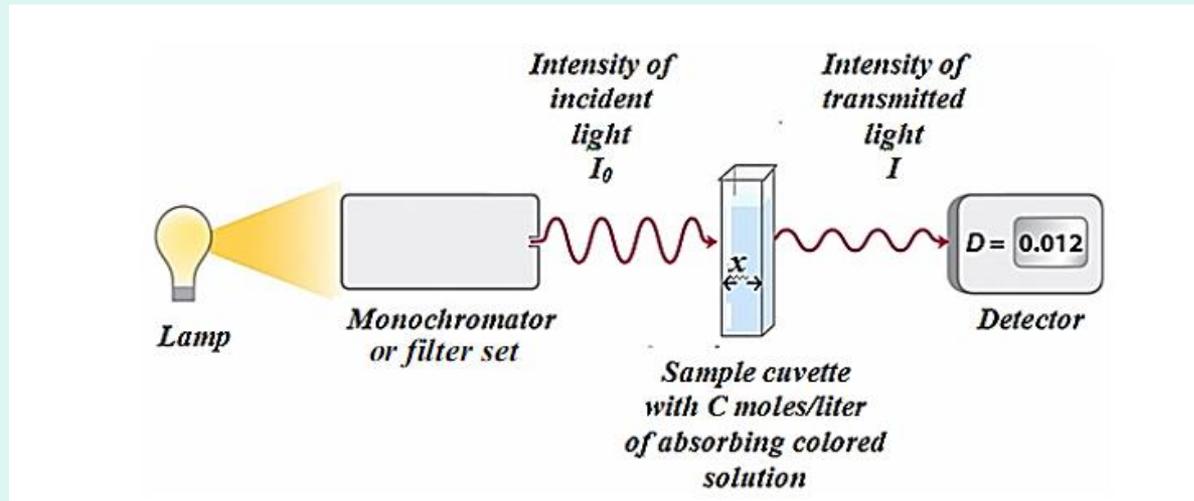
Оптическую плотность D образца, равная десятичному логарифму коэффициента пропускания, взятому со знаком «-»:

$$D = \lg \frac{I_0}{I} = \lg \frac{1}{T} = -\lg T = k_1 x = \alpha_1 Cx,$$

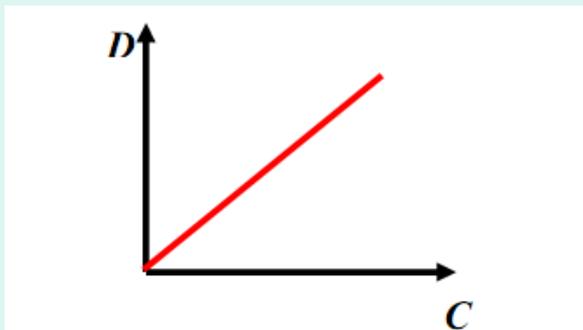
$$k_1 = k \lg e = 0.43k, \quad \alpha_1 = \alpha \lg e = 0.43\alpha.$$

Поглощение света и его законы

Закон Бугера-Ламберта-Бера лежит в основе *концентрационной колориметрии* - фотометрического метода определения концентрации поглощающего вещества в окрашенных растворах.



Принципиальная схема фотоэлектроколориметра



Зависимость оптической плотности D от концентрации C поглощающего вещества

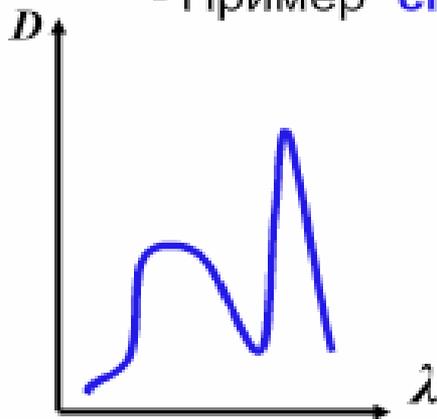
Поглощение света и его законы

1. Зависимость $D(C)$ – **линейная**, лежит в основе **концентрационной колориметрии** – метода определения концентрации C окрашенных растворов путем измерения их оптической плотности D .

Оптическую плотность D образцов измеряют **фотоэлектроколориметром (ФЭКом)** обычно в пределах $D = 0,001 \div 2,0$.

2. Зависимость $D(\lambda) \sim k(\lambda) \sim a(\lambda)$ и определяет **спектр поглощения** образца .

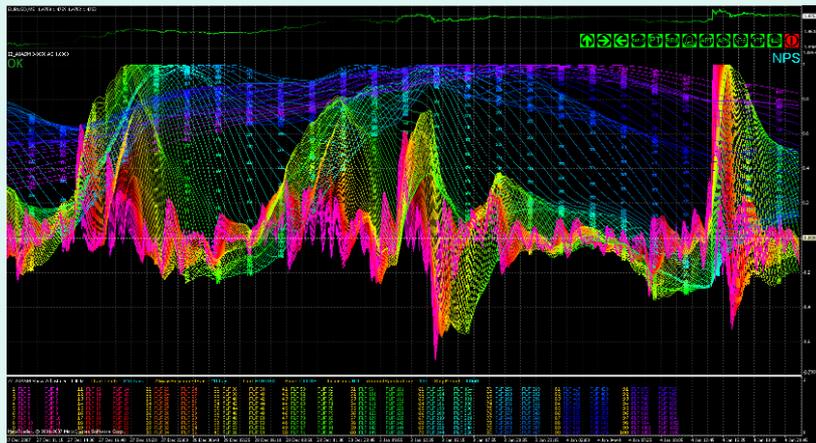
- Пример **спектра поглощения $D(\lambda)$** некоторого вещества.



Форма и положение спектра поглощения индивидуальна для каждого вещества , - на этом основан **абсорбционный спектральный анализ**.

Атомные спектры

Атомными спектрами называют как спектры испускания так и спектры поглощения, которые возникают при квантовых переходах между энергетическими уровнями свободных или слабовзаимодействующих атомов.

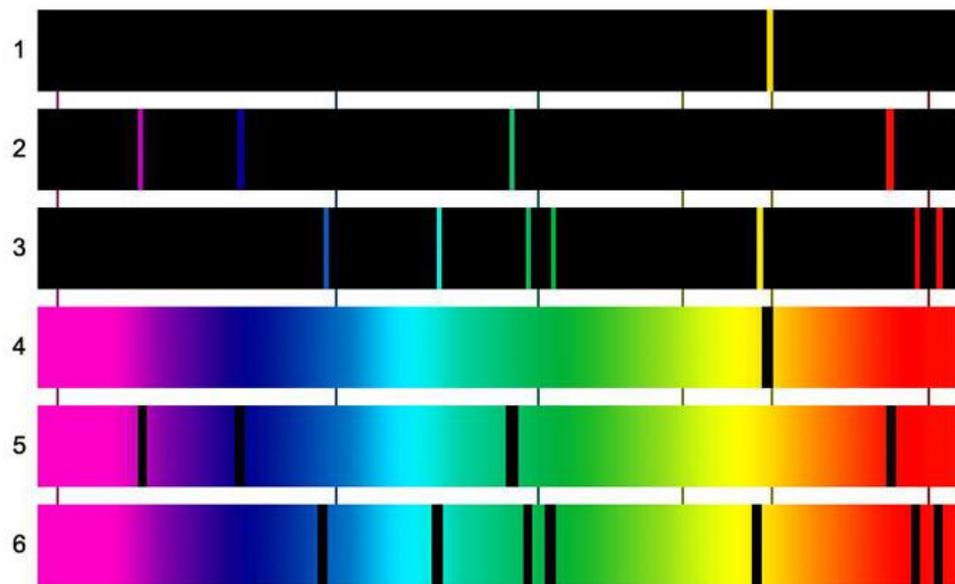


Спектры каждого вещества строго индивидуальны, что позволяет по спектрам излучения или поглощения *определить вид вещества, его состав и процентное содержание компонентов смеси*, т.е. провести *качественный и количественный спектральный анализ*.

Спектры испускания и поглощения

Спектром испускания вещества называют зависимость интенсивности I электромагнитного излучения вещества от частоты $I(\nu)$ или длины волны $I(\lambda)$.

Спектры испускания (излучения) – важнейшие характеристики оптических свойств атомов, состоят из отдельных спектральных линий или групп близко расположенных линий; их называют **линейчатыми спектрами**.



Спектры испускания: 1 - натрия; 2 - водорода; 3 - гелия.
Спектры поглощения: 4 - натрия; 5 - водорода; 6 - гелия.

Спектр поглощения вещества представляет собой зависимость коэффициента поглощения вещества k $k(\lambda)$ или оптической плотности вещества $D(\lambda)$ от длины волны или частоты падающего излучения .

Виды спектров: сплошные, линейчатые, молекулярные (полосатые)

❖ **Сплошные спектры** излучают вещества, находящиеся в твёрдом состоянии. Сплошной спектр выглядит как цветная полоса с плавным переходом от одного цвета к другому в следующем порядке: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый

❖ **Полосатые спектры** излучаются молекулами. Выглядят полосатые спектры подобно линейчатым, только *вместо отдельных линий наблюдаются отдельные серии линий, воспринимаемые как отдельные полосы* (рис. 1б, 2б).

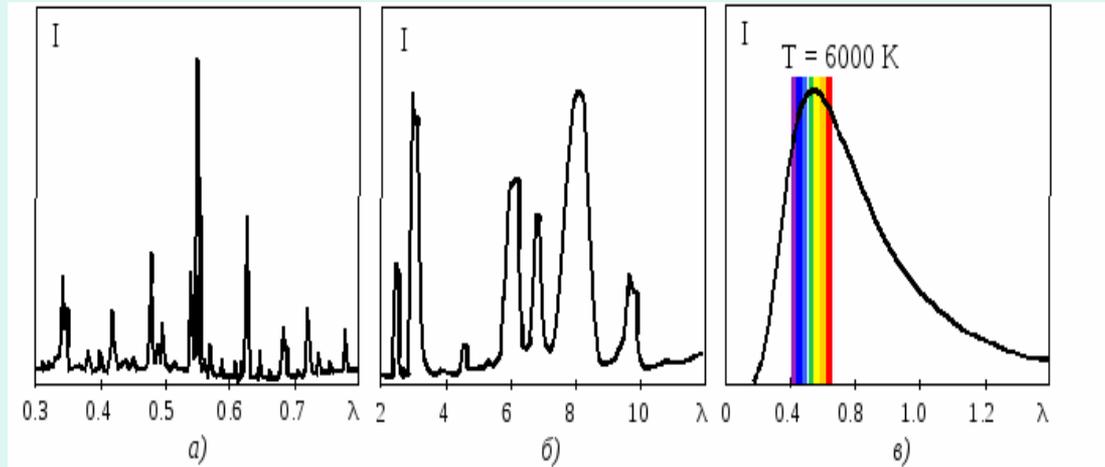


Рис. 1. Спектры излучения веществ: а) линейчатый; б) полосатый; в) сплошной. По оси X указаны длины волн λ в мкм; по оси Y - интенсивность излучения I .

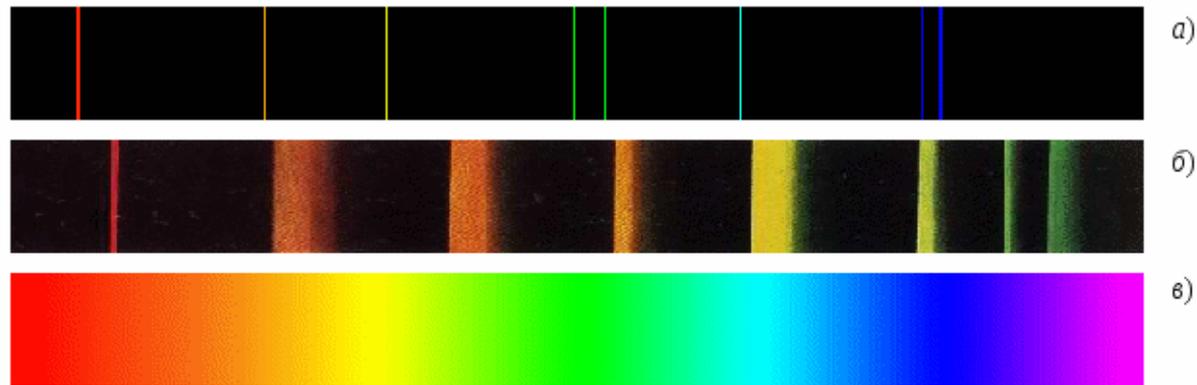


Рис. 2. Визуальное наблюдение линейчатых (а), полосатых (б) и сплошных (в) спектров в спектральном приборе [6].

Постулаты Бора

Для объяснения закономерностей в линейчатых спектрах Нильс Бор объединил планетарную модель атома Резерфорда с гипотезой Планка о квантовой природе света.

Первый постулат Бора (постулат стационарных состояний): в атоме существует набор стационарных состояний, находясь в которых атом не излучает электромагнитных волн. Стационарным состояниям соответствуют стационарные орбиты, по которым ускоренно движутся электроны, но излучения света при этом не происходит.

Второй постулат Бора (правило квантования орбит): в стационарном состоянии атома электрон, движущийся по круговой орбите, имеет квантованные значения момента импульса, удовлетворяющие условию:

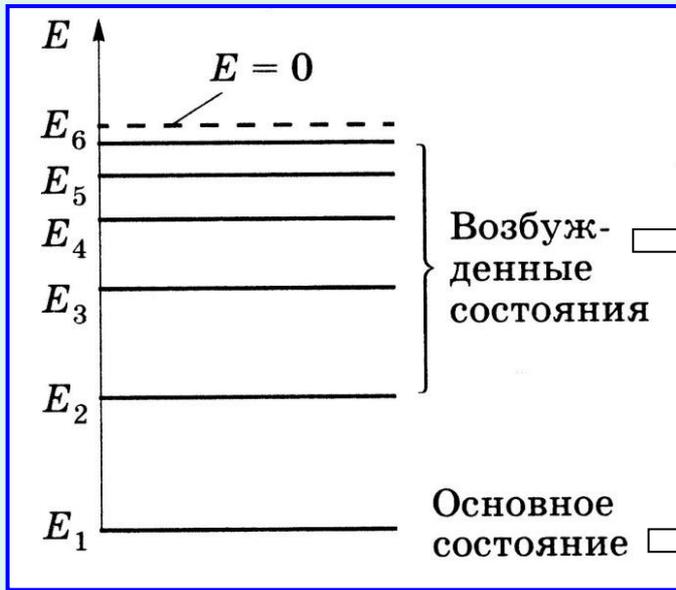
$$L_k = m v r = k h / 2 \pi \quad (k=1, 2, 3, \dots)$$

где m – масса электрона, v – его скорость, r – радиус k -ой орбиты, $k = 2 \pi r / \lambda$

Третий постулат Бора (правило частот): при переходе атома из одного стационарного состояния в другое испускается или поглощается один фотон.

При этом испускается (или поглощается) фотон монохроматического излучения с энергией, равной разности энергетических уровней E_m и E_n , соответствующих этим состояниям: $h \nu = E_m - E_n$,

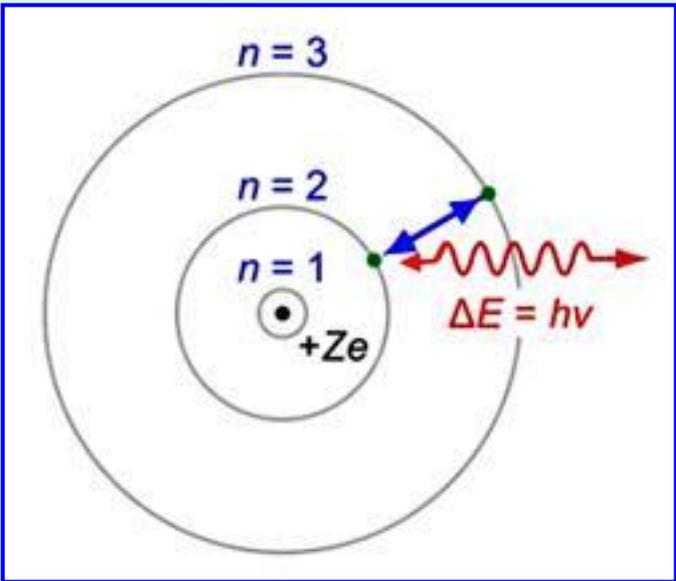
где E_m и E_n – энергия системы в первом и втором состояниях.



$$E_n > E_1$$

Возбужденные энергетические уровни

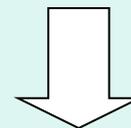
Основной энергетический уровень – самый нижний уровень отвечающий минимальной возможной энергии.



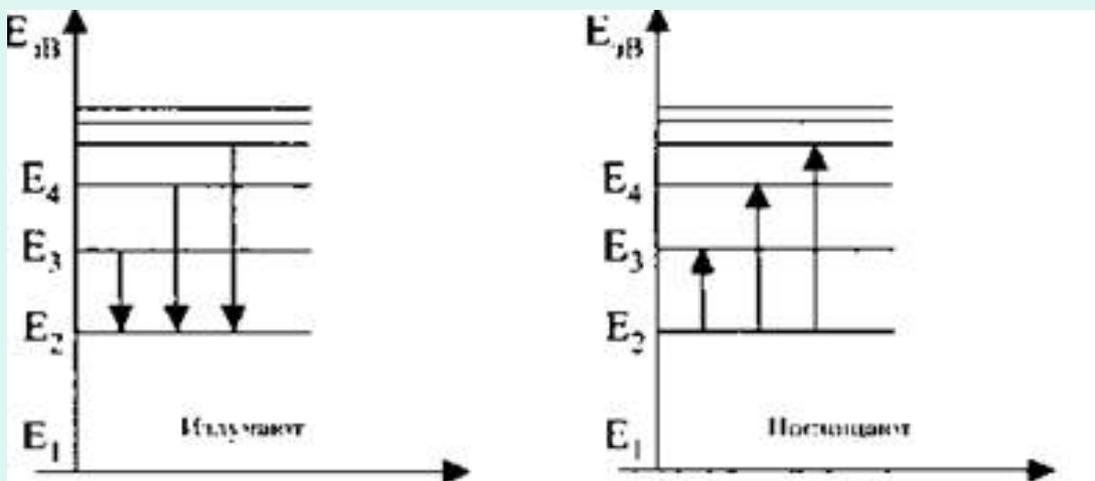
Энергия электрона в атоме водорода, выраженная в электронвольтах

$$E_n = -\frac{13.6}{n^2} \text{ эВ}$$

Согласно Бору при переходе атома из одного стационарного состояния в другое излучается (поглощается) фотон с энергией



$$\hbar \omega = E_m - E_n$$



Набор возможных дискретных частот квантовых переходов и определяет линейчатый спектр атома.

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

Эмиссионный и абсорбционный спектральный анализ, его медицинское применение

Спектры поглощения и испускания вещества являются источником информации о качественном составе (из каких молекул или атомов состоит вещество), количественном соотношении различных компонентов вещества, их состоянии и структурной организации.

В спектральном анализе используют как **спектры испускания** (*эмиссионный спектральный анализ*), так и **спектры поглощения** (*абсорбционный спектральный анализ*).

В зависимости от энергии (частоты) фотона, испускаемого или поглощаемого атомом (или молекулой), классифицируют следующие виды спектроскопии: радио-, ИК, УФ, видимого излучения, рентгеновская.

В медицинских целях **эмиссионный анализ** служит в основном для **определения микроэлементов в тканях организма**, небольшого количества атомов металлов в консервированных продуктах с гигиенической целью, некоторых элементов в трупных тканях для целей судебной медицины и так далее.

Приборы для визуального наблюдения спектров называются спектроскопами.

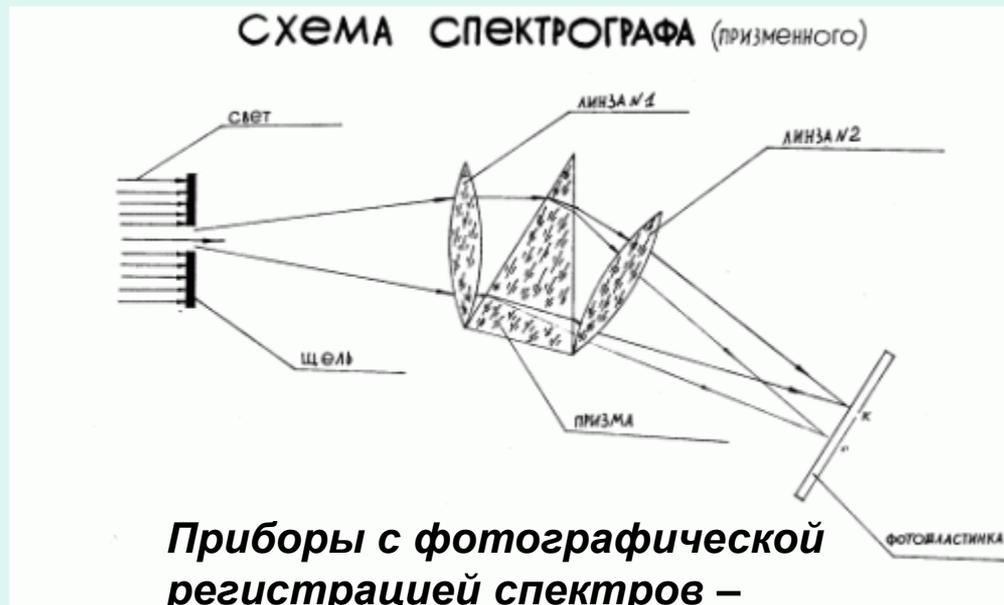
Они используются в видимой (380-760 нм) области в соответствии со спектральной чувствительностью глаза.

Приборы с фотографической регистрацией спектров – спектрографы – применяются **в видимой и ультрафиолетовой областях** в соответствии с чувствительностью фотоматериалов.

Приборы с фотоэлектрическими и тепловыми приемниками излучения, называемые **спектрометрами или спектрофотометрами**, позволяют **анализировать излучение от ультрафиолетовой до далекой инфракрасной области.**



Приборы для визуального наблюдения спектров называются **спектрскопами**.



спектрофотометры,
ПОЗВОЛЯЮТ
анализировать
излучение от
ультрафиолетовой
до инфракрасной
области. (СФ-46)

Рассеяние света

Рассеянием света называется явление преобразования света веществом, сопровождающееся изменением направления распространения света и проявляющееся как несобственное свечение вещества.

Различают два основных вида таких неоднородностей:

Неоднородность состава (гетерогенность) среды, т.е. наличие в однородном веществе инородных частиц.

Такие среды называются **мутными**, к ним относятся **взвеси, эмульсии, дым (твердые частицы в газе), туман (капельки жидкости в газе)** и т.п. Рассеяние света в мутных средах называют **рассеянием Тиндаля**, по имени английского физика, впервые (1868) изучившего это явление.

Оптические неоднородности, возникающие в однородной (гомогенной) среде вследствие флуктуации плотности.

Рассеяние света на таких неоднородностях называют **молекулярным рассеянием (рассеянием в чистых средах)** или **рассеянием Рэлея**. (1871).

Закон Рэля

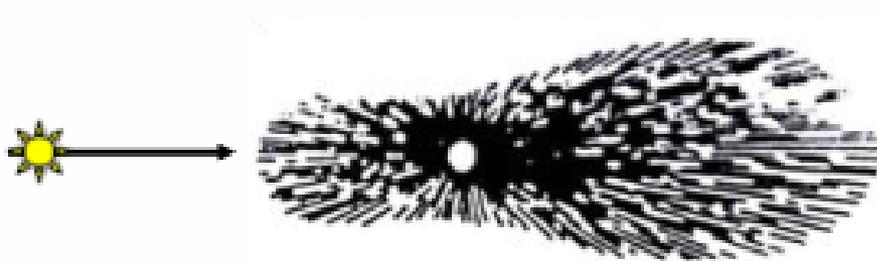
Интенсивность рассеянного света *обратно пропорциональна* четвертой степени длины волны - *закон Рэля*:

$$I_{\text{рас}} \sim \frac{1}{\lambda^4}$$

В однородной чистой среде будут *рассеиваться преимущественно голубые и фиолетовые* лучи, а *красные* лучи будут лучше проходить сквозь нее. Поэтому спектр рассеянного излучения сильно смещается в *сине-голубую* область, а прошедшего - в *красную*.

2. Рассеяние в мутных средах (рассеяние Тиндаля)

$d > 0,2 \lambda$ (дым, туман, суспензии и т.п.)



$$I_{\text{расс}} \approx \frac{1}{\lambda^2}$$

Спектр рассеянного излучения **меньше смещается** в сине-голубую область и становится **белее**.

3. Для крупных частиц ($d \gg \lambda$) зависимость $I_{\text{расс}}$ от λ практически **исчезает** (белый цвет облаков).

При одновременном наличии *поглощения и рассеяния* в среде

$$I_{\text{пр}} = I_0 e^{-(\sigma + k)x}$$

где $(\sigma + k) = \mu$ – *показатель ослабления*,

Свет, рассеянный веществом, несет информацию о физическом строении и свойствах этого вещества.

Исследование рассеянного света (его поляризации, направления, спектра) называют *нефелометрией*, а соответствующие приборы – *нефелометрами*.

Например: Определения состояния и состава атмосферы путем исследования рассеянного света проводится в настоящее время специальными **лазерными** приборами-**лидарами**.

➤ **Изучая параметры рассеянного излучения** (спектр, степень поляризации, индикатрису рассеяния и ряд других), **можно определить свойства рассеивающей среды**, получить информацию о **межмолекулярных взаимодействиях, размерах макромолекул среды, частиц в коллоидных растворах и эмульсиях, определить состав аэрозолей** и другие параметры.

➤ Методы исследования рассеянного излучения с целью получения подобной информации называют **нефелометрией**, а соответствующие приборы — **нефелометрами**.

➤ В настоящее время широко **используется зондирование атмосферы специальными лазерными установками (лидарами)**, которое позволяет по **измеренным характеристикам рассеянного атмосферой лазерного излучения определить качественный и количественный состав аэрозолей** на расстояниях в несколько километров от источника излучения.

Люминесценция света

Если **атом** или **молекулу** каким-либо образом *перевести в возбужденное электронное состояние*, то они затем **самопроизвольно возвращаются в основное электронное состояние**.

Электромагнитное излучение, сопровождающее такие переходы, называют **люминесценцией**.

Чтобы отличать люминесценцию от теплового излучения тел и рассеянного света, **С.И. Вавилов** предложил следующее ее определение:

Люминесценция — это излучение, **превышающее тепловое при данной температуре** и имеющее **длительность послесвечения много больше периода световых колебаний** (т.е. $\tau > 10^{-15}$ с).

Интенсивность люминесценции вещества в сотни раз **превышает интенсивность его теплового излучения в том же спектральном диапазоне**, поэтому ее часто называют **холодным свечением**.

ВИДЫ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ПО СПОСОБУ ВОЗБУЖДЕНИЯ:

❖ **Фотолюминесценция** – возбуждение происходит в результате поглощения электромагнитного излучения (обычно видимого или ультрафиолетового диапазонов).



До облучения

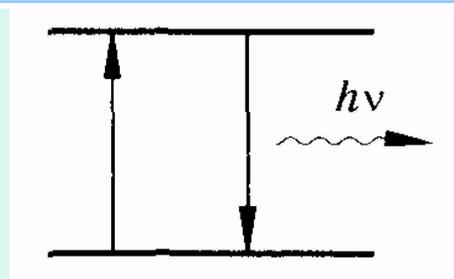


облучение



люминесценция

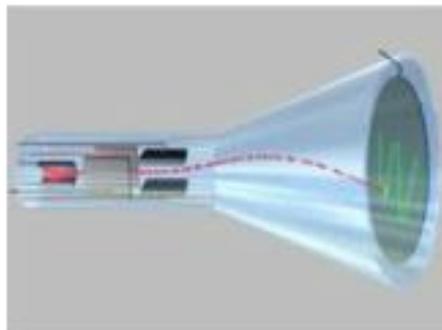
При **резонансной флуоресценции** происходит **возбуждение атома или молекулы фотоном с энергией $h\nu$** , после которого **атом возвращается в основное состояние, излучая фотон света той же частоты ν** .



Катодолюминесценция : люминесценция, вызванная заряженными частицами: электронами

Электрорюминесценция : люминесцируют электронно-возбужденные молекулы (атомы).

❖ **Катодолюминесценция** – возбуждение производится электронным ударом по атомам или молекулам вещества (наблюдается *в кинескопах, электронно-лучевых трубках* и т.п..).



❖ **Электрорюминесценция** – возбуждение атомов и молекул производится *электрическим полем*.



❖ Люминесценцию, сопровождающую экзотермическую химическую реакцию, называют **хемилюминесценцией**.

❖ Люминесценцию под воздействием **рентгеновского и γ -излучения** называют **рентгенолюминесценцией**

❖ **Рентгенолюминесценция** – возбуждение производится **рентгеновскими лучами**. (рентгенолюминесцирующие экраны)

❖ **Хемилюминесценция** – возбуждение происходит в результате химической реакции, по схеме: $A + B \rightarrow AB^* \rightarrow AB + h\nu$ (квант люминесценции).



❖ **Биолюминесценция** - возбуждение молекул происходит в результате биохимических реакций, происходящих в живом организме.



Хемилюминесценция
— в результате химической реакции между молекулами **A** и **B** образуется их соединение в **возбужденном состоянии**, при переходе из которого в основное состояние **испускается квант люминесценции**

КЛАССИФИКАЦИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

ПО ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПОСЛЕСВЕЧЕНИЯ τ :

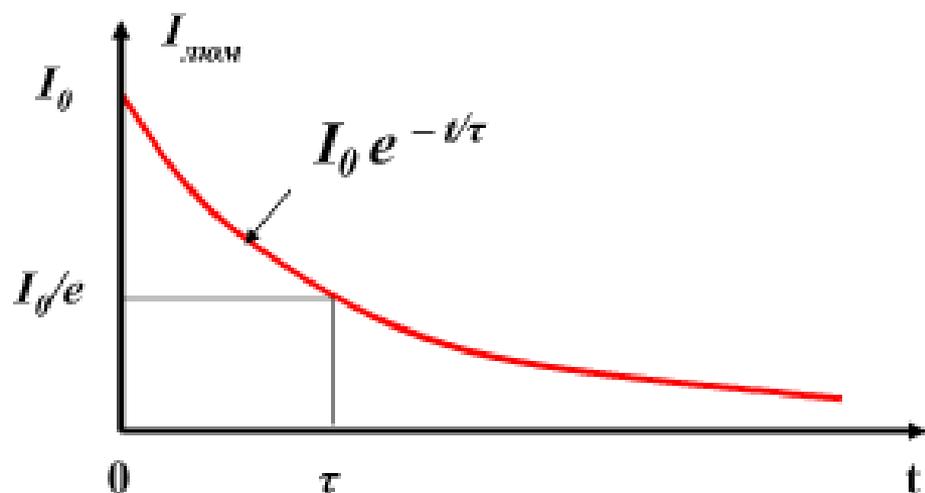
❖ флуоресценция, если $\tau < 10^{-7}$ с, т.е. затухание люминесценции происходит **очень быстро** (для глаза – мгновенно);

❖ фосфоресценция, если $\tau > 10^{-4}$ с, – в этом случае затухание идет сравнительно **медленно** и часто хорошо наблюдается невооруженным глазом.

➤ Флуоресценция возникает в результате разрешенных оптических переходов с возбужденных электронных состояний в основное, вероятность этих переходов очень велика, поэтому время высвечивания мало.

➤ Фосфоресценция происходит в результате оптических переходов, запрещенных правилами отбора квантовой механики, вероятность их очень мала (в 10^6 - 10^4 раз меньше, чем вероятность разрешенных переходов, т.е. флуоресценции), и соответственно время высвечивания (время жизни в возбужденном состоянии) весьма велико.

ЗАТУХАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ВО ВРЕМЕНИ



$$I_{\text{люм}} = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

- ❖ I_0 – интенсивность стационарной люминесценции;
- ❖ t – время, прошедшее после прекращения возбуждения.
- ❖ τ – длительность люминесценции.

τ определяет время, за которое интенсивность люминесценции уменьшается в $e = 2,7$ раз .

Параметр τ называют также **длительностью послесвечения** или **временем жизни** возбужденного состояния.

Основные характеристики и законы люминесценции

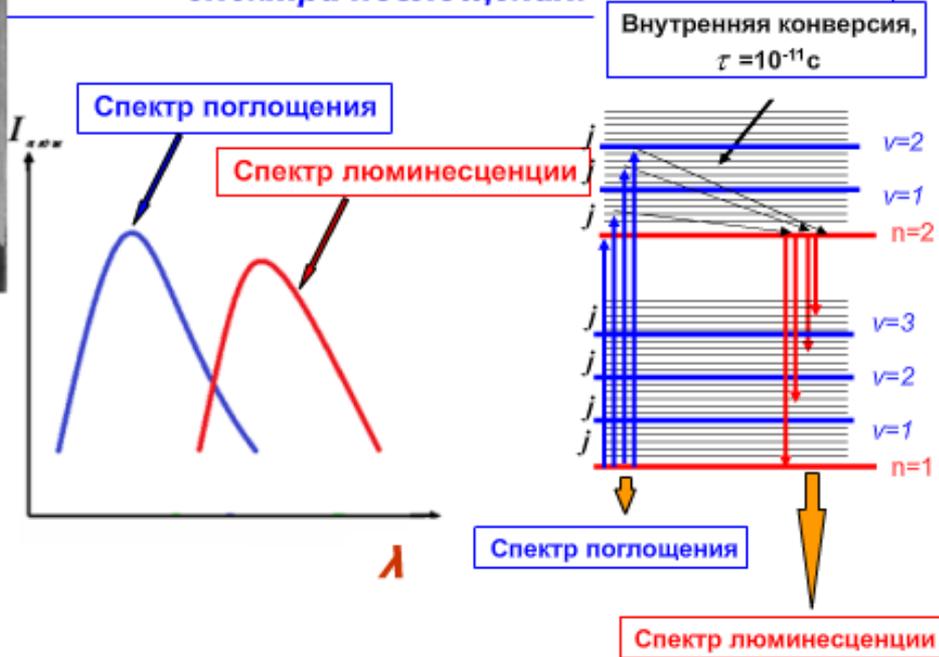
- **Спектр люминесценции** — зависимость интенсивности люминесценции от длины волны или от частоты $I(\lambda)$
- **Длительность люминесценции** τ — это время, за которое интенсивность люминесценции уменьшается в $e = 2,7$ раз
- **Квантовый выход люминесценции** — это отношение числа квантов люминесценции к количеству квантов, поглощенных при возбуждении молекулы: $\gamma = n_{\text{люм}} / n_{\text{погл}}$ Квантовый выход всегда $\gamma < 1$ из-за наличия неоптических переходов, вещество считается хорошо люминесцирующим, если $\gamma > 0,01 = 1\%$.
- **Спектр возбуждения** — это зависимость интенсивности фотолюминесценции от длины волны возбуждающего излучения (для многих молекул он совпадает с их спектром поглощения).
- **Степень поляризации люминесценции** определяется при возбуждении вещества линейно поляризованным светом и позволяет оценить скорость вращения люминесцирующей молекулы и вязкость ее окружения.

Правило Стокса

Спектр люминесценции вещества всегда смещен в область более длинных волн относительно его спектра поглощения.



Дж. Г. Стокс,
1819 -1903



В возбужденных колебательно-вращательных состояниях молекула долго находится не может и за время $10^{-11}-10^{-12}$ совершает безызлучательные переходы на, самые нижние колебательно-вращательные подуровни этого же электронного состояния, — это явление называется **внутренней конверсией**.

Причина сдвига спектров заключается в том, что электронный переход при поглощении происходит с нижнего колебательного уровня основного состояния на любые колебательные уровни возбужденных электронных уровней. Вследствие внутренней конверсии испускание электромагнитных квантов происходит при переходе молекулы с самых нижних подуровней возбужденных состояний на любые подуровни нижележащих электронных состояний.

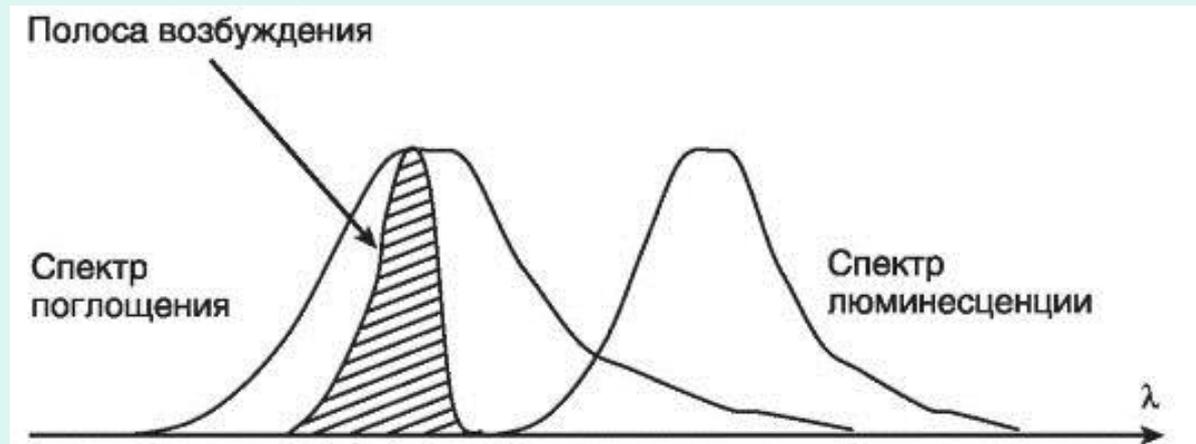
В результате образуются **полосы испускания (люминесценции)** — первая, вторая и т.д., которые не совпадают по частоте с полосами поглощения, а **смещены относительно них в сторону меньших частот (больших длин волн)**

Закон Вавилова



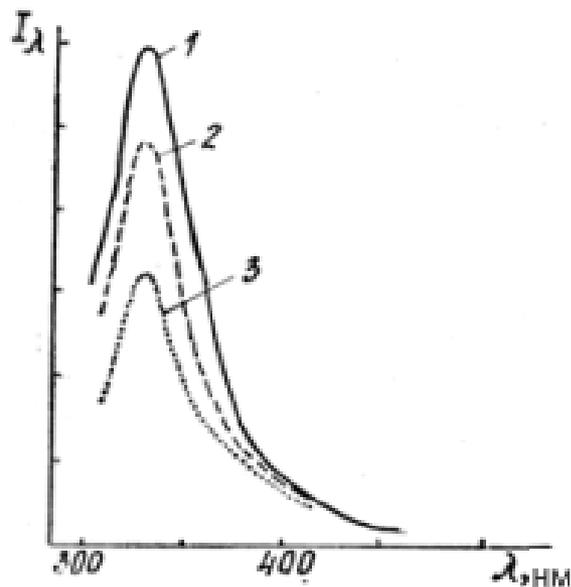
С.И. Вавилов
1891-1951

Закон Вавилова: квантовый выход и спектр люминесценции сложных молекул не зависят от длины волны возбуждения.



Основное требование к спектральному диапазону волн, используемых для возбуждения люминесценции, — *спектр возбуждения должен попадать внутрь полосы поглощения вещества.*

Собственная люминесценция биомолекул.



УФ- флуоресценция:

- 1-мышечных волокон,
- 2- нейронов,
- 3- эритроцитов.

- 1) **УФ-люминесценция белков** обусловлена свечением 3 аминокислот:
- **Триптофана** ($\lambda_{\text{макс}}=348$ нм, $\gamma=0,20$)
- **Тирозина** ($\lambda_{\text{макс}}=303$ нм, $\gamma=0,21$)
- **Фенилаланина** $\lambda_{\text{макс}}=282$ нм, $\gamma=0,04$)

В видимой части спектра **люминесцируют:**

- **Пиридиннуклеотиды (НАД·Н)** $\lambda_{\text{м}}=470$ нм;
- **Флавины (вит В₂)**, $\lambda_{\text{макс}}=530$ нм;
- **Билирубин**, $\lambda_{\text{макс}}=500-550$ нм;
- **Порфирины**, $\lambda_{\text{макс}}=600-650$ нм;

Интенсивность и положение максимума флуоресценции биомолекул сильно зависят от их связывания с другими молекулами (белками крови и др.) – широко используется!!

Люминесцентный анализ в 1000 раз чувствительнее абсорбционного спектрального анализа и позволяет обнаруживать люминесцирующее соединение при концентрации 10^{-12} г/л .

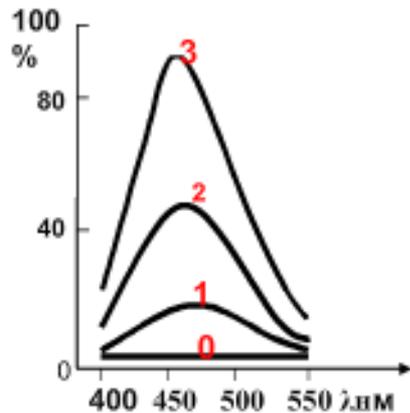
- **Люминесцентный анализ** - метод определения состава вещества по характерному его свечению

- Позволяет обнаруживать наличие ничтожных примесей и применяется в биологии, медицине, пищевой промышленности.

- **Люминесцентная дефектоскопия** позволяет обнаружить мельчайшие трещины на поверхности деталей.

Вторичная люминесценция.

Метод люминесцентных меток и зондов.



Зависимость интенсивности люминесценции зонда АНС от концентрации САЧ в растворе:
0 — отсутствие САЧ;
1, 2, 3 — возрастающие концентрации САЧ.

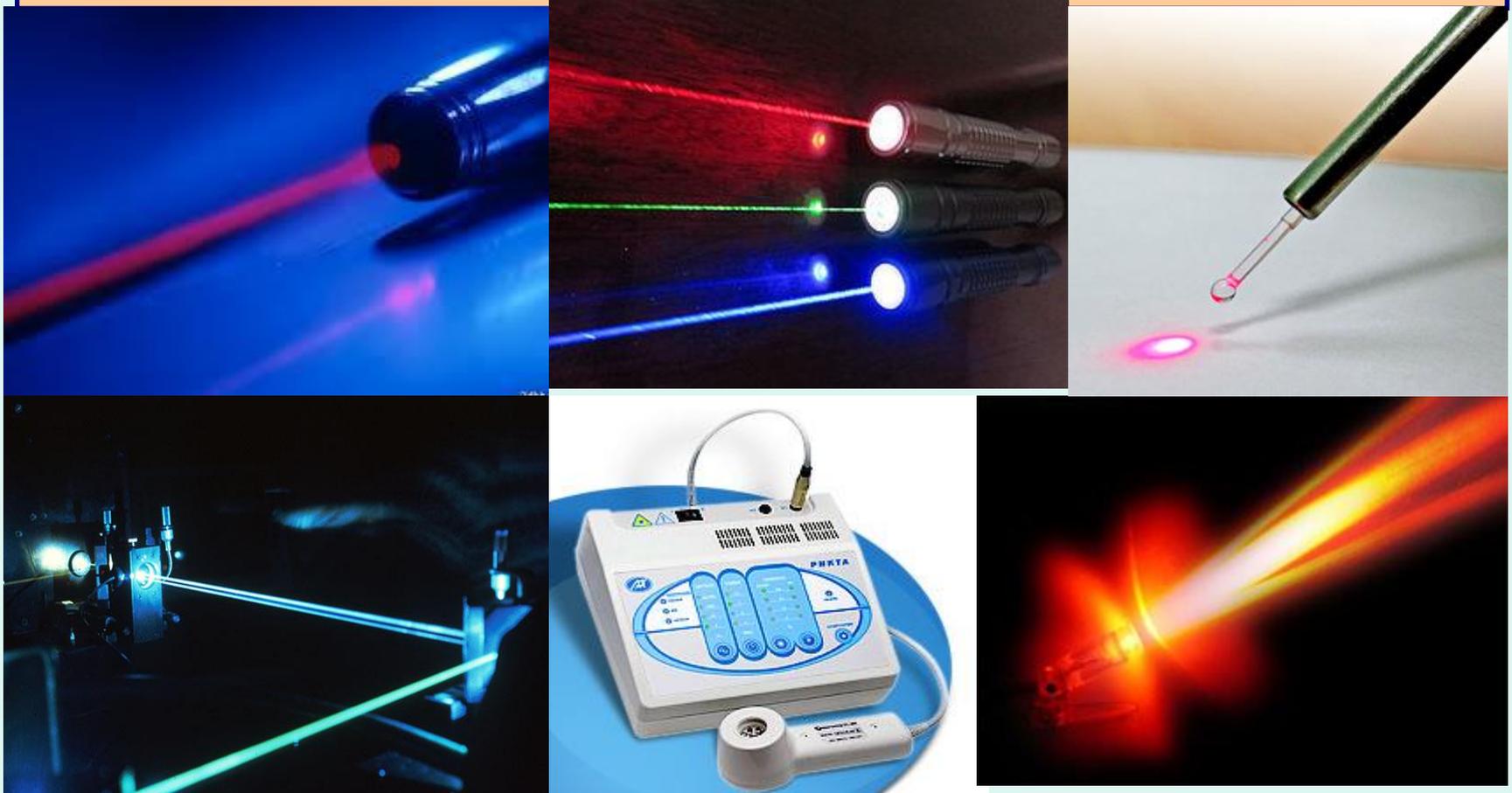
Многие биологически важные соединения **не люминесцируют**.

- **Флуоресцентные зонды** - это люминесцирующие соединения, которые **избирательно взаимодействуют** с определенными компонентами клетки и отдельными молекулами;
- Образующийся **комплекс (флуоресцентный зонд + вещество)** имеет как правило **более интенсивную флуоресценцию**, чем зонд в несвязанном состоянии.
- **Свечение этого комплекса** под действием возбуждающего излучения называют **вторичной (наведенной) или зондовой флуоресценцией**.

Зависимость **флуоресценции зонда (АНС)** от концентрации **сывороточного альбумина человека (САЧ)** в водном растворе. В чистой воде (**кривая 0**) флуоресценция зонда очень слаба (квантовый выход 0,006), но по мере связывания с белком квантовый выход возрастает до 0,3-0,8, т.е. в 50-100 раз (**кривые 1-3**).

Эта особенность люминесценции зонда АНС **используется для экспресс-анализа степени очистки сывороточного альбумина человека при проведении гемо- и лимфо-сорбции**.

Лазер: **LASER** — **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation
(*Усиление света в результате вынужденного излучения*)
генератор электромагнитных волн в диапазоне ультрафиолетового, видимого и инфракрасного излучения, характеризующийся высокой степенью монохроматичности и когерентности.



Принцип работы оптического квантового генератора

(лазера)

Необходимые условия для получения когерентного излучения :

- *наличие инверсной заселенности*, т. е. число атомов в более высоком состоянии должно превышать число атомов в более низком состоянии;
- *наличие метастабильного состояния*, т. е. такого возбужденного энергетического состояния атомной системы, в котором она может существовать длительное время, в результате чего переход в более низкое состояние происходит благодаря **вынужденному**, а не спонтанному излучению.

The Nobel prize in physics 1964



Charles H. Townes
(b. 1915)



Николай Басов
(1922 - 2001)



Александр Прохоров
(1916 – 2002)

«За фундаментальные разработки в области квантовой электроники, которые привели к созданию квантовых усилителей и генераторов электромагнитных излучений (лазеров)».

Лазеры – это приборы, генерирующие очень узкий пучок монохроматического когерентного излучения высокой интенсивности в оптическом диапазоне и работающие на основе эффекта вынужденного излучения в активной среде с инверсной заселенностью энергетических уровней.

Классификация лазеров

Тип активной среды	Метод накачки	Режим генерации
Твердотельные Газовые Полупроводниковые Жидкостные	Оптические Тепловые Химические Электроионизационные и др.	Непрерывный Импульсный

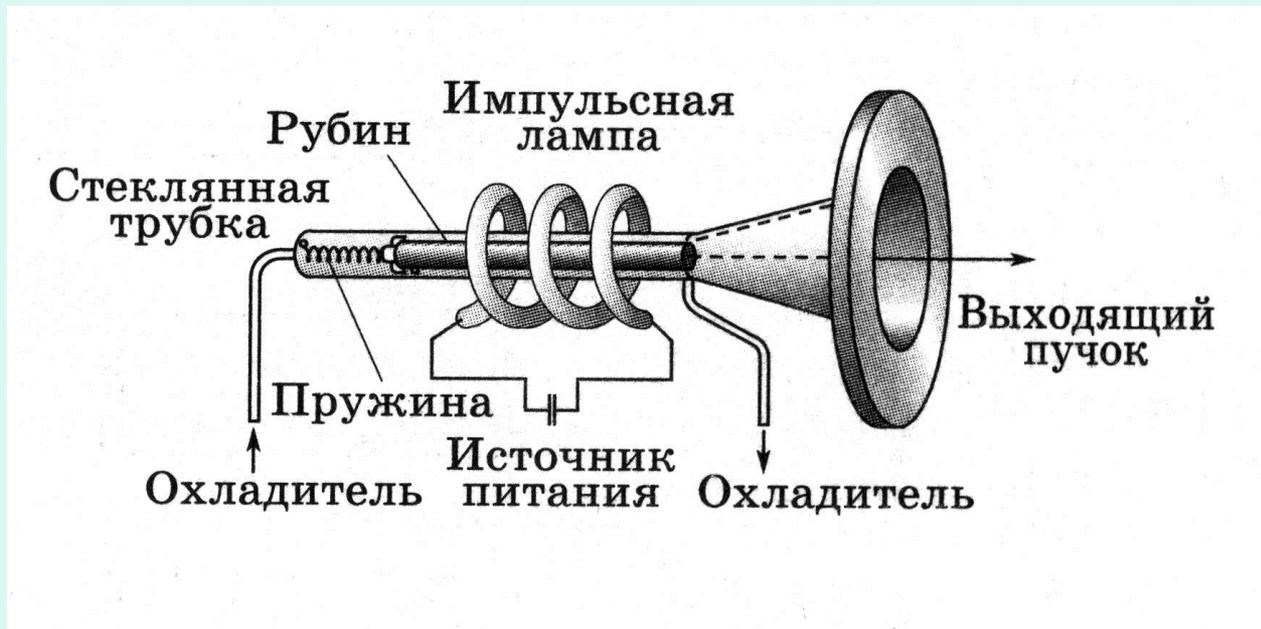
ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

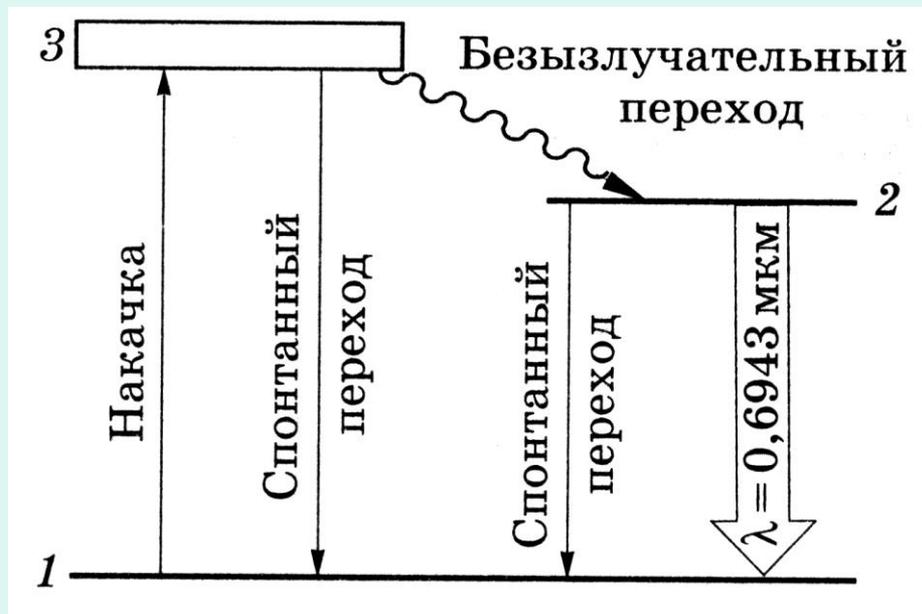
- ✓ **Высокая направленность** - определяется **свойствами резонатора**, т.к. максимально усиливается лишь излучение, распространяющееся перпендикулярно его зеркалам;
- ✓ **Высокая монохроматичность** – определяется прежде всего длиной волны и **шириной линии люминесценции** (лазерного перехода) **активной среды**, а в пределах ширины этой линии – **свойствами резонатора**;
- ✓ **Высокая когерентность** - является прямым следствием **когерентных свойств вынужденного излучения**;
- ✓ **Высокая спектральная плотность мощности** - $I/\Delta\lambda$ - отношение интенсивности лазерного излучения к ширине спектральной линии этого излучения - **превосходит все остальные источники**.

Принципиальная схема рубинового (твердотельного) лазера

В качестве активной среды используется *кристалл рубина* (оксид алюминия) Al_2O_3

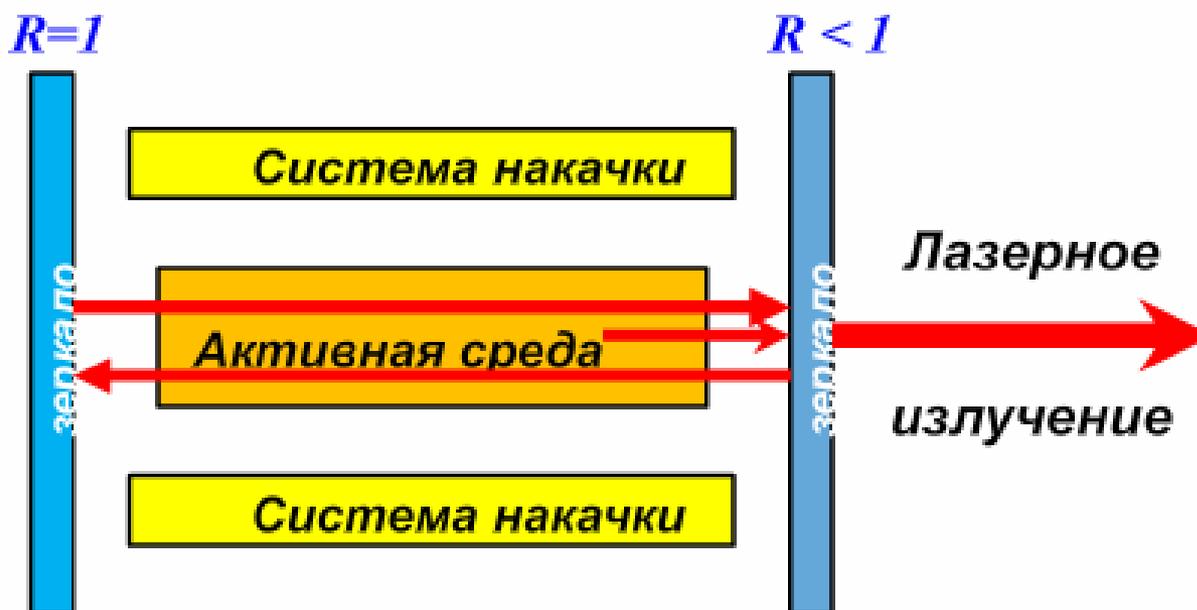
В кристаллической решетке оксида алюминия часть атомов Al заменена ионами Cr^{3+} , которые и участвуют в лазерной генерации.





- Процесс **оптической накачки** заключается в том, что при интенсивном облучении светом мощной импульсной лампы **атомы хрома переходят с нижнего уровня 1 на уровни широкой полосы 3**. Из состояния 3 атомы **либо возвращаются в состояние 1, либо переходят в метастабильное состояние 2**.
- При безызлучательном переходе избыток энергии передается непосредственно кристаллической решетке, в результате чего кристалл рубина нагревается. **Чтобы избежать перегрева рубинового стержня, в конструкции лазера предусмотрена система охлаждения.**
- **время жизни метастабильного состояния $\sim 10^{-3}$ с.**
- При мощной накачке **создается инверсная заселенность уровней**, необходимая для генерации лазерного излучения.
- **Каждый фотон**, случайно родившийся при спонтанных переходах $2 \rightarrow 1$, **может инициировать множество вынужденных переходов**

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ЛАЗЕРА



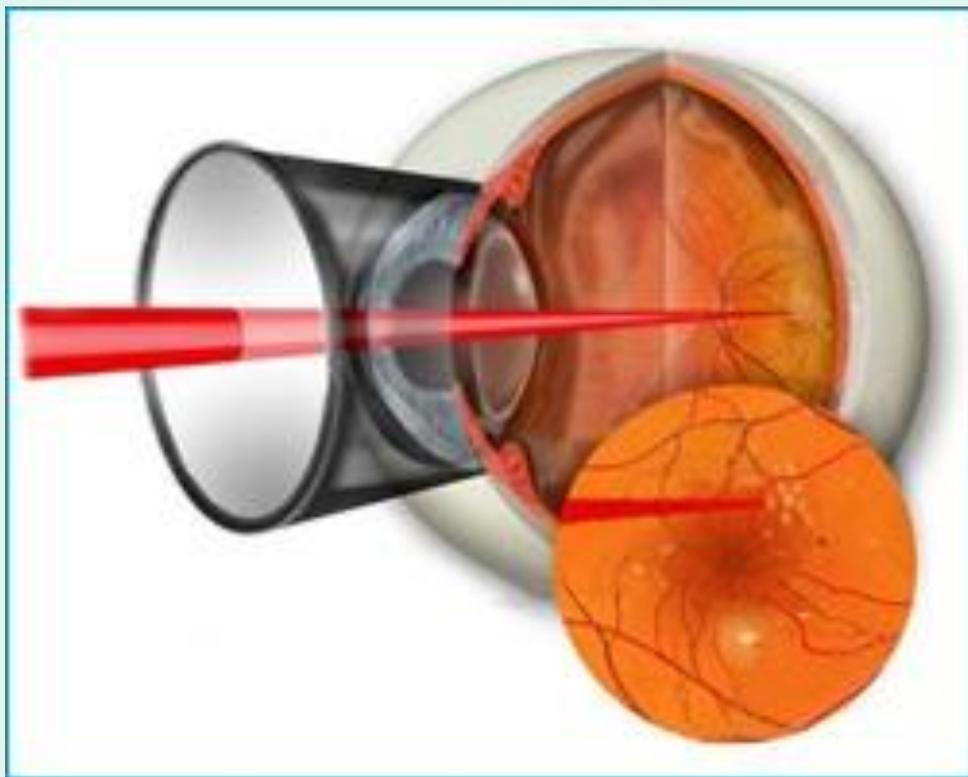
- ❖ **система накачки** создает **инверсную заселенность** в активной среде;
- ❖ **активная среда** при определенных условиях **генерирует и усиливает** лазерное излучение;
- ❖ **резонатор** (система зеркал) **формирует направленное** излучение лазера и **заставляет** излучение **многократно проходить** через активную среду.

ЛАЗЕРЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В МЕДИЦИНЕ :

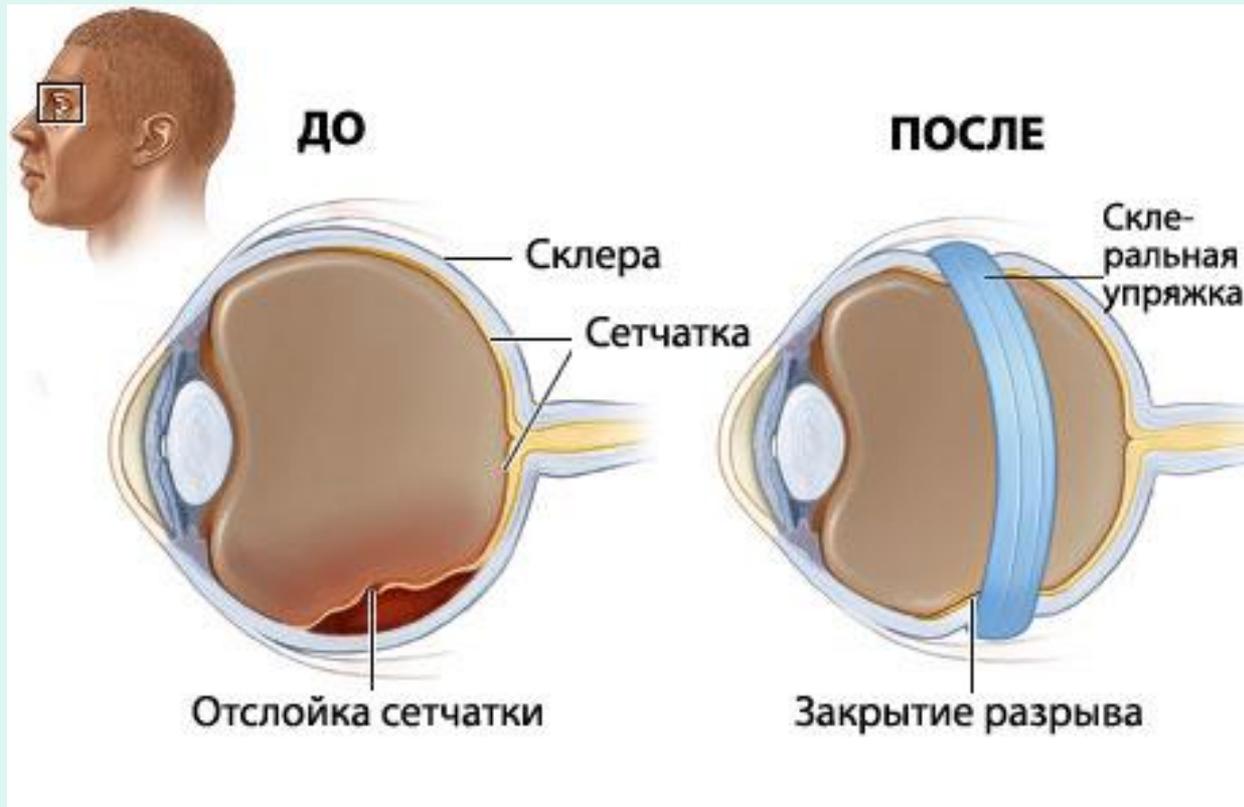
- ❖ **низкоинтенсивные** – интенсивность составляет около **0,1 - 0,01 Вт/см²**, используются **в терапии**;
- ❖ **среднеинтенсивные непрерывного действия** **10 - 15 Вт/см²** используются **в хирургии**;
- ❖ **высокоинтенсивные (импульсные)** – интенсивность наиболее мощных лазеров может достигать **10¹⁴ Вт/см²**.

В медицине импульсные и частотные лазеры с интенсивностью **10² - 10⁶ Вт/см²** используются **в хирургии**.

Впервые для хирургического лечения глаз лазер был применен в 60-х годах XX века.

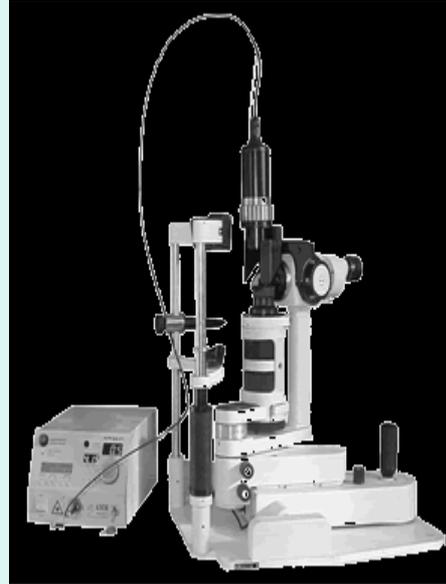
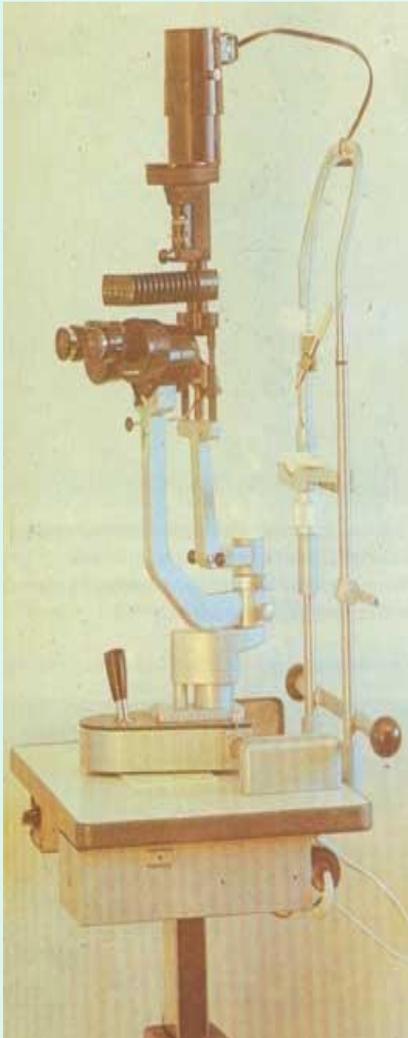


Отслоение сетчатки



Импульсное излучение твердотельных лазеров на рубине широко используется в офтальмологии при **проведении бескровных хирургических операций на сетчатке глаза** (**приваривание отслоившейся сетчатки, коагуляция лопнувших сосудов и т.п.**), а также в **микрохирургии переднего отдела глаза**.

В офтальмологии используется четыре типа лазерных установок.



- **Офтальмокоагуляторы**
- **Офтальмоперфораторы**
- **Экшерные лазеры**
- **Стимуляционные**



Лазер стал широко применяться в лечении заболеваний сетчатки, и, несомненно, он станет еще более распространенным методом в будущем. Точнее становится наведение лазерного луча, который удаляет аномальные кровеносные сосуды, не травмируя прилежащие здоровые ткани. Методы лечения дегенерации желтого пятна и диабетической ретинопатии также совершенствуются.



РУБИНОВЫЙ ЛАЗЕР

Эстетическая медицина – лечение эпидермальной гиперпигментации, фотодеструкция красителя татуировок



$\lambda = 694 \text{ нм},$
 $t = 20 \text{ нс} - 2 \text{ мс},$
 $E = 0,1-2,0 \text{ Дж},$
Частота 1-5 Гц



В косметологии также используют лазеры разных спектральных диапазонов и мощностей в зависимости от объекта и цели воздействия.

ЭРБИЕВЫЙ ЛАЗЕР

Полостная хирургия, эстетическая медицина
абляция мягких и твердых тканей, санация
и стерилизация гнойных ран.



Er:YAG

Длина волны
2936 нм

Энергия импульса
0,1 - 2 Дж

Длительность
0,1 - 0,3 мс

Частота
до 10 Гц

$\lambda = 2936 \text{ нм},$
 $t \approx 0,1 - 0,3 \text{ мс},$
 $E = 0,1 - 2 \text{ Дж},$
Частота до 10 Гц



НЕОДИМОВЫЙ ЛАЗЕР (Nd: YAG)

- **Хирургия** полостная и эндоскопическая-
удаление и коагуляция мягких и твердых тканей



$\lambda = 1340 \text{ нм},$
 $t \approx 0,3 \text{ мс},$
 $W = \text{до } 40 \text{ Вт},$
Частота до 100 Гц



В хирургии мягких тканей в основном используется **инфракрасное непрерывное излучение газовых лазеров** средней мощности (10-30 Вт), которые позволяют проводить как **рассечение тканей** на нужную глубину, так и их **коагуляцию с возможностью обеспечения биологической сварки тканей**, в том числе сварки стенок сосудов и т.п.