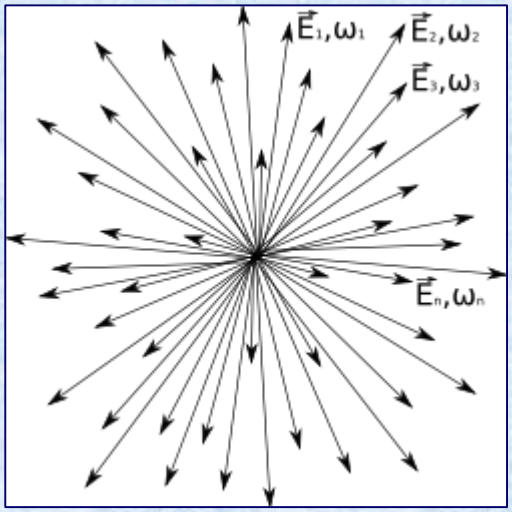
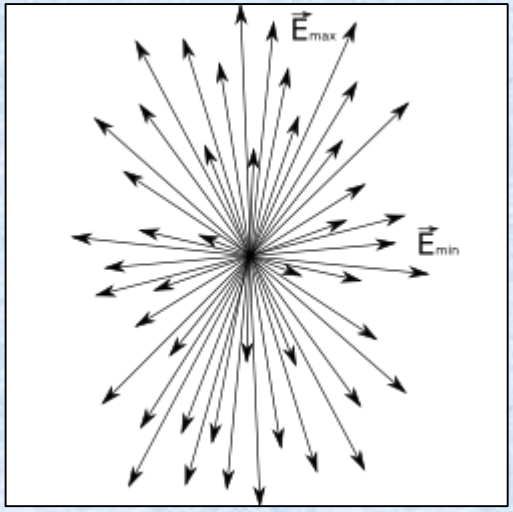
Поляризация света

- **Естественный свет** - совокупность электромагнитных волн со всевозможными **равновероятными направлениями** световых векторов (напряженности электрического поля $\vec{E}$), перпендикулярных направлению распространения света.
- **Поляризованным светом** называется свет, в котором направления **колебания** вектора напряженности электрического поля $\vec{E}$ каким-либо образом **упорядочены**.
- **Частично поляризованный свет** — свет с преимущественным направлением колебаний вектора $\vec{E}$.



Естественный свет

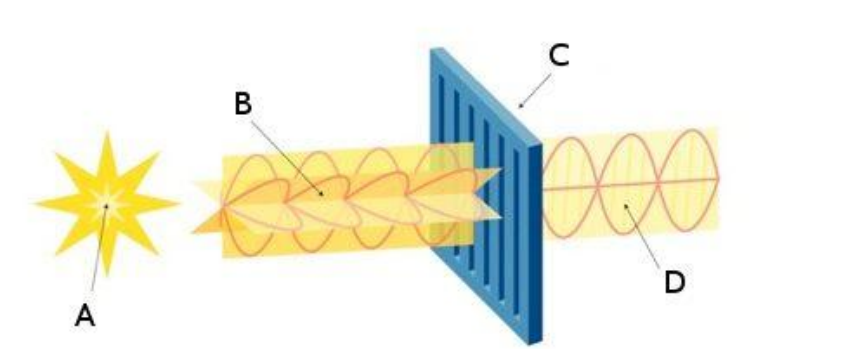


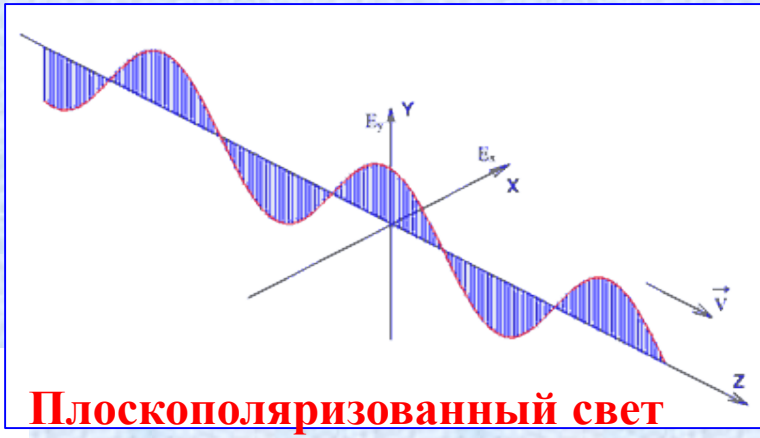
Частично-поляризованный свет

Виды поляризации: Плоская поляризация

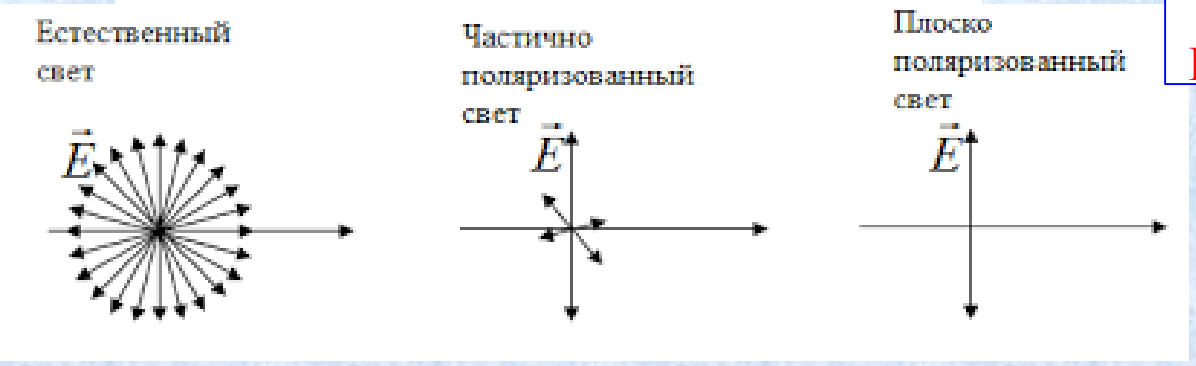
Плоскополяризованный свет — **свет** в котором вектор напряженности электрического поля $\vec{E}$ **колеблется только в одной, проходящей через луч плоскости.**

Плоскость поляризации – это плоскость, проходящая через вектор напряженности электрического поля $\vec{E}$ и направление распространения электромагнитной волны.





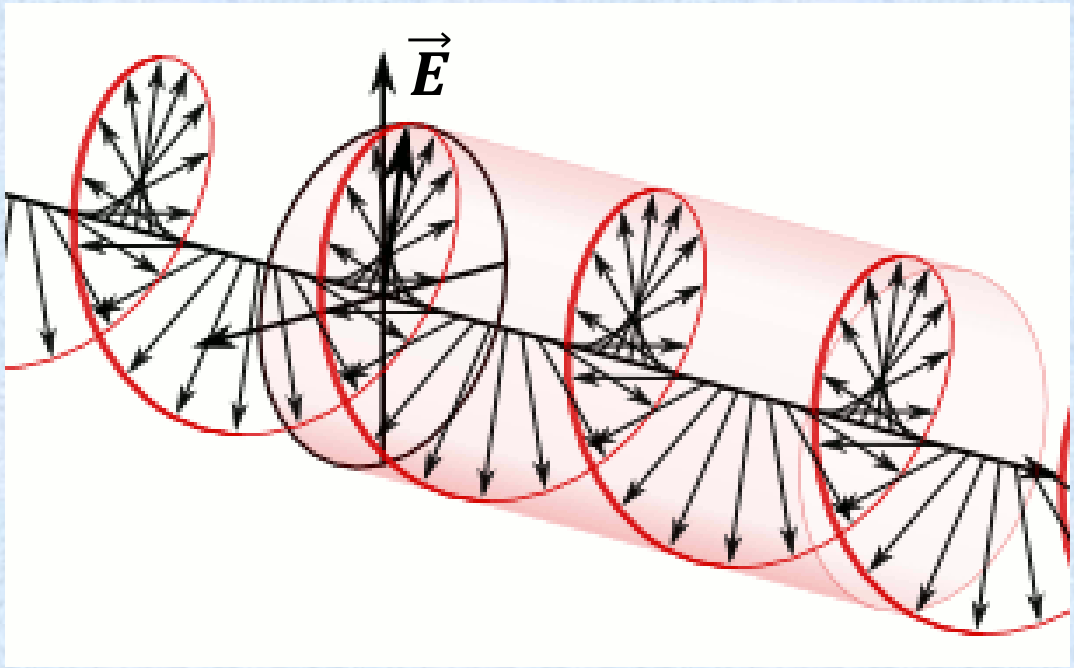
Плоскополяризованный свет



Виды поляризации: Круговая поляризация

Свет с круговой поляризацией — **свет** в котором конец вектора $\vec{E}$ **с течением времени описывает в плоскости окружность.**

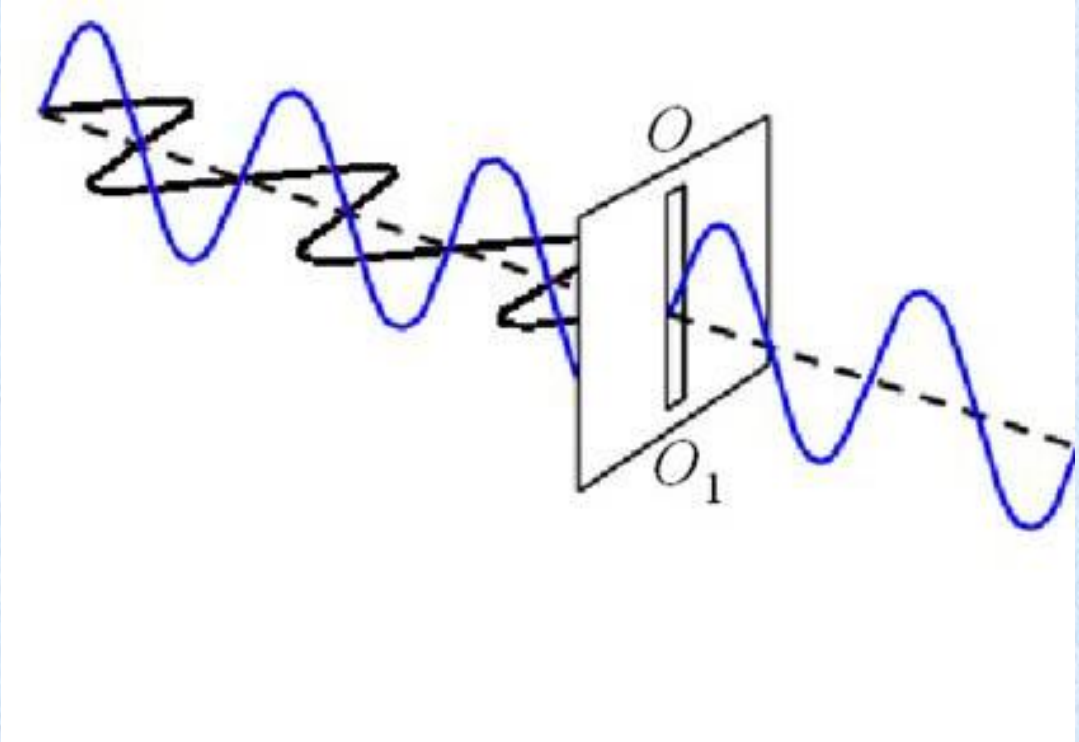
Если концы вектора $\vec{E}$ перпендикулярного лучу, с течением времени описывают в плоскости **эллипс**, то свет называется **циркулярно или эллиптически поляризованным**.



Круговая поляризация

Поляризаторы

Поляризатор - устройство для получения полностью или частично поляризованного света



Поляризатор «пропускает» только проекцию светового вектора $\vec{E}$ на некоторую плоскость, которую называют **главной плоскостью поляризатора**.

Анализаторы

Анализатор - это поляризатор, используемый для определения степени поляризации.

Из поляризатора выходит поляризованный свет, **интенсивность которого равна половине интенсивности падающего естественного** (неполяризованного) **света**.

Обнаружить наличие поляризации света и определить ее степень можно с помощью второго поляризатора - анализатора.

Закон Малюса

Если плоскополяризованный свет с амплитудой электрического вектора $\vec{E}_0$ падает на **анализатор**, то он **пропустит** только составляющую, равную:

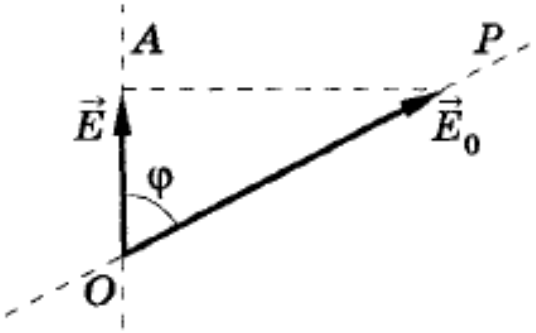
$$E = E_0 \cos\varphi$$

где **φ** — угол между главными плоскостями поляризатора **P** и анализатора **A.**

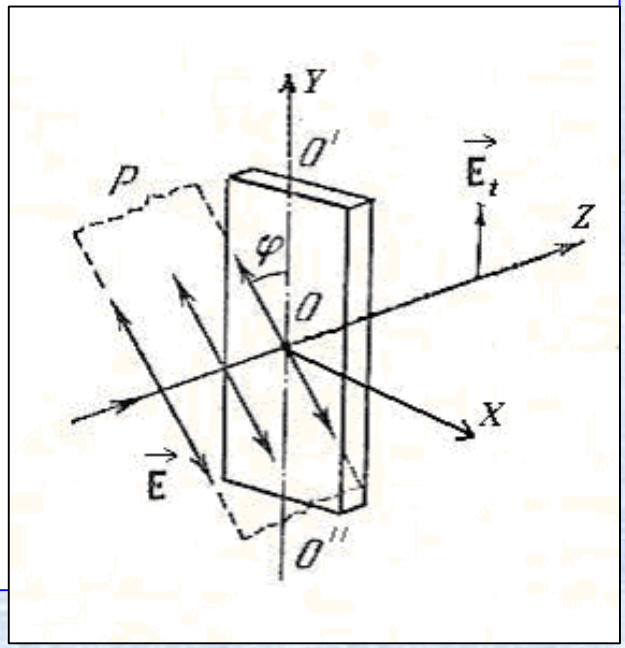
Так как интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды колебаний, то получаем:

$$E^2 = E_0^2 \cos^2\varphi$$

$$I = I_0 \cos^2\varphi$$



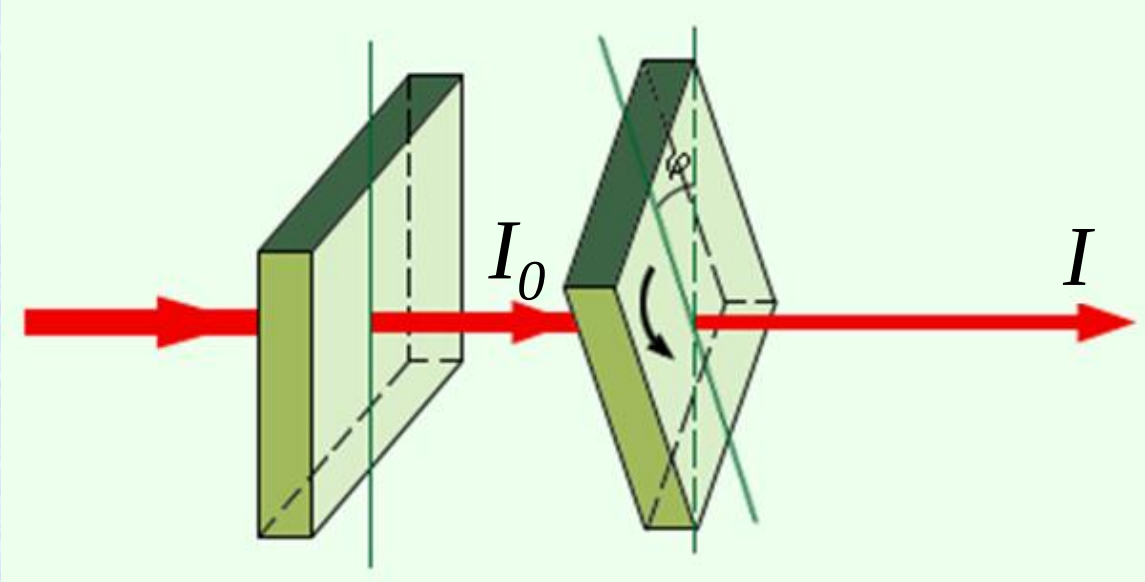
где I_0 — интенсивность плоскополяризованного света, падающего на анализатор,
I — интенсивность света, вышедшего из анализатора.



Закон Малюса

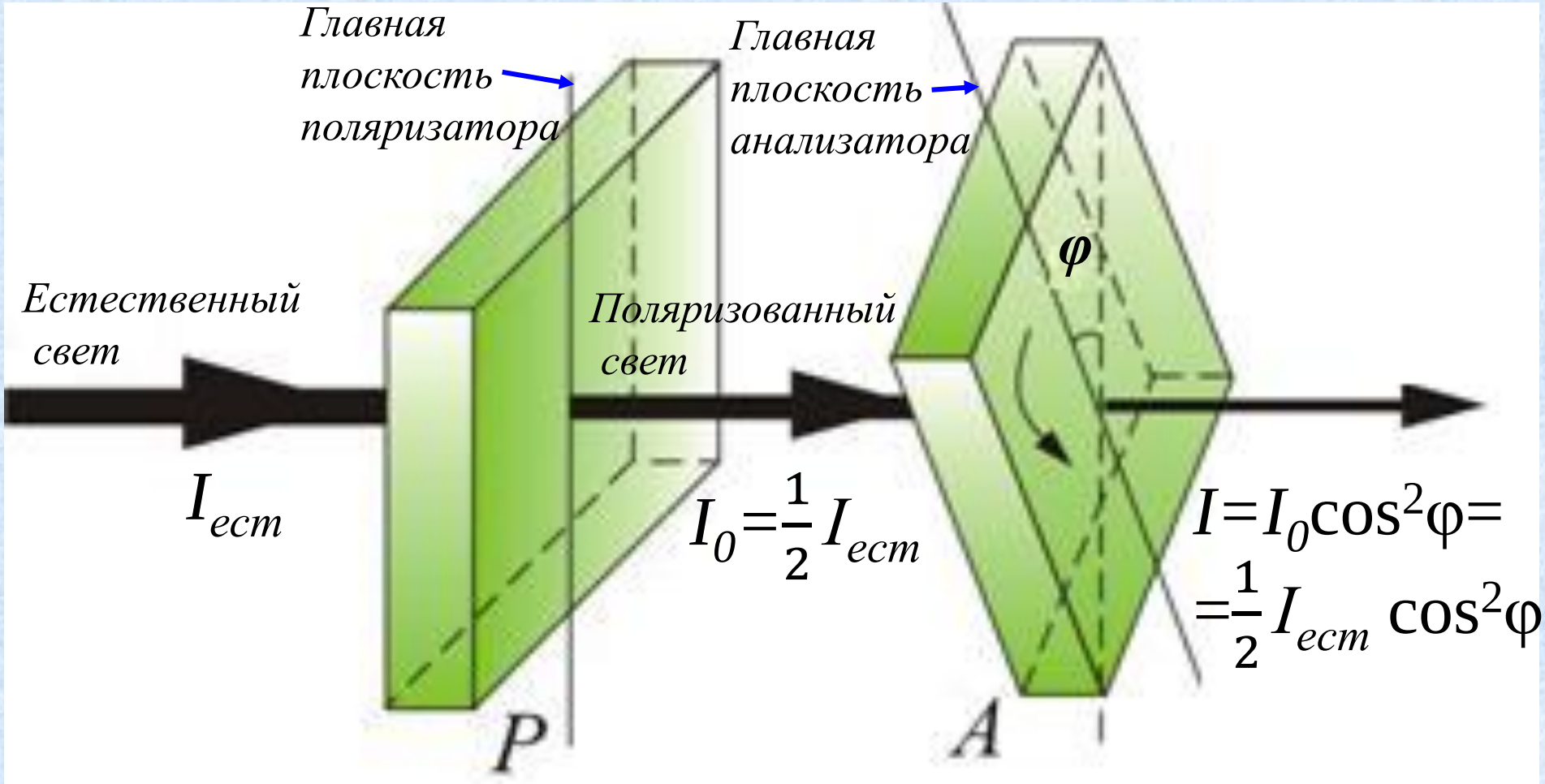
Закон Малюса: интенсивность **плоскополяризованного** света, прошедшего через анализатор пропорциональна квадрату косинуса угла между плоскостью поляризации и главной плоскостью анализатора (между главными плоскостями поляризатора и анализатора).

$$I = I_0 \cos^2 \varphi$$



где I_0 — интенсивность плоскополяризованного света, падающего на анализатор,
I — интенсивность света, вышедшего из анализатора

Прохождение естественного света через поляризатор и анализатор



$I_{ест}$ – интенсивность естественного света,

I_0 — интенсивность плоскополяризованного света, падающего на анализатор,

I — интенсивность света, вышедшего из анализатора

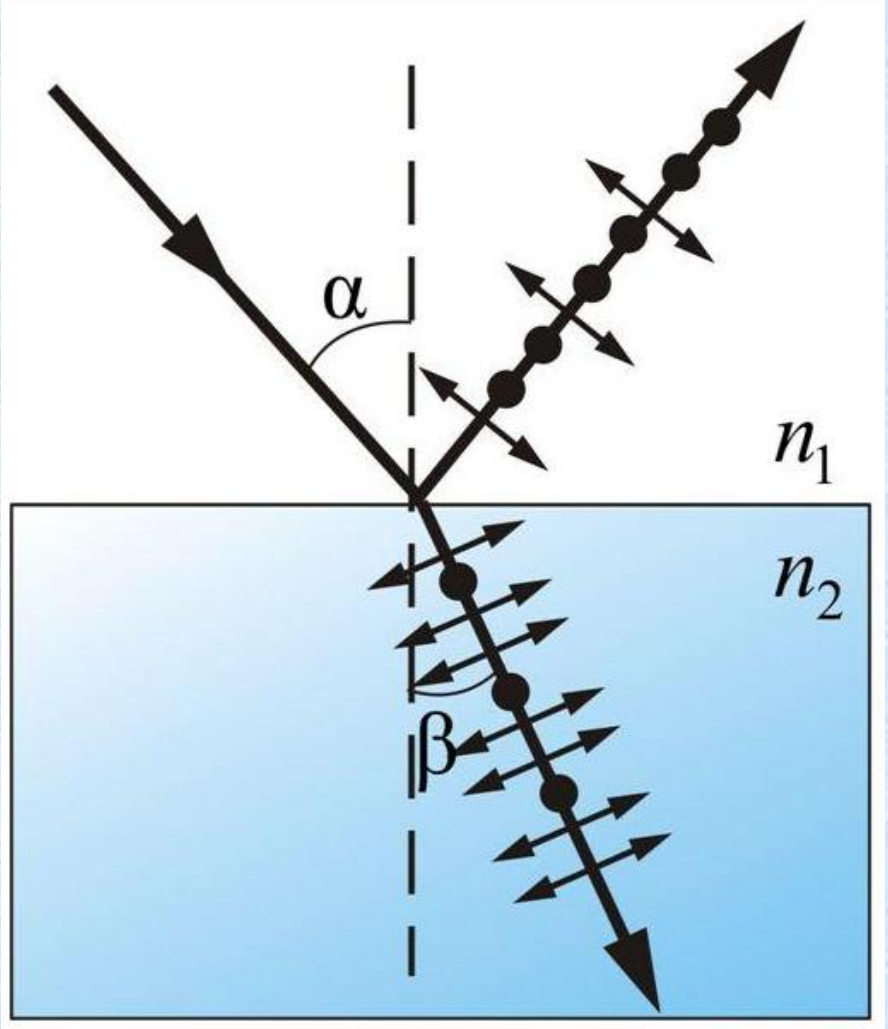
Поляризация света при отражении и преломлении на границе диэлектриков

При отражении от границы двух диэлектриков естественный свет частично поляризуется.

В отраженном луче преобладают колебания, перпендикулярные плоскости падения,

а в преломленном — параллельные ей.

Степень поляризации зависит от угла падения.



Закон Брюстера

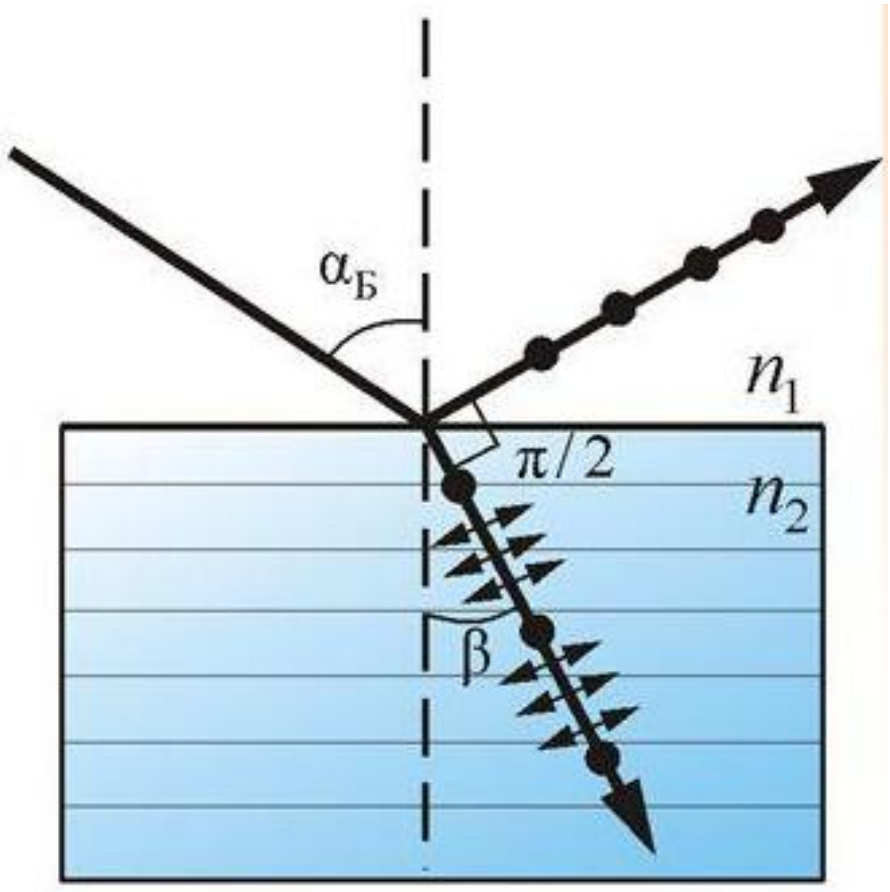
Если угол падения удовлетворяет условию:

$$tg\alpha_{Б} = n_{21}$$

то **отраженный монохроматический луч полностью поляризован**.

$\alpha_{Б}$ - угол Брюстера,
или угол полной поляризации,

$n_{21} = n_2/n_1$ —
относительный показатель
преломления второй среды
относительно первой.

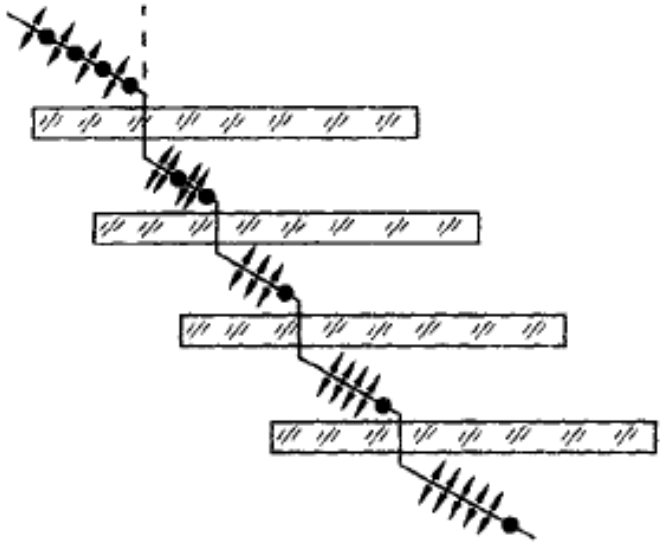


Поляризация света при отражении и преломлении на границе диэлектриков

Преломленный луч всегда частично поляризован, причем при падении под углом Брюстера степень его поляризации наибольшая. При полной поляризации отраженного света угол между преломленным и отраженным лучами равен 90°.

Таким образом, граница раздела двух диэлектриков или диэлектрика и вакуума служит поляризатором.

В качестве поляризатора используют также стопу стеклянных пластин. Независимо от угла падения степень поляризации преломленного луча возрастает по мере прохождения пластин

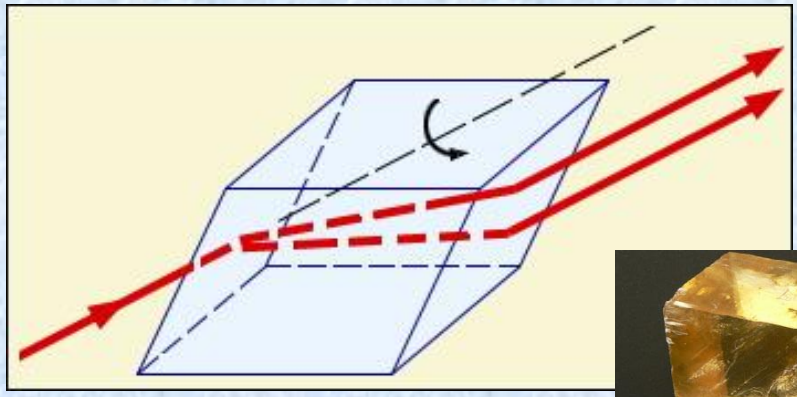


Поляризация света при двойном лучепреломлении

При преломлении светового луча на границе раздела с некоторыми анизотропными средами наблюдается явление **двойного лучепреломления** - преломленный луч раздваивается. **При этом оба луча оказываются полностью поляризованы.**

Двойное лучепреломление - раздвоение светового луча при прохождении через некоторые анизотропные среды, обусловленное зависимостью показателя преломления света от его поляризации и направления распространения.

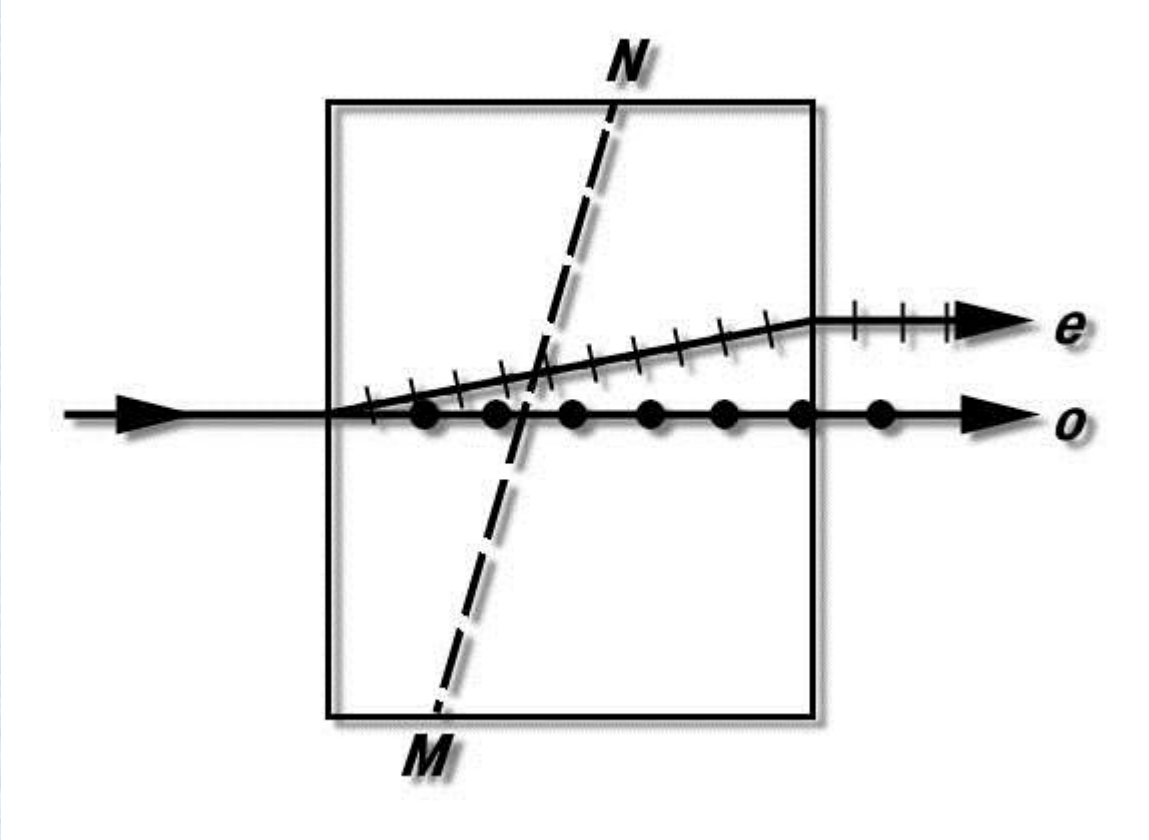
Оптической анизотропией обладают многие кристаллы из-за асимметрии их кристаллических решеток (например, исландский шпат).



Поляризация света при двойном лучепреломлении

Луч, который подчиняется законам преломления, называется обыкновенным «о».

Луч, который не подчиняется законам преломления, называют необыкновенным «е».

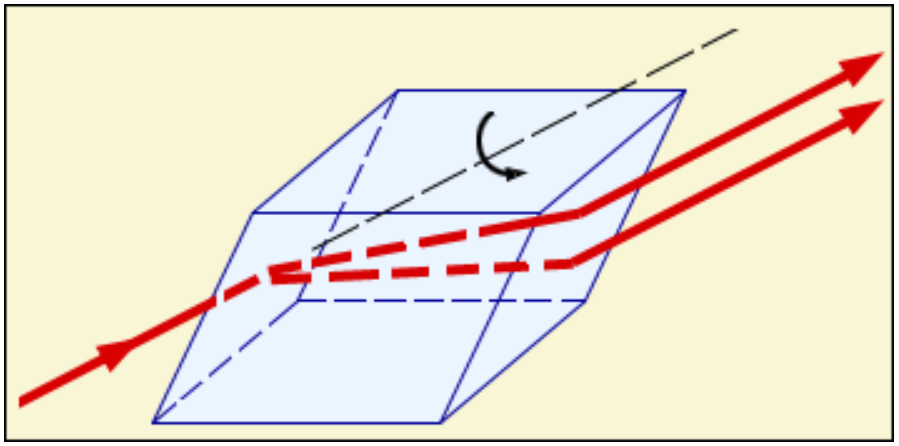


Поляризация света при двойном лучепреломлении

Направления, вдоль которых двойного лучепреломления нет и оба луча, обыкновенный и необыкновенный, распространяются с одной скоростью, **называют оптическими осями кристалла** (черная штриховая линия).

Если оптическая ось одна, то кристалл называют **одноосным.**

Примеры одноосных кристаллов: исландский шпат (разновидность углекислого кальция $CaCO_3$ — кристалл гексагональной системы), кварц, турмалин (сложный алюмосиликат, кристаллы тригональной системы) и др.

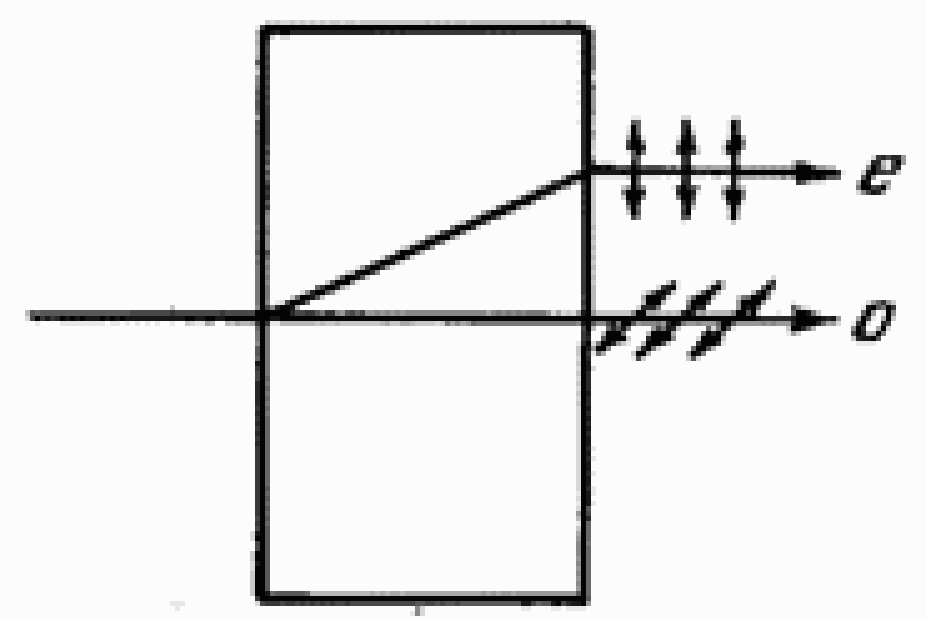


Поляризация света при двойном лучепреломлении

Плоскость, проходящая через оптическую ось и падающий луч, называется **главной плоскостью кристалла**.

Колебания обыкновенного луча перпендикулярны главной плоскости, а необыкновенного — лежат в главной плоскости кристалла, т. е. эти **лучи поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях**.

Двойное лучепреломление обусловлено особенностями распространения электромагнитных волн в анизотропных средах: амплитуды вынужденных колебаний электронов зависят от направлений этих колебаний.



Дихроизм, поляроиды

В некоторых кристаллах с двойным лучепреломлением **обыкновенный луч «о» поглощается значительно сильнее, чем необыкновенный «е»**. Такое явление называется **дихроизмом**.

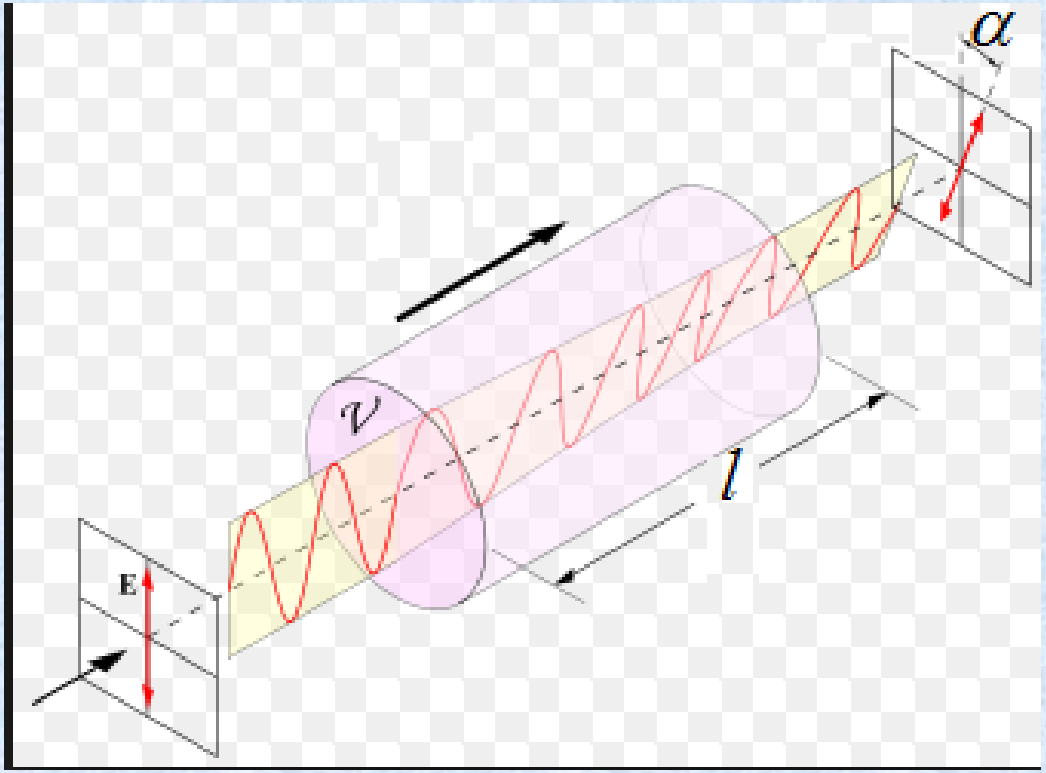
Поляризаторы, использующие дихроизм, называются ***поляроидами*** (турмалин, герапатит).

- Основным **недостатком поляроидов** являются их **плохие спектральные характеристики**. Белый свет после прохождения этих поляризационных устройств становится окрашенным.
- **Достоинство поляроидов** — **большая поверхность**, что позволяет использовать широкие световые пучки.

Вращение плоскости поляризации

Поворот плоскости поляризации плоскополяризованного света при прохождении через вещество называется **вращением плоскости поляризации.**

Вещества, в которых наблюдается вращение плоскости поляризации света, называют **оптически активными** (кварц, сахар).



Вращение плоскости поляризации

Для определенной длины волны **угол α поворота** плоскости поляризации **пропорционален расстоянию *l***, пройденному светом в оптически активном веществе:

$$\alpha = \alpha_0 l$$

где α_0 — коэффициент пропорциональности, или постоянная вращения (вращательная способность), град/мм.

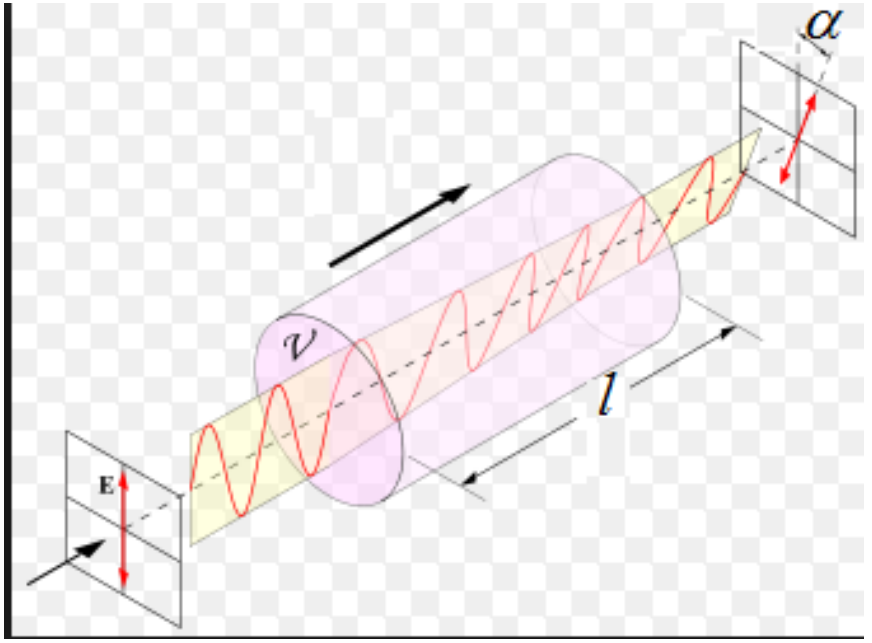
Для растворов:

$$\alpha = [\alpha_0] C l,$$

где ***C*** — концентрация оптически активного вещества,

l — толщина слоя раствора,

$[\alpha_0]$ — удельное вращение, которое приблизительно обратно пропорционально квадрату длины волны и зависит от температуры и свойств растворителя.



Поляриметрия

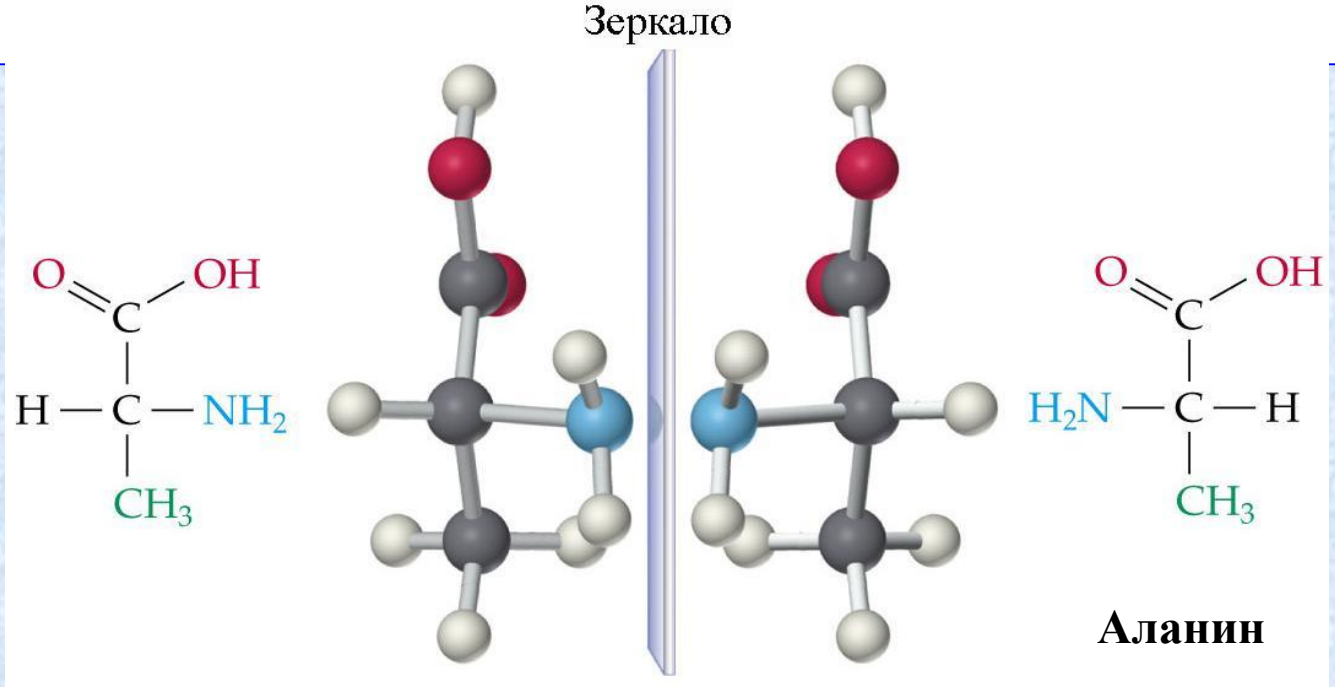
С помощью формулы $\alpha = [\alpha_0]Cl$ можно измерять концентрацию веществ (в частности, сахара) - **поляриметрия**.

Этот метод (поляриметрия, или сахариметрия) используют в медицине **для определения концентрации сахара в моче, в биофизических исследованиях, а также в пищевой промышленности**. Соответствующие измерительные приборы называют **поляриметрами** или **сахариметрами**.

Хиральность

Вращение плоскости поляризации растворами обусловлено взаимодействием электромагнитной волны с асимметричными молекулами растворенного оптически активного вещества.

Такие молекулы не обладают зеркальной симметрией, т. е. при их «отражении» в зеркале получается иная форма (хиральные молекулы). Характерно, что все важнейшие биологические молекулы (белки, нуклеиновые кислоты, полисахариды и т. п.) асимметричны.



Аланин

Использование поляриметрии для исследования структурных превращений

Поляриметрию применяют не только для определения концентрации растворов, но и как метод исследования структурных превращений, в частности в молекулярной биофизике.

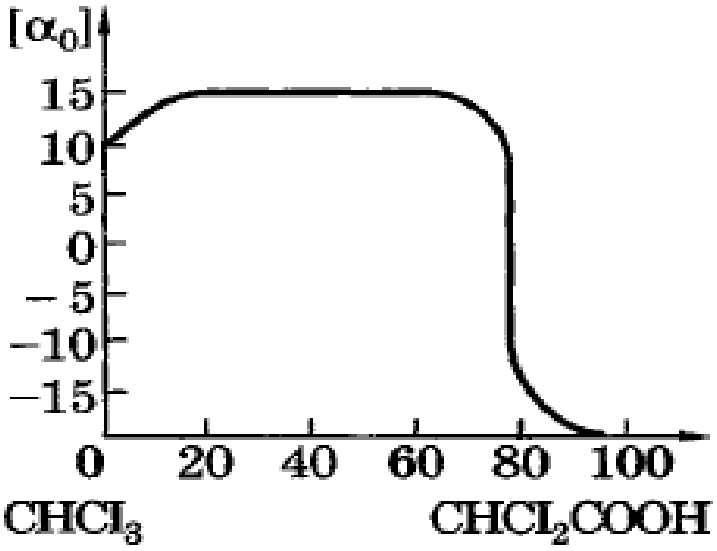


График изменения удельного вращения [α_0] в одном из полипептидов в зависимости от состава растворителя

При 80% дихлоруксусной кислоты происходит резкое падение оптической активности, что свидетельствует об изменении структуры молекул полипептида.

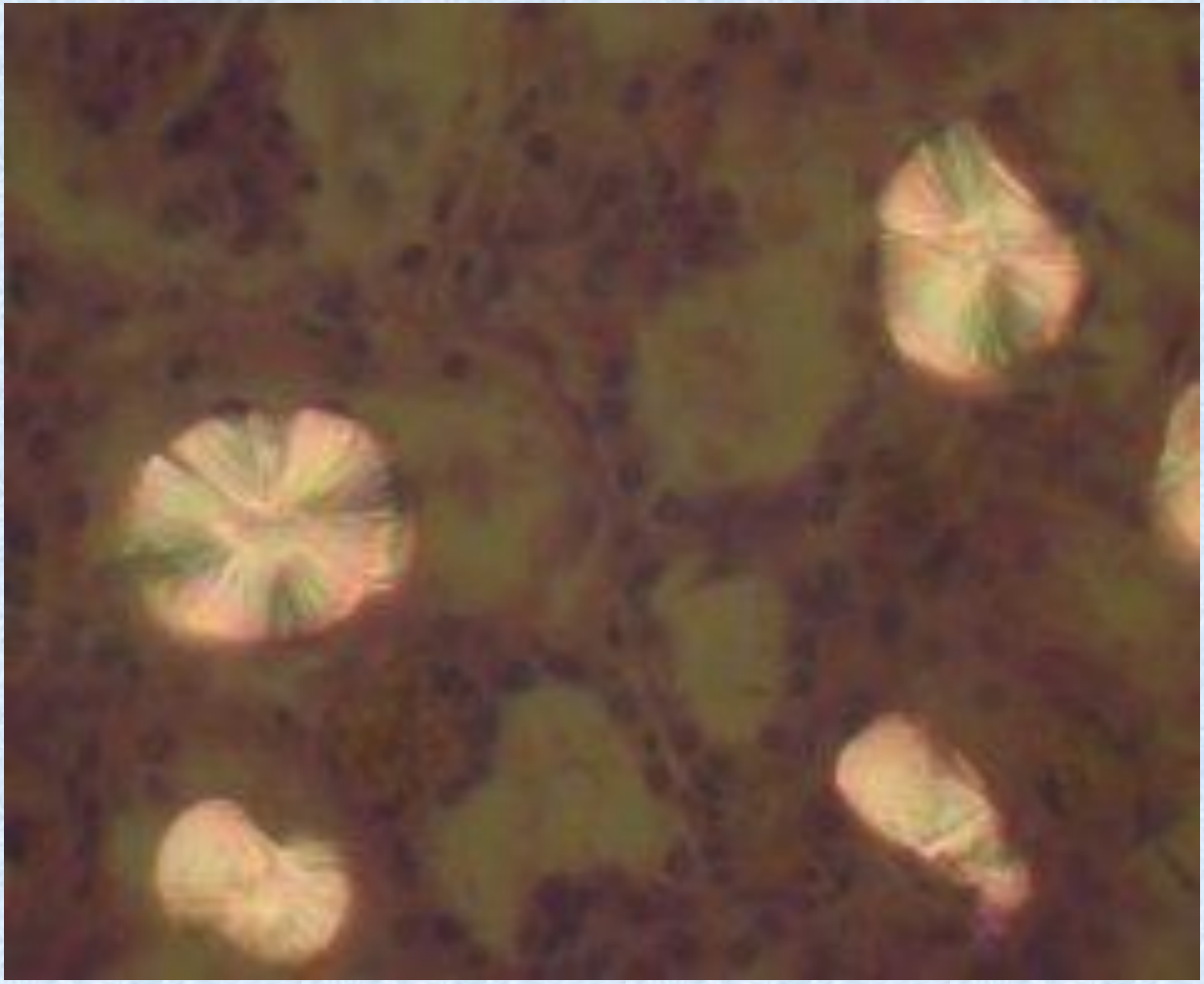
Исследование биологических тканей в поляризованном свете

Поляризационный микроскоп аналогичен обычному биологическому микроскопу, но имеет поляризатор перед конденсором и анализатор в тубусе между объективом и окуляром.

Если главные оси поляризатора и анализатора скрещены, то в микроскоп видны только те фрагменты биологического объекта, которые вращают плоскость поляризации. При этом яркость наблюдаемых фрагментов тем выше, чем больше угол поворота.

Так как некоторые ткани (мышечная, костная, нервная) обладают оптической анизотропией, то возможна поляризационная микроскопия биологических объектов. При скрещенных поляризаторе и анализаторе будут видны только те волокна, анизотропия которых изменяет поляризованный свет.

Исследование биологических тканей в поляризованном свете



Отравление этиленгликолем. Кристаллы оксалатов. Поляризационная микроскопия.

Фотоупругость

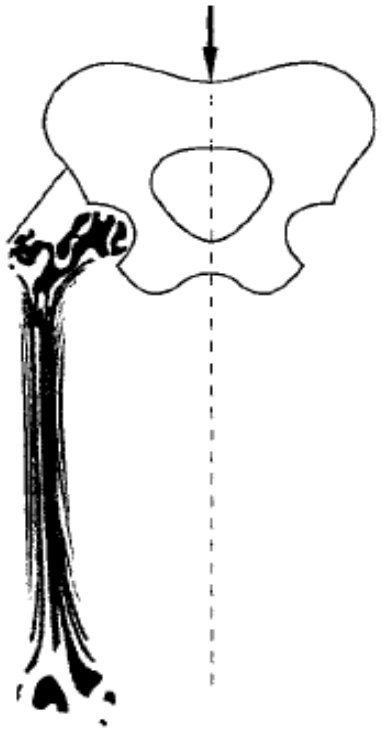
Поляризованный свет можно использовать в модельных условиях для оценки механических напряжений, возникающих в костных тканях.

Этот метод основан на явлении **фотоупругости**, которое заключается в возникновении оптической анизотропии в первоначально изотропных твердых телах под действием механических нагрузок.

В скрещенных поляроидах кость без нагрузки незаметна.

Приложенная нагрузка вызывает анизотропию костной ткани, что становится заметным по характерной картине полос и пятен.

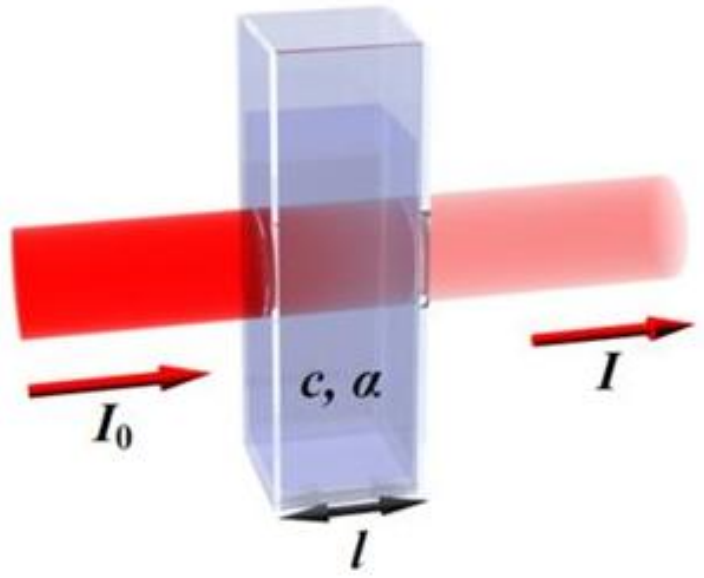
По этой картине, а также по ее изменению при увеличении или уменьшении нагрузки можно делать выводы о механических напряжениях, возникающих в костной ткани.



Взаимодействие света с веществом

При прохождении света через вещество часть энергии расходуется на возбуждение атомов или молекул. Некоторая доля этой энергии возвращается излучению в виде вторичных волн. Однако другая доля переходит во внутреннюю энергию вещества. В результате световая энергия уменьшается. **Этот процесс называют поглощением света.**

Поглощение света - уменьшение его интенсивности при прохождении через вещество вследствие превращения световой энергии в другие виды энергии.



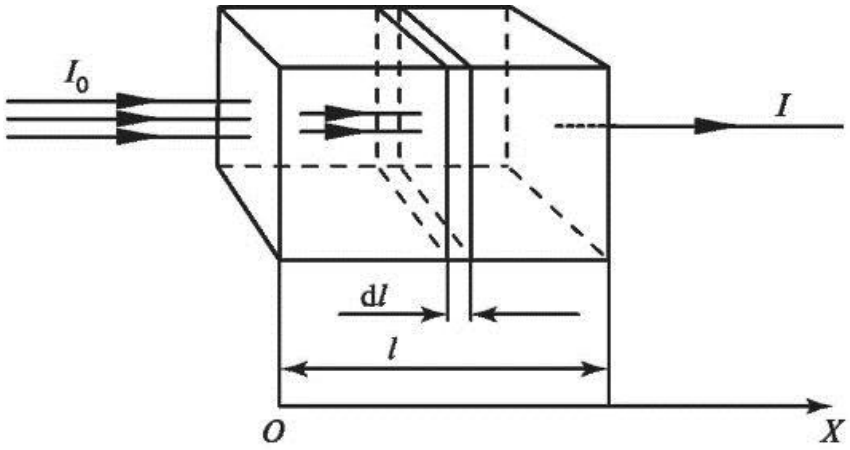
Поглощение света. Закон Бугера

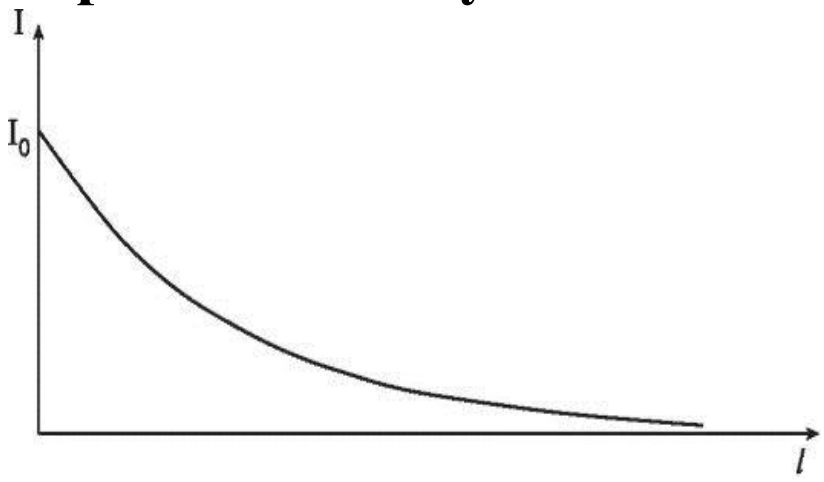
Закон Бугера:

$$I = I_0 \cdot \exp(-k_\lambda \cdot l),$$

где k_λ – коэффициент поглощения; I_0 - интенсивность падающего света; I - интенсивность света после прохождения слоя вещества толщины l.

Интенсивность света при поглощении в веществе убывает экспоненциально в зависимости от пройденного пути.





Поглощение света растворами. Закон Бугера-Ламберта-Бера

Поглощение света растворами происходит за счет его взаимодействия как с молекулами растворителя, так и с молекулами растворенного вещества. В том случае, **когда вещество растворено в практически не поглощающем растворителе, коэффициент поглощения оказывается пропорциональным концентрации раствора *C*:**

Закон Бера:

$$k_\lambda = \chi_\lambda \cdot C,$$

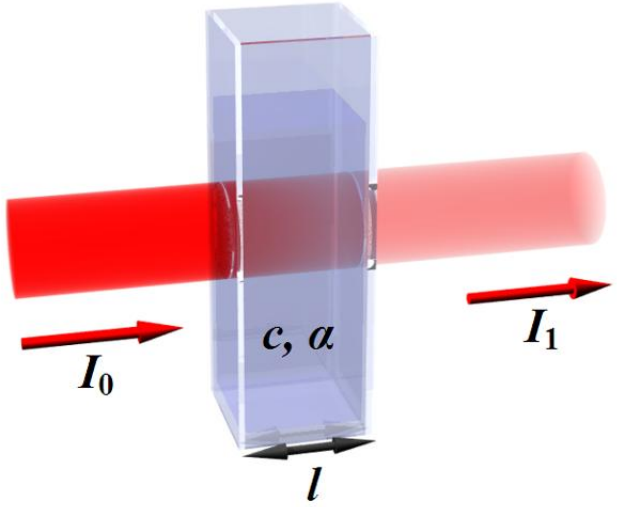
где χ_λ – *натуральный молярный показатель* поглощения, зависящий от вида растворенного вещества, длины волны света и *не зависящий* от концентрации раствора C.

Закон Бера не выполняется при высокой концентрации растворенного вещества!

Поглощение света растворами. Закон Бугера-Ламберта-Бера

Закон Бугера-Ламберта-Бера:

$$I = I_0 \cdot e^{-\chi_\lambda \cdot c \cdot l}$$



где ***I*** – интенсивность выходящего света;

I_0 – интенсивность падающего света;

χ_λ – натуральный молярный показатель поглощения;

C – концентрация раствора;

l – толщина вещества.

Закон Бугера-Ламберта-Бера перестает выполняться, когда интенсивность падающего света очень высока (лазерное излучение).

Концентрационная колориметрия. Оптическая плотность

Логарифмическая форма закона Бугера-Ламберта-Бера:

$$\lg(I / I_0) = \varepsilon C l$$

где ε – молярный показатель поглощения (зависит от длины волны).

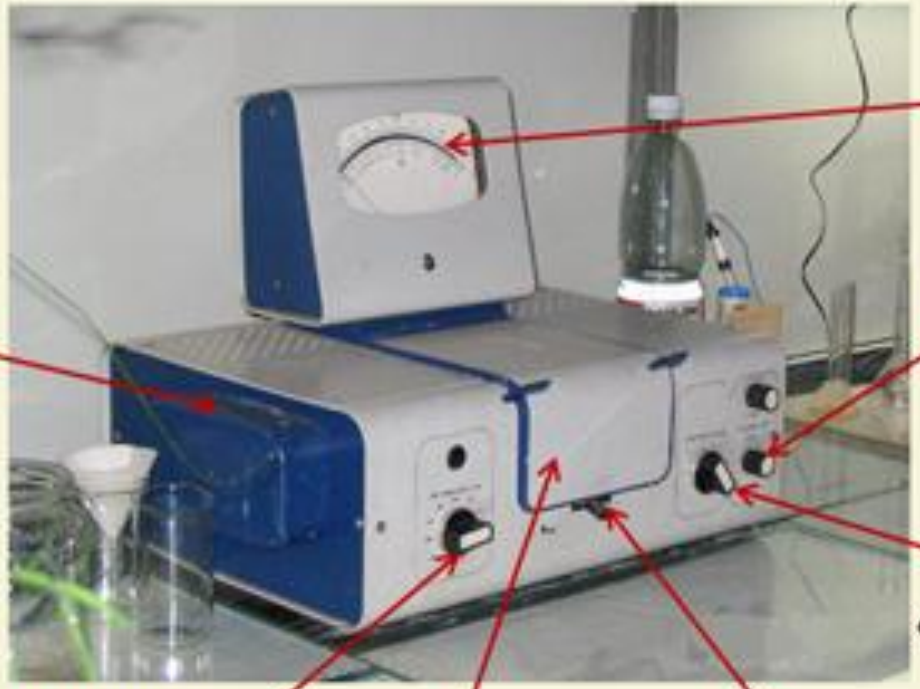
Концентрационная колориметрия.

Для определения концентрации известного растворенного вещества на кювету с раствором направляют луч света и измеряют его интенсивности на входе в кювету (I_0) и на выходе из нее (I). По формуле находят концентрацию раствора:

$$C = \lg(I_0/I)/(\varepsilon l).$$

Значение молярного показателя поглощения ε находят по справочным таблицам.

Внешний вид фотоэлектроколориметра



микроамперметр

осветитель

рукоятка настройки прибора на 100% пропускание

Рукоятка регулировки «чувствительности»

рукоятка ввода цветных светофильтров

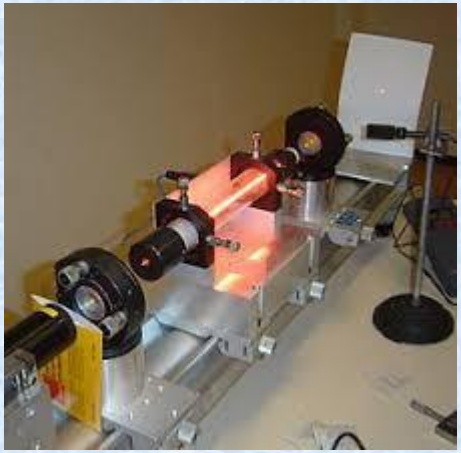
кюветное отделение

рукоятка перемещения кювет

Лазеры

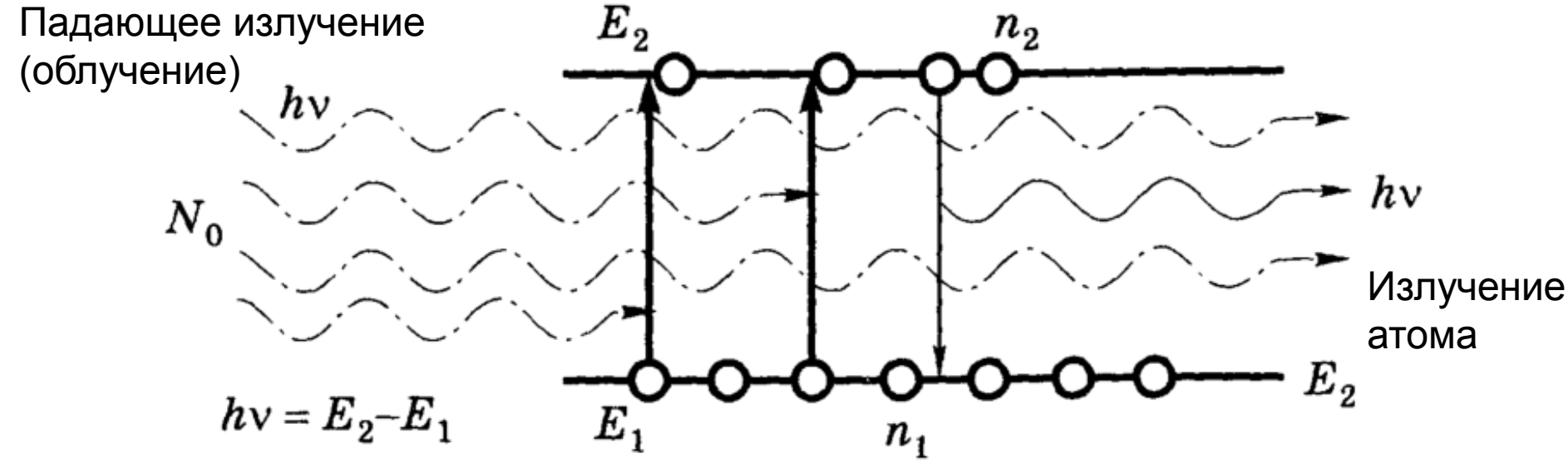
Лазер – это **устройство**, **преобразующее энергию накачки** (световую, электрическую, тепловую, химическую и др.) **в энергию** когерентного, монохроматического, поляризованного и узконаправленного потока **излучения**.

Физической основой работы лазера служит квантовомеханическое явление вынужденного (индуцированного) излучения.



Лазеры. Резонансное облучение

При резонансном облучении системы (атома) излучением с энергией $\boldsymbol{\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu}$, где $\boldsymbol{h}$ – постоянная Планка, $\boldsymbol{\nu}$ – частота излучения, система будет переходить в возбужденное состояние, населенность верхнего уровня $\boldsymbol{n_2}$ будет возрастать, а населенность нижнего $\boldsymbol{n_1}$ – уменьшаться.



$\boldsymbol{E_1}$ – энергия основного состояния атома;
$\boldsymbol{E_2}$ – энергия возбужденного состояния (этот уровень в обычном состоянии не заселен);
$\boldsymbol{n_1}$ – населенность нижнего уровня энергии (число атомов с энергией $\boldsymbol{E_1}$)
$\boldsymbol{n_2}$ – населенность верхнего уровня энергии (число атомов с энергией $\boldsymbol{E_2}$)

Поглощение фотонов

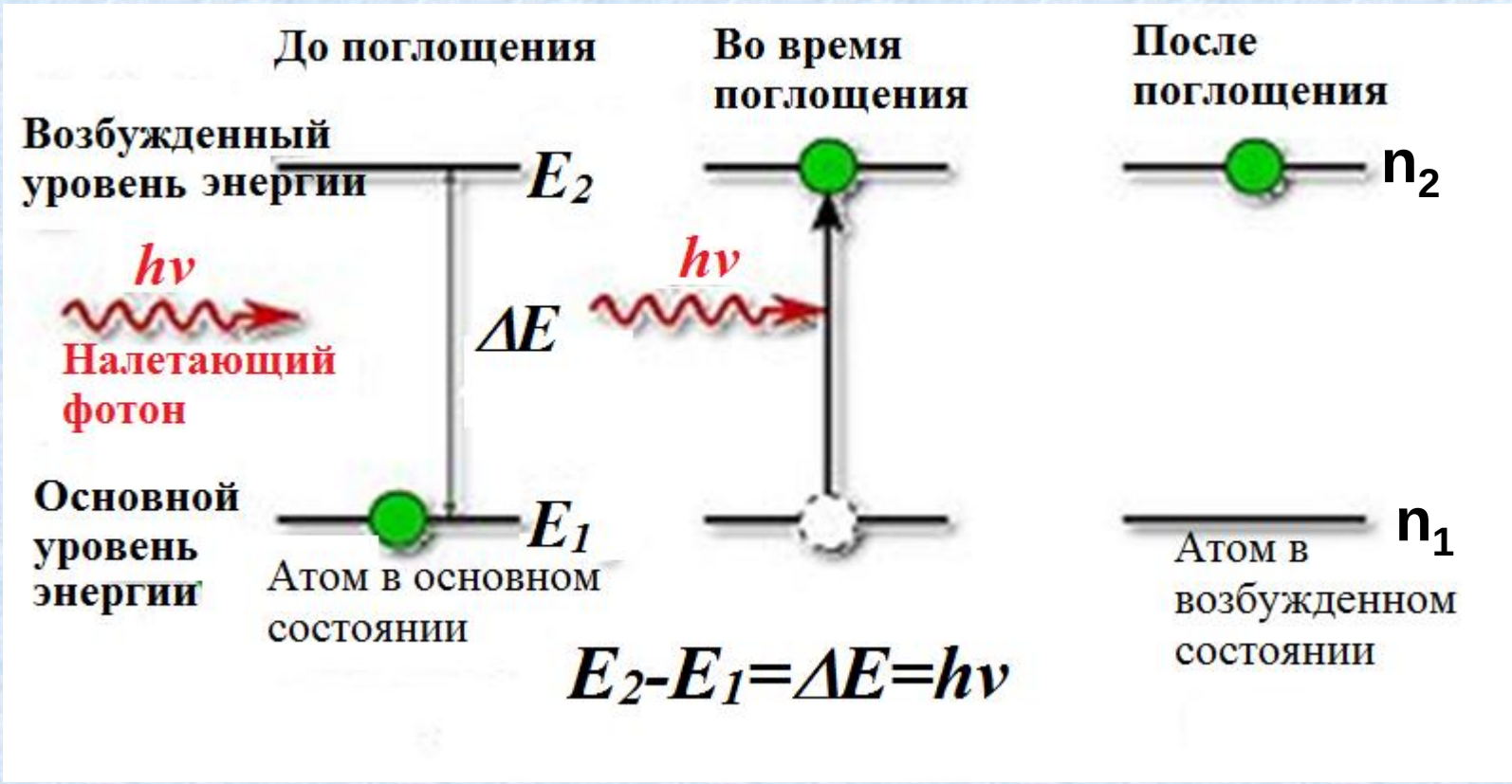
Количество фотонов $N_{погл}$, поглощенных системой за единицу времени

$$N_{\text{погл}} = BN_0n_1$$

где B – коэффициент Эйнштейна;

N_0 – число фотонов, падающих на систему в единицу времени;

n_1 – населенность основного (нижнего) состояния.

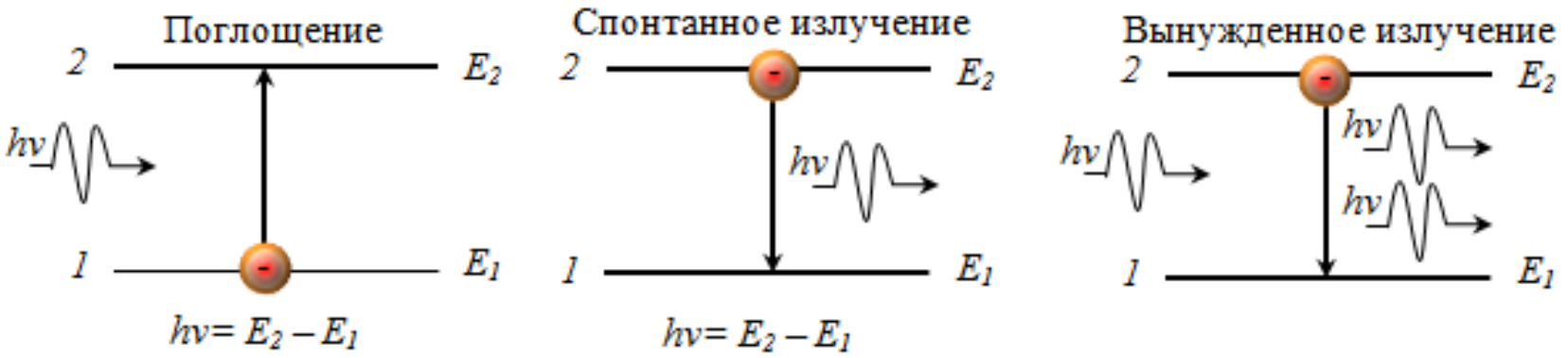


Возврат системы в основное состояние

Система в возбужденном состоянии E_2 неравновесна и стремится вернуться в состояние E_1 путем отдачи энергии $\Delta E = E_2 - E_1$.

Существует три возможности:

1) **Безызлучательный переход –** энергия передается окружающим атомам и молекулам в виде кинетической энергии;
2) **Спонтанное излучение (люминесценция)** – излучается фотон с резонансной частотой $\nu = \frac{\Delta E}{h}$ в произвольном направлении, с произвольной фазой и поляризацией;
3) **Вынужденное излучение** - излучается фотон с резонансной частотой $\nu = \frac{\Delta E}{h}$ и **теми же характеристиками** (направление, поляризация, фаза), как и поглощенное излучение.



Вынужденное излучение

Вынужденное излучение имеет характеристики, идентичные стимулирующему излучению, т.е. они когерентны

Вероятность вынужденного излучения:

$$N_{\text{вын}} = BN_0n_2$$

где B – коэффициент Эйнштейна;

N_0 – число фотонов, падающих на систему в единицу времени;

n_2 – населенность верхнего (возбужденного) уровня энергии.

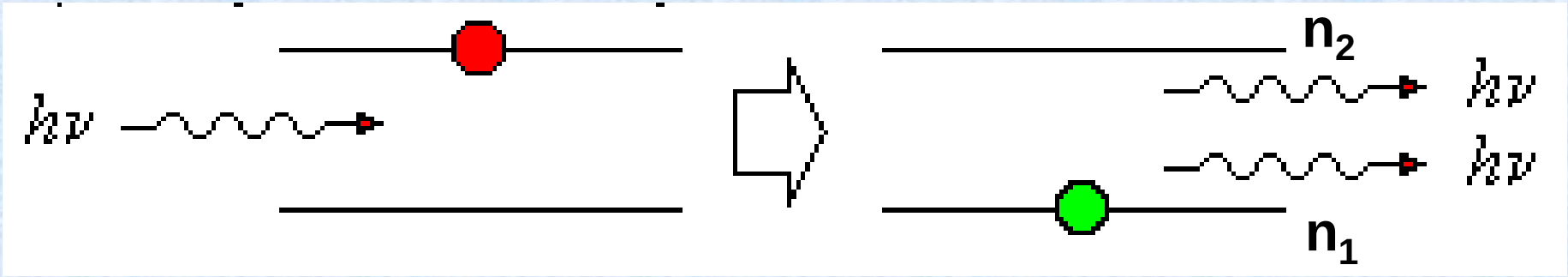


Схема вынужденного излучения

Лазеры. Условие усиления света

Если на квантовую систему (атомы) в единицу времени падает N_0 резонансных фотонов ($\Delta E = h\nu$), то часть их поглощается ($N_{\text{погл}} = BN_0n_1$), а часть – вынужденно испускается ($N_{\text{вын}} = BN_0n_2$).

Количество фотонов, направленно прошедших сквозь среду:

$$N_{\text{прош}} = N_0 - N_{\text{погл}} - N_{\text{вын}} = N_0 + BN_0(n_2 - n_1)$$

Если $n_2 > n_1$, то $N_{\text{прош}} > N_0$, возникает усиление света !

Такая среда называется ***активной***.

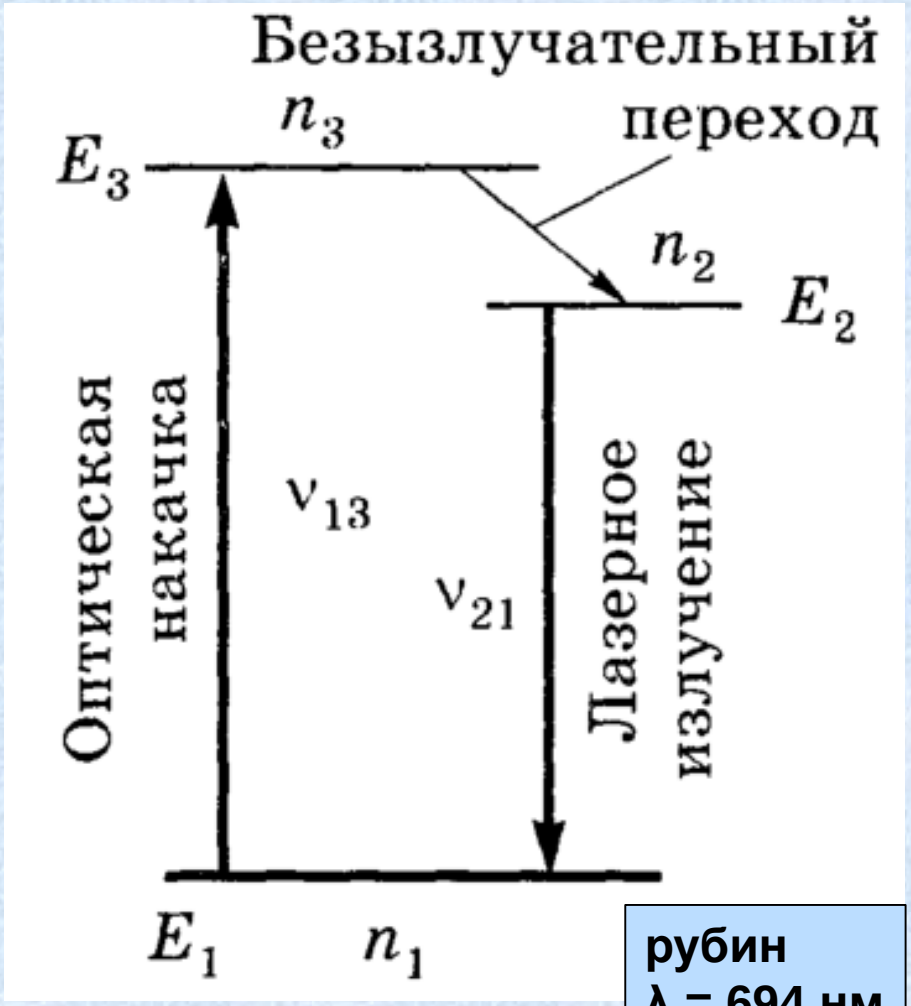
В обычных условиях $n_2 < n_1$, поэтому для усиления **необходимо создать инверсную заселенность ($n_2 > n_1$) (оптическая накачка)**.

Схема вынужденного излучения

Оптическая накачка. Лазерное излучение

В двухуровневой системе создать инверсную заселенность невозможно (при $n_2=n_1$ наступит динамическое равновесие), поэтому используют трех- и четырехуровневые системы.

Пример – рубиновый лазер
(Al_2O_3 с примесью Cr^{3+}):
Ионы хрома хорошо поглощают оптическое излучение с частотой ν_{13}, переходя с основного 1-го уровня на свободный 3-ий (нестабильный), с которого очень быстро безызлучательно переходят на метастабильный 2-ой уровень E_2. Вероятность перехода с него на уровень E_1 мала, поэтому на нем накапливается много частиц и создается инверсная заселенность ($n_2>n_1$) в канале 2-1.



рубин
λ = 694 нм

Устройство лазера

Обязательные компоненты лазера:

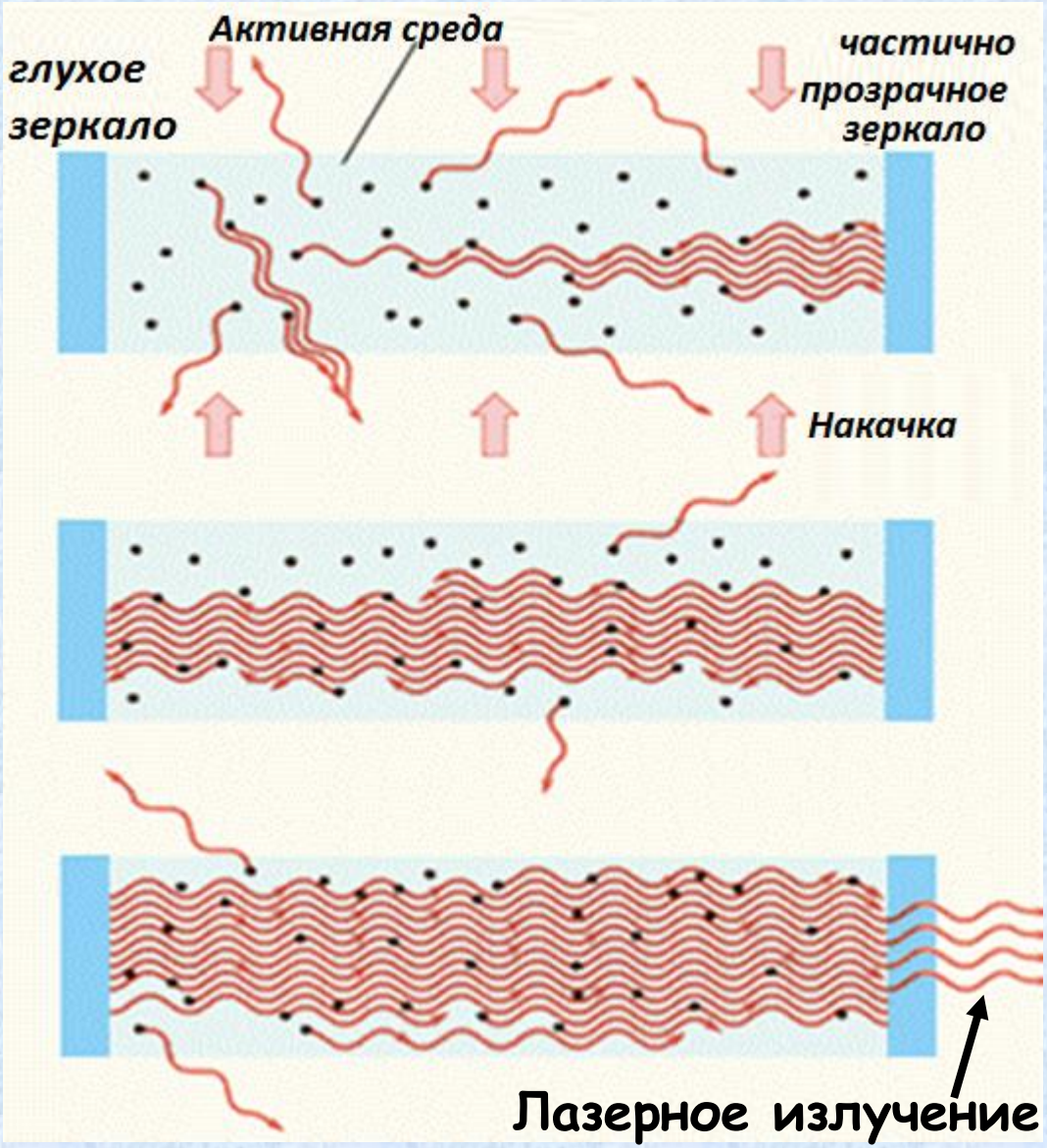
1) **Активная среда** – может быть переведена в усиливающее состояние;
2) **Система накачки** – обеспечивает инверсную заселенность;
3) **Резонатор** – система зеркал для генерации излучения.

Принцип работы лазера

1) **Система накачки** переводит активную среду в усиливающее состояние;

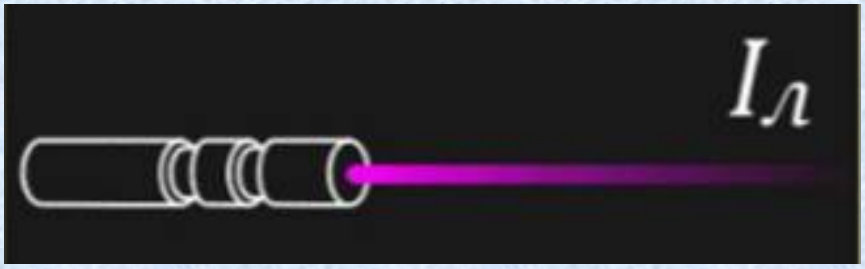
2) Излучение многократно отражается от зеркал **резонатора** и за счет этого значительно усиливается;

3) Часть излучения выходит через полупрозрачное зеркало в виде **лазерного излучения.**



Свойства лазерного излучения

1) **Высокая направленность (малая расходимость пучка) –** так как максимально усиливается только излучение, распространяющееся перпендикулярно зеркалам;
2) **Высокая монохроматичность** – определяется длиной волны лазерного перехода (разностью энергий уровней);
3) **Высокая когерентность** – следствие когерентных свойств вынужденного излучения;
4) **Высокая мощность** – за счет многократного усиления. По этому параметру лазерное излучение превосходит все другие виды излучений.



Применение лазеров в медицине

Глубина проникновения лазерного излучения в биоткани зависит от длины волны λ:

- Наибольшая проникающая способность у красного и инфракрасного диапазонов (**λ = 630-2700 нм**);
- Излучение зеленого (**λ = 530-550 нм**) и фиолетового (**λ = 350-405 нм**) диапазонов хорошо поглощается кровью;
- Ультрафиолетовое (**λ = 200-340 нм**) излучение хорошо поглощается белками.

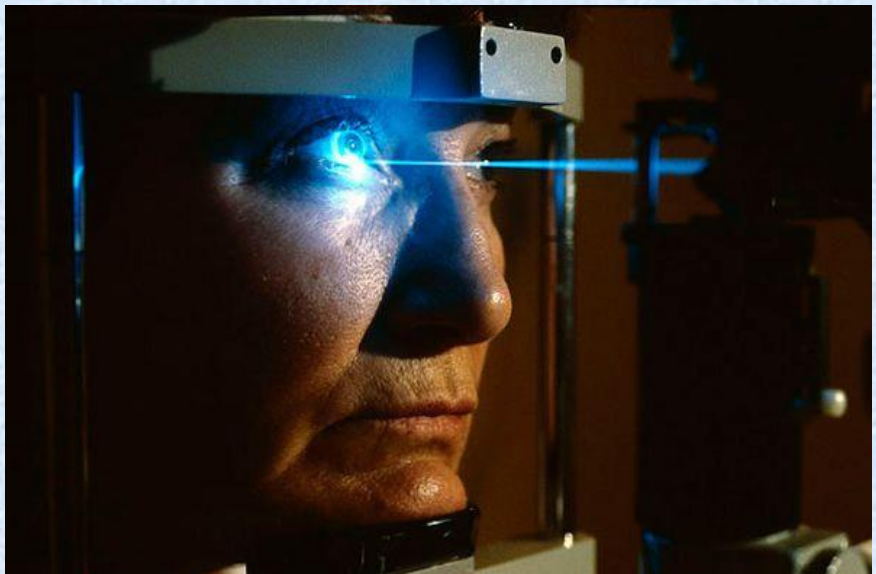
Применение лазеров в медицине - терапия

Низкоинтенсивное (~10 мВт) красное излучение гелий-неонового лазера (λ = 630 нм) обладает биостимулирующими свойствами и широко используется **для лечения многих патологий: дерматозов, трофических язв, гнойных ран, ожогов и т.п.**

Применение лазеров в медицине - офтальмология

Импульсное излучение рубинового лазера (λ = 694 нм) 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.

Лазеры ультрафиолетового диапазона, излучение которых хорошо поглощается роговицей, применяются в операциях по коррекции кривизны роговицы путем испарения части ее вещества сфокусированным лазерным излучением.



Применение лазеров в медицине - хирургия

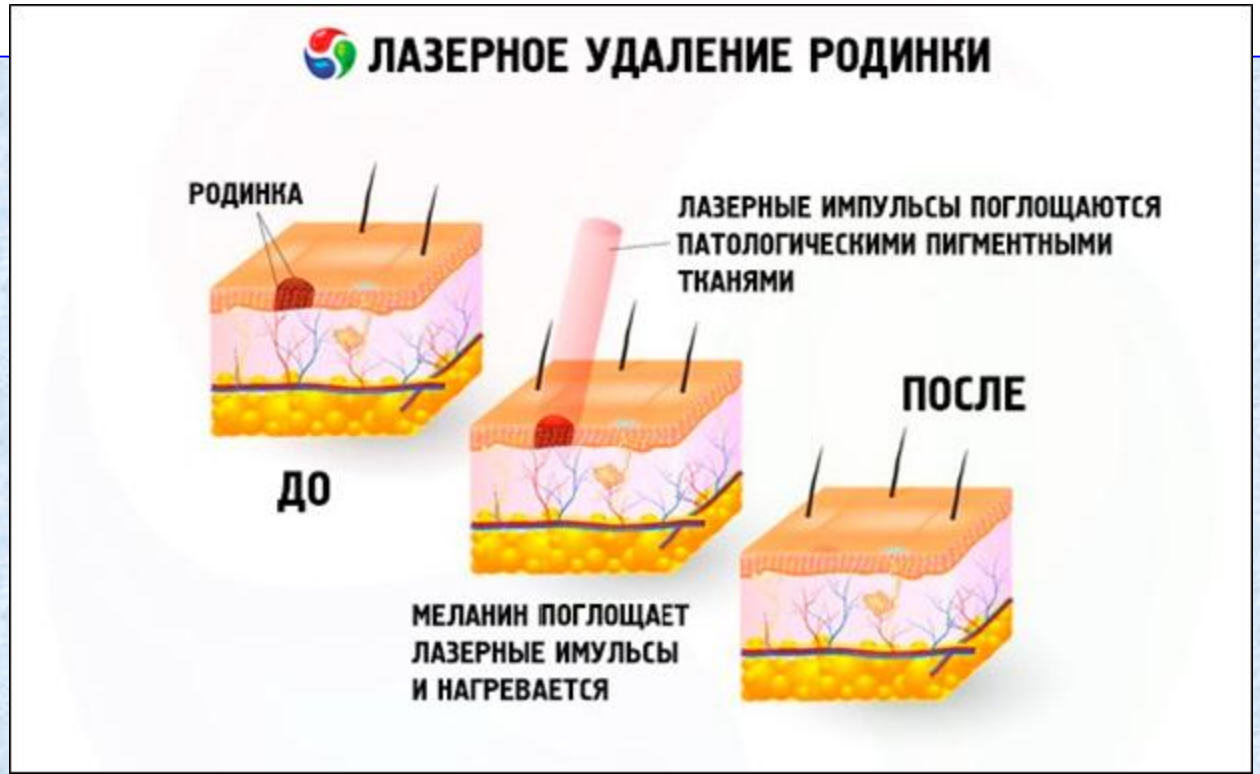
Инфракрасное непрерывное излучение газовых CO_2 лазеров средней мощности (10-30 Вт) используется **в хирургии мягких тканей для рассечения их на нужную глубину, а также для их коагуляции** с возможностью обеспечения биологической сварки тканей, в том числе сварки стенок сосудов и т.п.

Применение лазеров в медицине - онкология

Лазерное излучение средней мощности непосредственно используется **для удаления** (термического разрушения) **опухолей**, особенно поверхностной локализации.

В последние годы в онкологии также используют лазерное излучение небольшой интенсивности в сочетании с фотосенсибилизаторами для лечения опухолей методами фотодинамической терапии.

Применение лазеров в медицине

Лазерное излучение также используют **для внутриполостных воздействий на стенки и слизистые полых органов,** сосудов, применяя эндоскопическую технику.

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