

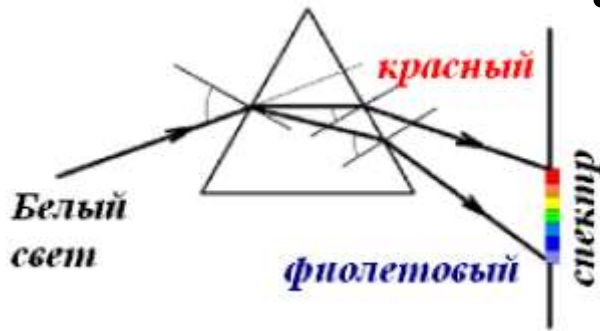
Основы оптоэлектроники (продолжение)

Дисперсия

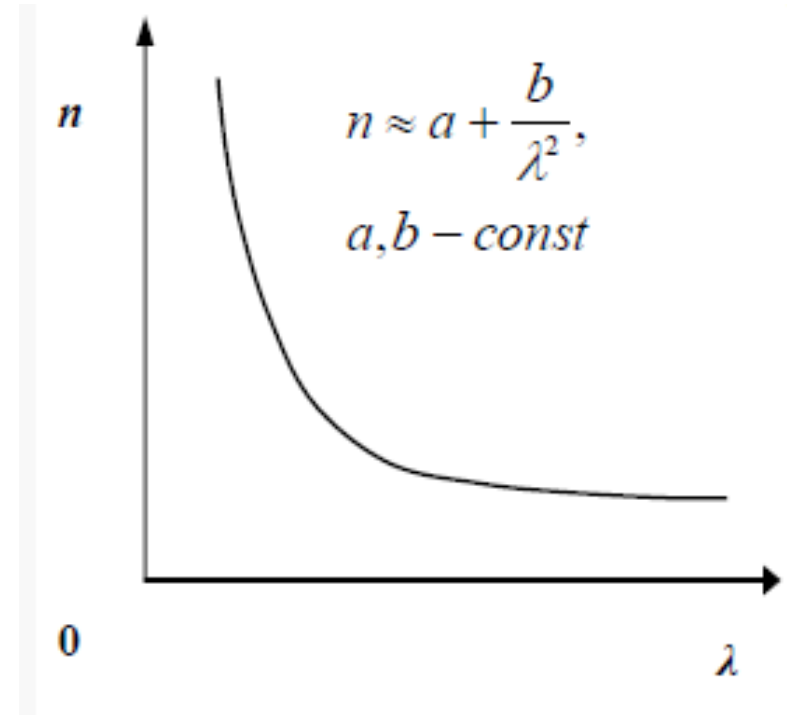
2

Дисперсия света – зависимость фазовой скорости света (показателя преломления n) в среде от его частоты (длины волны λ).

$$n = \frac{c}{v} \quad n = f(\lambda)$$



Следствие дисперсии:
разложение в спектр
пучка белого света при
прохождении через
призму.



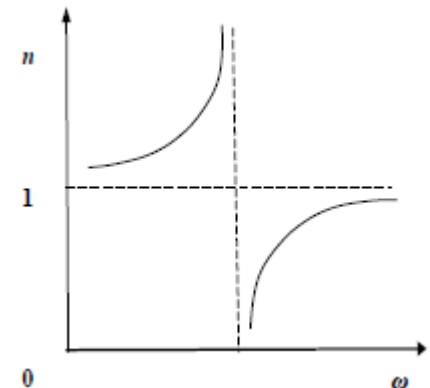
Дисперсия вещества – величина, определяемая соотношениями:

$$D = \frac{dn}{d\lambda} \equiv \frac{dn}{d\nu}$$

Области значений ν , λ , в которых дисперсия D увеличивается по модулю с ростом ν , с уменьшением λ соответствуют **нормальной дисперсии света**.

Если вещество поглощает часть лучей, то в области поглощения и вблизи неё ход дисперсии обнаруживает аномалию, т.е. на некоторых участках более короткие волны преломляются меньше, чем более длинные.

Такой характер дисперсии называется **аномальной дисперсией**.



Гармоническая волна описывается уравнением:

$$S_0 = A_0 \cos(\omega t - kx)$$

волновое число

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{vT} = \frac{\omega}{v}$$

фазовая скорость

Исходя из принципа суперпозиции и разложения в ряд Фурье, любую волну можно представить в виде суперпозиции (суммы) гармонических волн, мало отличающихся друг от друга по частоте, – **волнового пакета (группы волн)**:

$$S = \underbrace{2A_0 \cos\left(\frac{t \cdot d\omega - x \cdot dk}{2}\right)}_{A(x,t)} \cos(\omega t - kx)$$

Скорость распространения волнового пакета – скорость перемещения максимума амплитуды волны, при условии

$$t d\omega - x dk = \text{const} \Rightarrow \frac{dx}{dt} = \frac{d\omega}{dk} = u$$

групповая скорость

$$\frac{d\omega}{dk} = \frac{c dv}{v dn + n dv}$$

$$u = \frac{c}{n + v \frac{dn}{dv}} = \frac{c}{1 + \frac{v}{n} \cdot \frac{dn}{dv}}$$

$$\frac{dn}{dv} > 0 \Rightarrow u = v = \frac{c}{1 + \underbrace{\frac{v}{n} \cdot \frac{dn}{dv}}_{>1}}$$

$$u > v$$

аномальной дисперсии

$u < v$ – нормальная дисперсия

Оптически прозрачные среды немагнитные ($\mu \approx 1$).
Следовательно, показатель преломления

$$n = \sqrt{\epsilon\mu} \approx \sqrt{\epsilon} = \sqrt{1 + \frac{P}{\epsilon_0 E}}$$

Если каждая молекула содержит один *оптический электрон* (внешний электрон), то *вектор поляризованности среды*

$$\vec{P} = n_0 \vec{p}_l = n_0 \cdot e \cdot \vec{r}$$

n_0 —концентрация атомов,

e —заряд электрона,

r —смещение электрона из положения равновесия под действием вектора E световой волны.

$$n^2 = 1 + \frac{n_0 e r}{\varepsilon_0 E}$$

Для определения n необходимо найти смещение электрона r под действием следующих сил:

1. Возвращающая квазиупругая сила

$$\overrightarrow{F}_{\text{возвр}} = -m \cdot \omega_0^2 \cdot \vec{r}$$

ω_0 – циклическая частота свободных незатухающих колебаний;

2. Сила сопротивления

$$\overrightarrow{F}_{\text{сооп}} = -2\beta m \cdot \frac{d\vec{r}}{dt}$$

β – коэффициент затухания свободных колебаний электрона;

3. Вынуждающей силы

$$\overrightarrow{F} = -e \cdot \vec{E} \quad \text{со стороны переменного электрического поля } \vec{E} \text{ волны.}$$

$$n^2 = 1 + \frac{n_0 e^2}{\varepsilon_0 m} \cdot \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2)}$$

Если в веществе различные молекулы (m_i) содержат различные заряды (e_i), совершающие колебания с различными собственными частотами (ω_{0i}), то

$$n^2 = 1 + \frac{n_0}{\varepsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{\frac{e_i^2}{m_i}}{(\omega_{0i}^2 - \omega^2)}$$

Если частота света ω заметно отличается от ω_{0i} – собственной частоты электронов

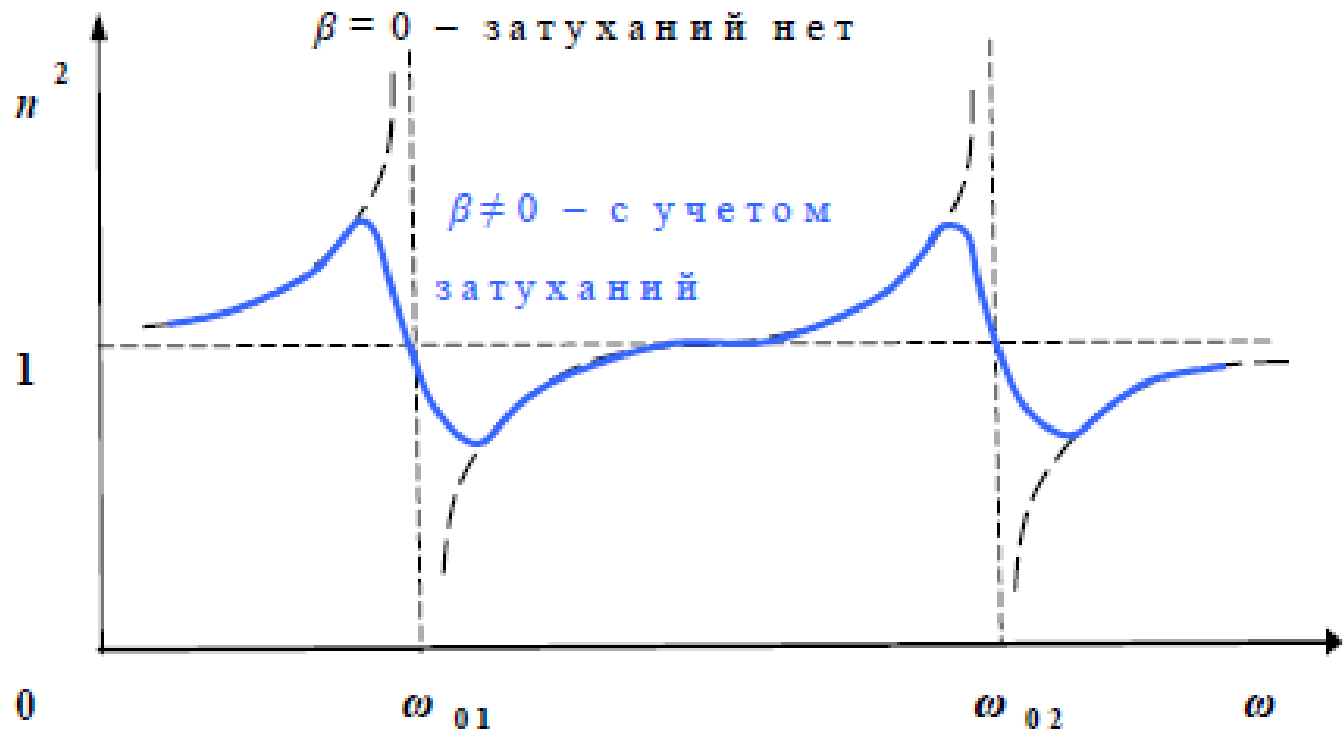
$$\sum_{i=1}^n \frac{\frac{e_i^2}{m_i}}{(\omega_{0i}^2 - \omega^2)} \ll 1 \Rightarrow n^2 \approx 1$$

Дисперсия

9

Если $\omega \rightarrow \omega_{0j}$, то функция терпит разрыв: $+\infty$ при $\omega < \omega_{0j}$, и $-\infty$ при $\omega > \omega_{0j}$. В этих точках наблюдается аномальная дисперсия.

В остальных областях с ростом ω растет и n , наблюдается нормальная дисперсия.



Абсорбция света – явление уменьшения энергии световой волны при её распространении в веществе, происходящее вследствие преобразования энергии волны во внутреннюю энергию вещества или энергию вторичного излучения, имеющего другой спектральный состав и иные направления распространения.

Поглощение света может вызывать: нагревание вещества, возбуждение или ионизацию атомов или молекул, фотохимические реакции и др. процессы в веществе.

Описывается уравнением Бугера-Ламберта (закон Бугера):

$$I = I_0 e^{-\alpha l}$$

I_0 , I – значения интенсивности света на входе и выходе из слоя среды толщиной l ,

α – показатель поглощения среды (линейный коэффициент поглощения), зависит от химической природы и состояния поглощающей среды и от длины световой волны λ

Зависимость $\alpha(\lambda)$ объясняет окрашенность поглощающих тел. Тело при освещении белым светом будет казаться того цвета, λ которых оно плохо поглощает.

У разряженных одноатомных газов – *линейчатый спектр поглощения*.

У газов с многоатомными молекулами – *полосы поглощения*.

Жидкие и твердые диэлектрики – *сплошной спектр поглощения* (широкие полосы поглощения, в пределах которых $\alpha \gg 1$).

Эффект Фарадея (магнитное вращение плоскости поляризации) – в оптически неактивных веществах вращение плоскости поляризации под действием магнитного поля.

При движении источника и приемника электромагнитных волн друг относительно друга наблюдается **эффект Доплера**.

При небольших скоростях движения $v \ll c$, релятивистская формула эффекта Доплера совпадает с классической формулой:

$$\nu \approx \nu_0 \left(1 - \frac{v}{c} \cos \theta \right)$$

Закономерности этого явления для электромагнитных волн устанавливаются на основе специальной теории относительности.

Если источник движется относительно приемника вдоль соединяющей их прямой ($\theta = 0, \pi$), то наблюдается **продольный эффект Доплера**.

$$\nu = \nu_0 \frac{1 - \left(\frac{\nu}{c}\right)^2}{1 - \frac{\nu}{c}}$$

При $\theta=\pi$ $\nu > \nu_0$ $\lambda < \lambda_0$ наблюдается **фиолетовое смещение**
При $\theta=0$ $\nu < \nu_0$ $\lambda > \lambda_0$ наблюдается **красное смещение**

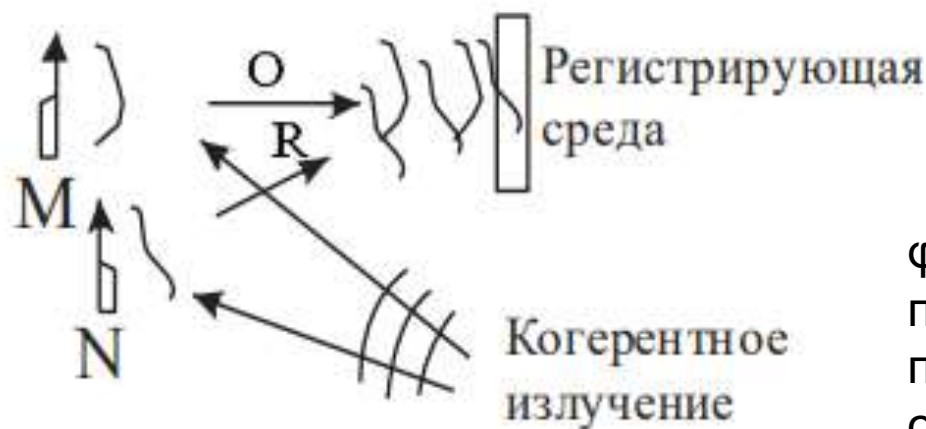
Если источник движется перпендикулярно к линии наблюдения наблюдается **поперечный эффект Доплера**:

$$\nu = \nu_0 \sqrt{1 - \left(\frac{\nu}{c}\right)^2}$$

Эффект Доплера, связанный с тепловым движением излучающих свет атомов газа, вызывает уширение спектральной линии:

$$\Delta \nu_{\delta} \approx \sqrt{\frac{T}{m}} \quad \nu_0 - \frac{\Delta \nu_{\delta}}{2} < \nu_{np} < \nu_0 + \frac{\Delta \nu_{\delta}}{2}$$

Голография - способ записи и восстановления волнового поля, основанный на регистрации интерференционной картины, которая образована волной, отражённой предметом, освещаемым источником света (предметная волна), и когерентной с ней волной, идущей непосредственно от источника света .



$$O = a_1 e^{i\varphi_o}$$

$$R = a_2 e^{i\varphi_r}$$

φ_o , φ_r - являются функциями пространственных координат плоскости регистрации голограммы, описывающими действительную амплитуду и фазу волны с комплексной амплитудой a_i .

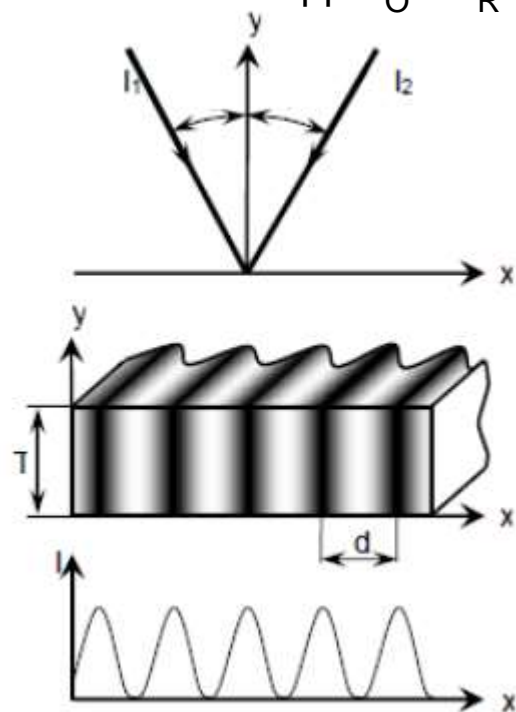
Амплитуда голографического поля в плоскости регистрации голограммы А:

$$A = a_1 + a_2$$

интенсивность голографического поля:

$$I = (a_1 + a_2) \cdot (a_1^* + a_2^*) = I_o + I_R + a_1 \cdot a_2^* + a_2 \cdot a_1^*$$

где I_o и I_R – интенсивности опорной и объектной волн.



Элементарная голограмма представляет собой одномерную решетку толщины T , в которой изменение параметров среды происходит в строго определенном направлении. Образуется в результате взаимодействия двух когерентных плоских волн.

$$d = \frac{\lambda}{\sin \theta_1 + \sin \theta_2}$$

Характеристики, определяющие **свойства голограмм**:

- ✓ период голограммы – d , или ее пространственная частота – $\nu=1/d$;
- ✓ толщина голограммы – T ;
- ✓ характер отклика регистрирующей среды на воздействие излучения (фотоотклик);
- ✓ ориентация изофазных поверхностей
интерференционной картины относительно границ голограммы.

Соотношение между пространственной частотой ν и толщиной T определяет *меру объемности* голограммы и ее важнейшие свойства: *угловую и спектральную селективность, дифракционную эффективность.*

Плоская (2D)

- при $T_v \rightarrow 0$, т.е. в такой голограмме можно пренебречь эффектами, связанными с ее конечной толщиной

Объёмная (3D)

- при $T_v \rightarrow \infty$ т.е. толщина голограммы намного превышает пространственный период изменения ее оптических параметров
- **Селективность голограммы** – свойство голограммы, связанное с уменьшением интенсивности дифрагированной (восстановленной) волны I_d при отклонении условий освещения голограммы от оптимальных, определяемых условием Вульфа-Брэггов

Объёмная (3D)

- **тонкослойные трехмерные голограммы** - статические трехмерные голограммы в средах толщиной порядка 10-20 мкм;
- **объемные** (глубокие, 3D) голограммы - статические трехмерные голограммы в средах толщиной порядка 1000 мкм и более;
- **динамические** трехмерные голограммы.

Теоретический **критерий степени объемности** (**параметр Клейна**) применимый в случае элементарных голограмм:

$$Q = \frac{2\pi\lambda T}{nd^2}$$

При $Q > 10$ голограмму принято считать трехмерной, высокоселективные трехмерные голограммы имеют $Q > 1000$

Типы голограмм

19



Одноракурсная
голограмма



3D голограмма



Двухракурсная
голограмма

<https://www.youtube.com/watch?v=ikuSPBZjkhw>

Автор: к.ф.-м.н., доцент Черкасова О.А.

Спонтанное и вынужденное излучение 20

Атом может самопроизвольно перейти из одного состояния в другое, энергия которого меньше энергии предыдущего. Такой переход (и испускаемое при этом излучение) называется **спонтанным**.

Под действием внешнего излучения атом также может перейти из одного состояния в другое. Если энергия конечного состояния больше энергии начального, то атом поглощает энергию. Если энергия конечного состояния меньше энергии начального, то атом испускает энергию. Такой тип излучения называется **вынужденным** или **индуцированным** излучением.

Вынужденное излучение являются строго **когерентными**.

Вероятность спонтанного перехода (в единицу времени) с высокого уровня энергии на низкий обозначим как A_{mn} (это обозначение называется **коэффициентом «А» Эйнштейна**).

Вероятность вынужденного перехода (в единицу времени) с высокого уровня энергии на низкий обозначим как B_{mn} (это обозначение называется **коэффициентом «В» Эйнштейна**).

$$A_{mn} = \frac{\hbar \omega^3}{\pi^2 c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{\hbar \omega}{kT}} - 1} = \frac{\hbar \omega^3}{\pi^2 c^3} B_{mn} = P_{mn} \left(e^{\frac{\hbar \omega}{kT}} - 1 \right)$$

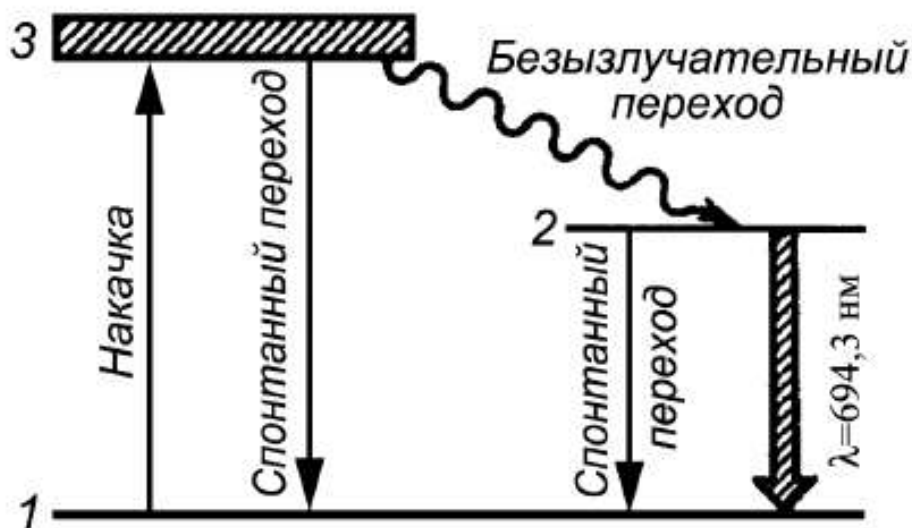
Вероятность спонтанного перехода с верхнего уровня энергии на нижний обратно пропорциональна среднему времени жизни возбуждённого состояния.

Спонтанное и вынужденное излучение 22

Вещество, находящееся в состоянии термодинамического равновесия поглощает проходящее через него излучение. Электромагнитная волна, проходя по веществу, расходует свою энергию на возбуждение атомов. Интенсивность излучения I при этом падает, подчиняясь закону Бугера:

$$I = I_0 e^{-kl}$$

где l – геометрическая длина хода луча, I_0 – начальная интенсивность при $l = 0$, k – коэффициент поглощения.



Электрическое поле в резонаторе:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \text{Re}(E(t) \cdot \vec{E}_s(\vec{r}) \cdot e^{i\omega_0 t})$$

где $E(t)$ - медленно меняющаяся амплитуда; $E_s(r)$ – характеризует распределение в пространстве поля рабочей моды резонатора.

Вектор поляризации активной среды – дипольный момент ед. объёма:

$$\vec{P}(\vec{r}, t) = \text{Re}(P(t) \cdot \vec{E}_s(\vec{r}) \cdot e^{i\omega_0 t})$$

Мгновенная **инверсная населенность** уровней – инверсия:

$$D(t) = N_2 - N_1$$

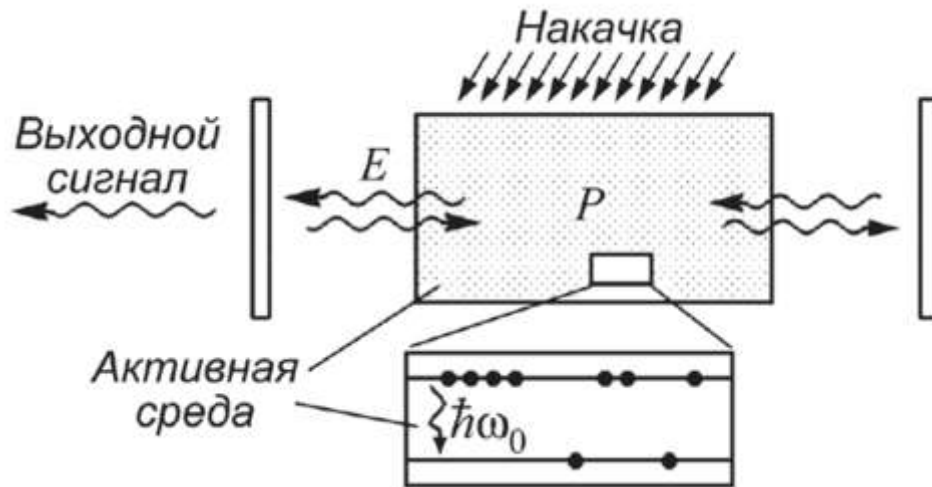
Изменение инверсии населенности имеет вид

$$\frac{dD(t)}{dt} = \Gamma(D_0 - D) - kEP$$

параметр релаксации населённости

интенсивность накачки

мощность



1. Активная среда
2. Система накачки
3. Резонатор

Активная среда может быть **твёрдой** (кристаллы рубина или алюмо-иттриевого граната, стекло с примесью неодима в виде стержней различного размера и формы), **жидкой** (растворы анилиновых красителей или растворы солей неодима в кюветах) и **газообразной** (смесь гелия с неоном, аргон, углекислый газ, водяной пар низкого давления в стеклянных трубках). Полупроводниковые материалы и холодная плазма, продукты химической реакции тоже дают лазерное излучение.

Накачка создает **инверсную заселенность** в активных средах.

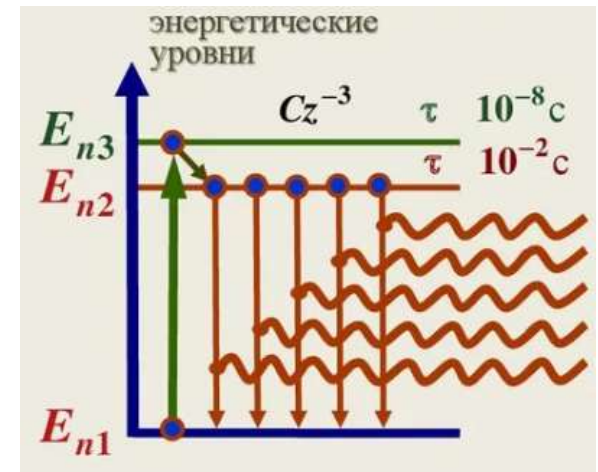
В твердотельных и жидкостных лазерах используют импульсные лампы или лазеры, газовые среды возбуждают электрическим разрядом, полупроводники – электрическим током.

Излучение, получаемое с помощью лазеров, обладает большой пространственной и временной когерентностью, высокой степенью монохроматичности, является поляризованным и узконаправленным потоком излучения (имеет малый угол расхождения пучка 10^{-5} рад).

У некоторых типов лазеров достигается мощность излучения порядка 10^{17} Вт/см², в то время как мощность излучения Солнца равна только $7 \cdot 10^3$ Вт/см²

Твердотельные лазеры

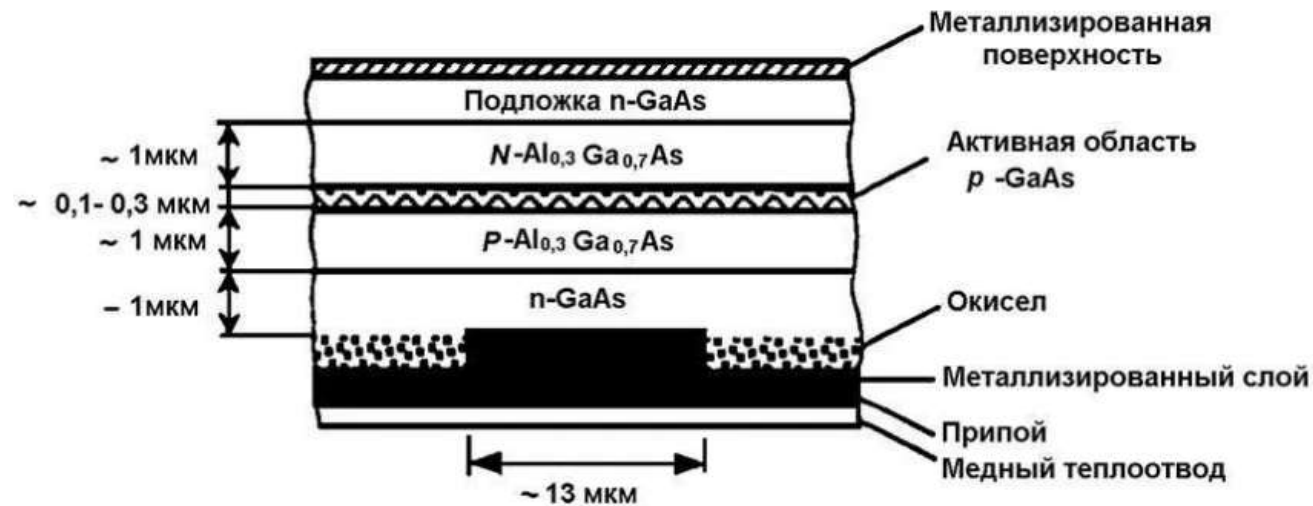
- люминесцирующие твёрдые среды (диэлектрические кристаллы и стёкла)
- В качестве активаторов обычно используются ионы редкоземельных элементов или ионы группы железа Fe.
- алюмо-иттриевый гранат (YAG), литиево-иттриевый фторид (YLF), сапфир (оксид алюминия) и силикатное стекло



Применение: голография, удаление тату, дальномеры, целеуказатели, хирургия, накачка др. лазеров, лазерная плавка, научные исследования нелинейной оптики, усилители в оптоволокне.

Полупроводниковые лазеры

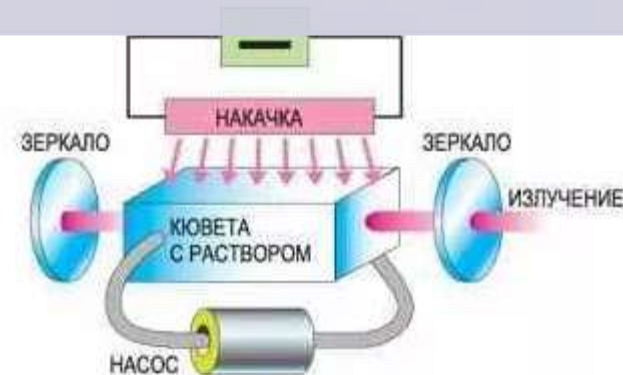
- инжекция избыточных носителей заряда через p-n переход или гетеропереход, электрический пробой в сильном поле, бомбардировка быстрыми электронами, а квантовые переходы происходят между разрешёнными энергетическими зонами, а не между дискретными уровнями энергии



Применение: голография, телекоммуникация, целеуказатели, лазерные принтеры, накачка др. лазеров.

Лазеры на красителях

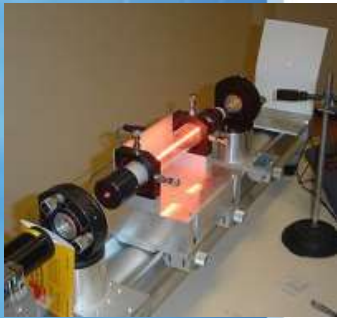
- раствор флюоресцирующих с образованием широких спектров органических красителей.
- метанол, этанол или этиленгликоль, в которых растворены химические красители, например кумарин или родамин.
- Конфигурация молекул красителя определяет рабочую длину волны.
- Лазерные переходы осуществляются между различными колебательными подуровнями первого возбуждённого и основного синглетных электронных состояний.



Применение: спектроскопия, научные исследования, косметическая хирургия, разделение изотопов

Газовые лазеры

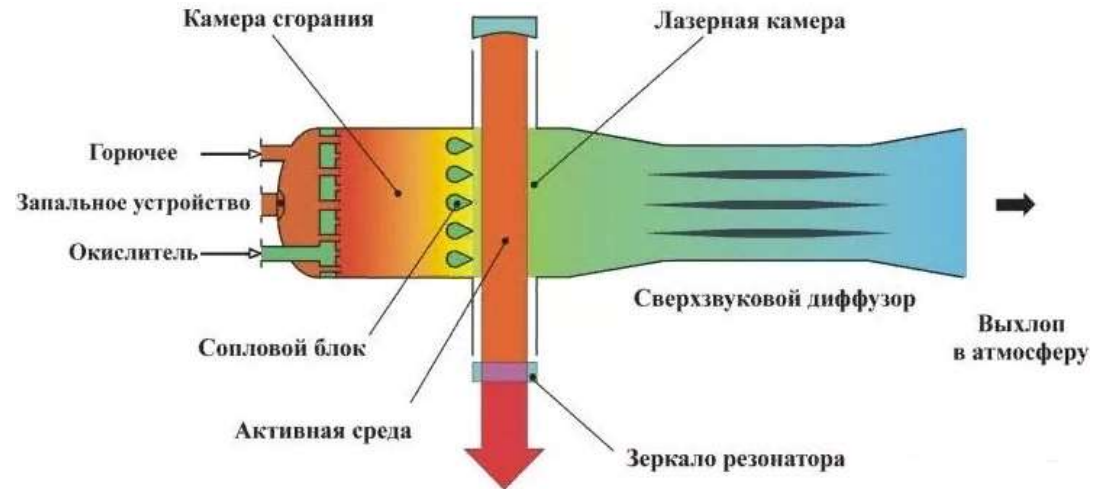
- Отличаются высокой мощностью, монохроматичностью, а также узкой направленностью излучения.
- Работают в непрерывном и импульсном режимах.
- Разделяют на газоразрядные лазеры, газовые лазеры с оптическим возбуждением и возбуждением заряженными частицами (например, лазеры с ядерной накачкой), газодинамические и химические лазеры.



Применение: гравировка, сварка, фотоакустическая спектроскопия, литография, научные исследования, хирургия, коррекция зрения, исследование загрязнения атмосферы, лазерное вооружение, интерферометрия, голография, считывание штрих-кодов, демонстрация оптических эффектов, лазерное шоу

Газо-динамические лазеры

- лазеры с тепловой накачкой, инверсия населённости в которых создаётся между возбуждёнными колебательно-вращательными уровнями гетероядерных молекул путём адиабатического расширения движущейся с высокой скоростью газовой смеси (чаще N_2+CO_2+He или $N_2+CO_2+H_2O$, рабочее вещество - CO_2).



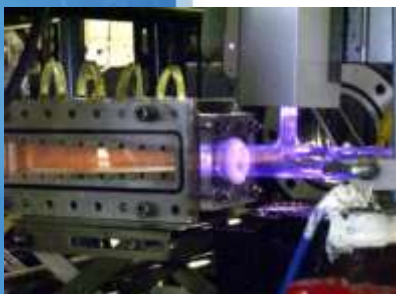
Применение: обработка и термообработка материалов, лазерная резка пластин, резисторов, сварка тонких металлических пластин (<1 мм)

Эксимерные лазеры

- Разновидность газовых лазеров, работающих на энергетических переходах эксимерных молекул (димерах благородных газов, а также их моногалогенидов), способных существовать лишь некоторое время в возбуждённом состоянии.

Химические лазеры

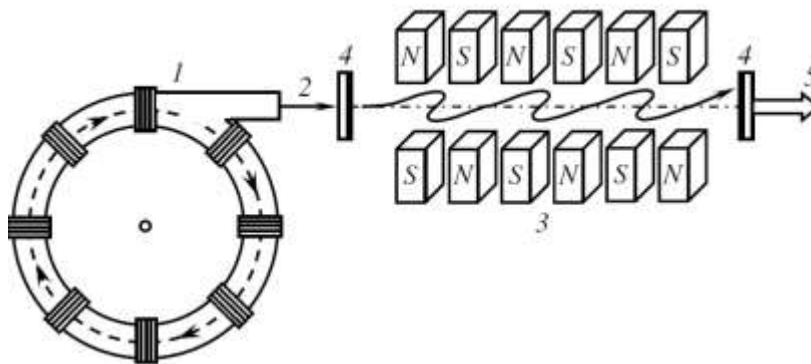
- Источником энергии служат химические реакции между компонентами рабочей среды.
- Лазерные переходы происходят между возбуждёнными колебательно-вращательными и основными уровнями составных молекул продуктов реакции.



Применение: научные исследования, противоракетная оборона; напыление, медицина

Лазеры на свободных электронах

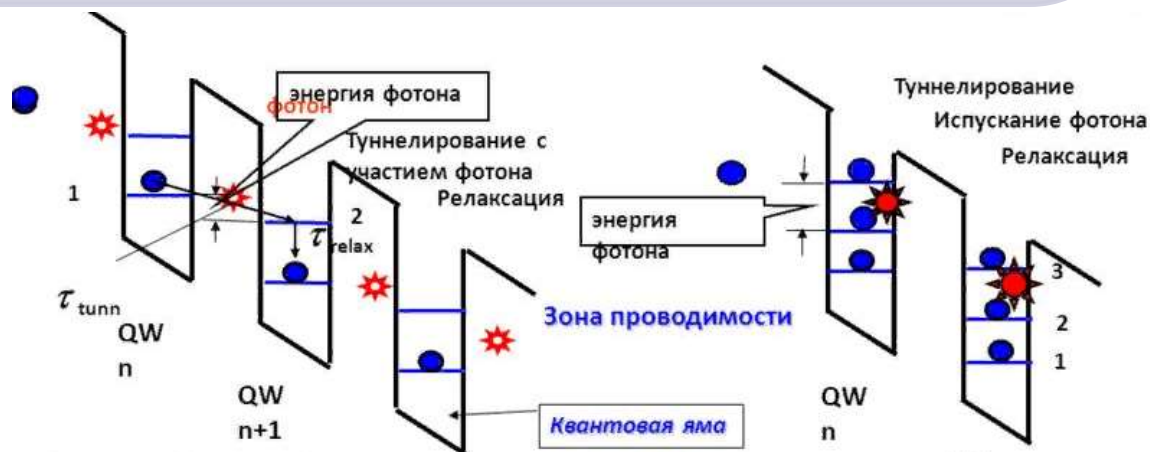
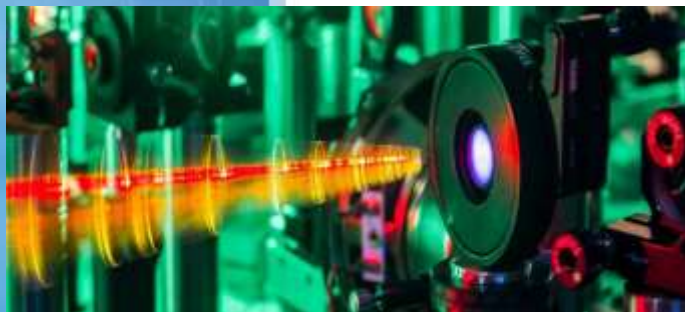
- Активная среда - поток свободных электронов, колеблющихся во внешнем электромагнитном поле (за счёт чего осуществляется излучение) и распространяющихся с релятивистской скоростью в направлении излучения.
- Плавная широкодиапазонная перестройка частоты генерации
- Различают убитроны и скаттроны, накачка первых осуществляется в пространственно-периодическом статическом поле ондулятора, вторых - мощным полем электромагнитной волны.



Применение: исследование атмосферы, материаловедение, медицина, противоракетная оборона

Квантовые каскадные лазеры

- Полупроводниковые лазеры, которые излучают в среднем и дальнем инфракрасном диапазоне.
- Излучают посредством вынужденных переходов между разрешенными электронными и дырочными уровнями, разделенными запрещённой зоной полупроводника, излучение квантовых каскадных лазеров возникает при переходе электронов между слоями гетероструктуры полупроводника и состоит из двух типов лучей, причем вторичный луч обладает весьма необычными свойствами и не требует больших затрат энергии.



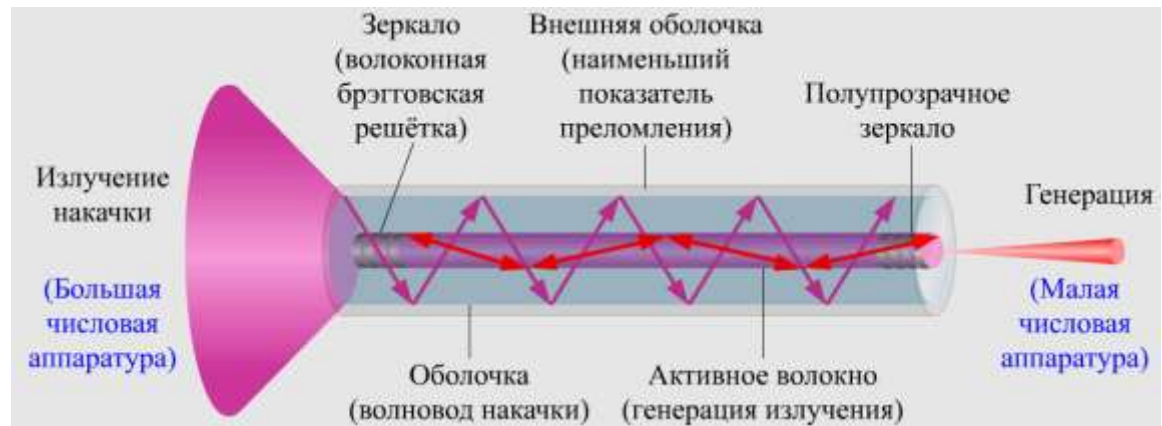
Применение: исследование атмосферы, контроль промышленных процессов, медицина, беспроводная оптическая связь, военное применение, система координации движения

Виды лазеров

34

Волоконный лазер

- При полностью волоконной реализации - цельноволоконный, при комбинированном использовании волоконных и других элементов в конструкции лазера - волоконно-дискретный или гибридный.



Применение: прецизионная обработка, создание микро- и наноструктур, телекоммуникация, оптическая томография, волоконно-оптические гироскопы, ускорение электронов, волоконно-оптические тензодатчики, модуляторы

Спасибо за внимание!

