

**Учебный курс**  
**«ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**  
**ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ»**

**Тема :**

**Волоконно-оптические технологии и  
техника**

**Лектор:**

**кфмн, доцент Гришачев Владимир Васильевич**

# Программа курса

## ЛЕКЦИИ

- I. Фотонные технологии
- II. Волоконно-оптический транспорт
- III. Волоконно-оптические преобразователи
- IV. Волоконно-оптическая техника
- V. Рефлектометрия оптических волокон
  
- VI. Коллоквиум
  
- VII. Лабораторный практикум

# Лекция 1-2

## «Фотонные технологии»

1. Волновое и квантовое описание света.
2. Генерация света.
3. Регистрация параметров света.
4. Оптические свойства материалов.
5. Оптические направляющие (световоды).
6. Взаимодействие света с веществом.
7. Основные применения фотоники.

# Фотонные технологии

## ○ **Понятие**

---

**Фотоника** (англ. photonics) — область науки и техники, которая занимается изучением фундаментальных и прикладных аспектов генерации, передачи, модуляции, усиления, обработки, детектирования и распознавания оптических сигналов и полей, а также применением указанных явлений при разработке и создании оптических, электрооптических и оптоэлектронных устройств различного назначения.

/Словарь терминов РОСНАНО/

<http://thesaurus.rusnano.com/>

фотонные технологии применяемые в информационной технике

- лазерные технологии
- опто/фотоэлектронные технологии
- волоконно-оптические технологии
- интегрально-оптические/фотонные/ технологии
- другое

# 1. Волновое и квантовое описание света

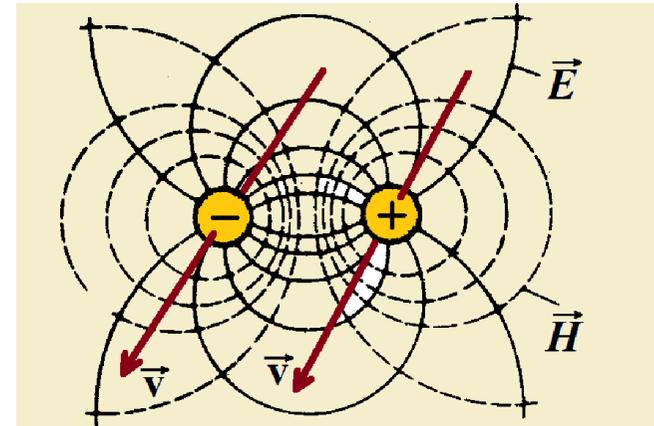
## ○ Свет – поле электромагнитного взаимодействия с энергией порядка эВ

физическое поле – одна из форм существования материи (вещество, поле, темная материя и энергия), посредством которой осуществляется взаимодействие (гравитационное, электромагнитное, слабое и сильное) между частицами, телами (веществом), обладающими соответствующими зарядами.

электромагнитное поле (ЭМП) определяет электромагнитное взаимодействие между движущимися зарядами, которое проявляется в виде стационарных и переменных полей;

возмущения в электромагнитном поле распространяются в виде

волн (при частотах  $\ll 10^{15}$  Гц) и квантов (при частотах  $\gg 10^{15}$  Гц)

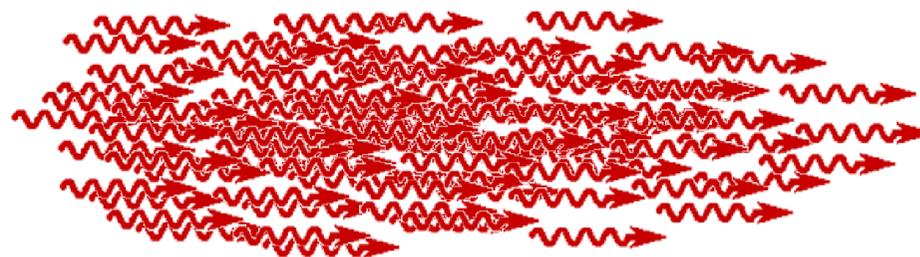
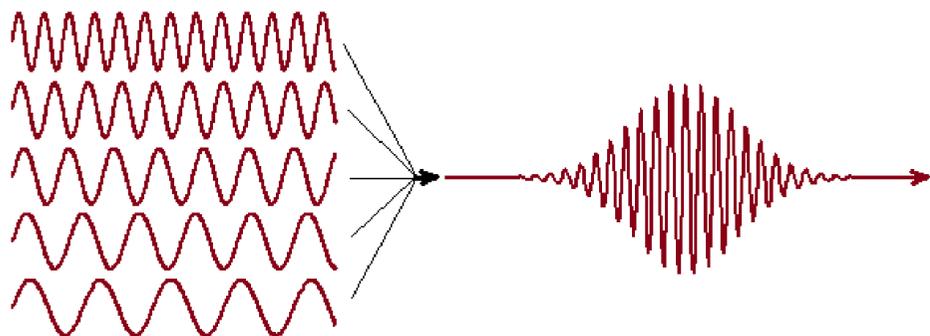


световое поле является возмущениями ЭМП на частотах порядка  $10^{15}$  Гц, которые распространяются с скоростью света  $c=10^8$  м/с

# 1. Волновое и квантовое описание света

## ○ Представление света в виде волн и квантов электромагнитного поля

волновой пакет ----- поток фотонов



$$\sum_{\nu} \vec{E}_{\nu} \cdot \exp \left[ i \left( \omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \varphi_0 \right) \right]$$

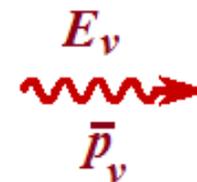
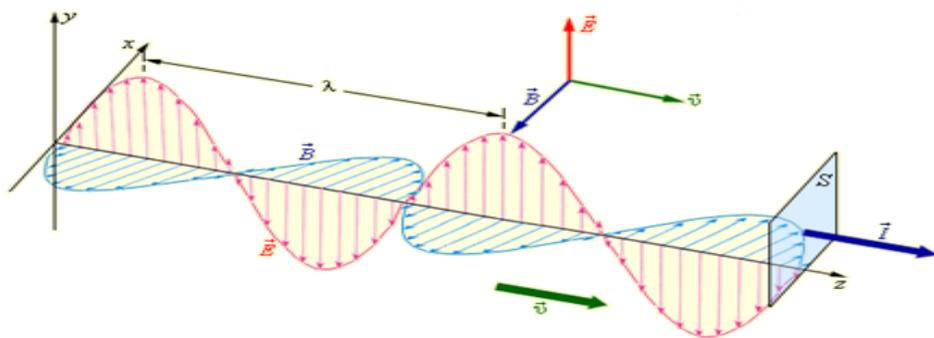
$$\sum_{\nu} N_{\nu} \cdot E_{\nu}$$

монохроматическая волна -----

фотон (квант света) - бозон

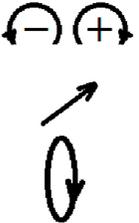
поперечная гармоническая волна E и H

масса = 0, заряд = 0, спин = 1



# 1. Волновое и квантовое описание света

## ○ Связь волновых и квантовых параметров света

волна	фотон	
частота $\omega = 2\pi\nu$	энергия $E_\nu$	$E_\nu = h\nu = \hbar\omega$
волновой вектор $\vec{k} = (2\pi/\lambda) \cdot (\vec{c}/c)$	импульс $\vec{p}_\nu = \frac{E_\nu}{c^2} \vec{c}$	$\vec{p}_\nu = \hbar\vec{k}$
поляризация 	спиральность (спин $\hbar\vec{s}$ ) $p = ap^+ + bp^-$ $a^2 + b^2 = 1$ $a^2, b^2$ вероятность $p^+, p^-$	механический момент $p^-: a=0, b=1$ $p^+: a=1, b=0$ ; $a=b \neq 0$ $a \neq 0, b \neq 0, a \neq b$
интенсивность волны $I = \langle S \rangle = E_m H_m / 2$	интенсивность потока $I = \langle \sum N \hbar \omega \rangle = N E_\nu c$	вектор Пойтинга $\vec{S} = w \vec{c}$
$E_m, H_m$ амплитуды напряженностей полей	$N$ плотность фотонов	$w$ объемная плотность энергии ЭМП

# 1. Волновое и квантовое описание света

## ○ Классическое и квантовое описание взаимодействия света с веществом

волна

вещество сплошная среда с векторами поляризации  $\vec{P}$  и намагниченности  $\vec{M}$ , описываемая тензорами магнитной  $\chi_H$  и электрической  $\chi_E$  восприимчивости

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \hat{\chi}_E \vec{E}$$

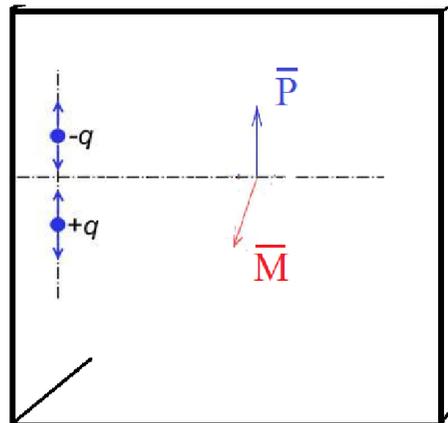
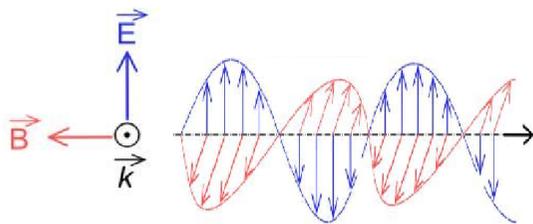
$$\vec{M} = \hat{\chi}_H \vec{H}$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \varepsilon_0 \hat{\varepsilon} \vec{E}$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M} = \mu_0 \hat{\mu} \vec{H}$$

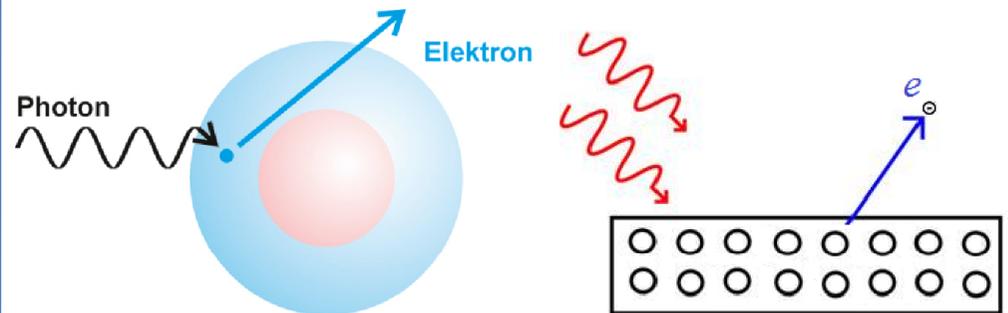
$$\hat{\varepsilon} = \|\varepsilon_{ij}\| = 1 + \hat{\chi}_E$$

$$\hat{\mu} = \|\mu_{ij}\| = 1 + \hat{\chi}_H$$



частица

вещество – среда, состоящая из отдельных атомов, с электронами которыми взаимодействует фотон, как частица обладающая энергией, импульсом и моментом импульса

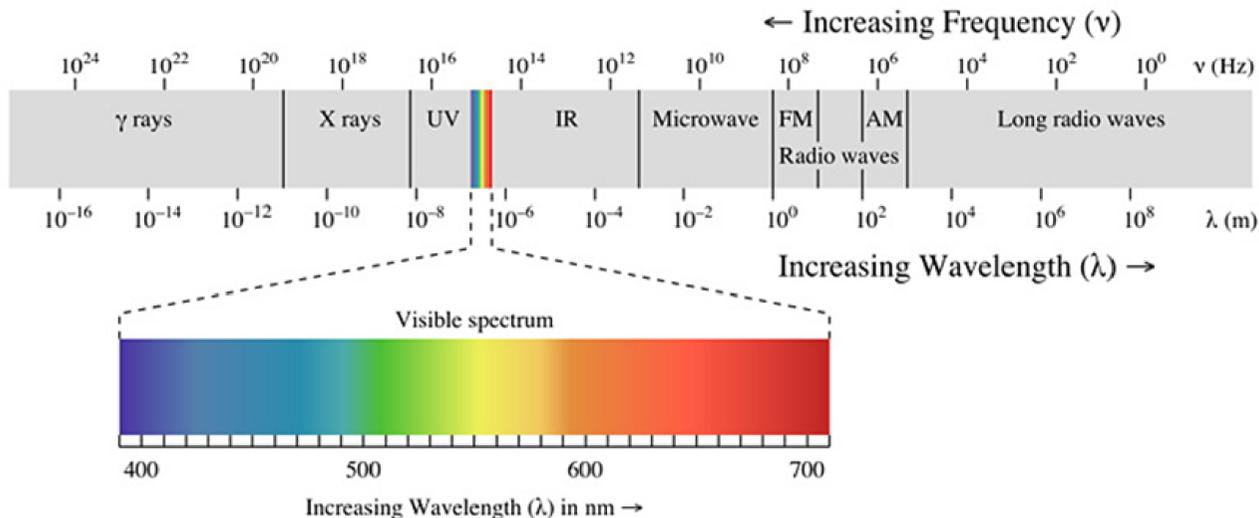


наблюдаемые эффекты получаются путем усреднения по отдельным взаимодействиям во времени и пространстве, с учетом вероятности процесса

# 1. Волновое и квантовое описание света

## ○ Выводы

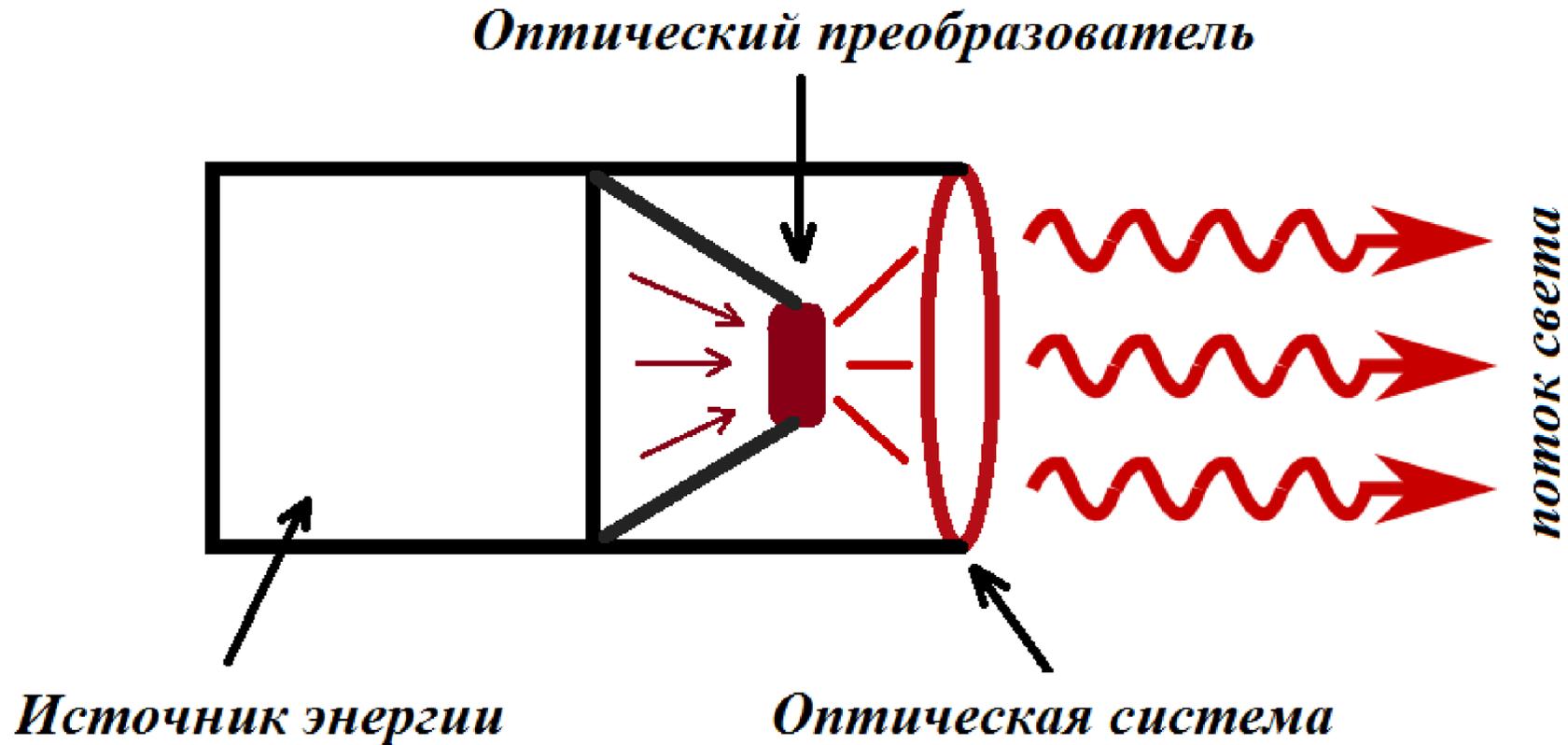
- ❖ оба описания эквивалентны между собой: каждый эффект можно описать как в волновом, так и квантовом представлении, но с ростом частоты волновое (радиоволны) описание сменяется на квантовое (гамма излучение);
- ❖ особенностью оптического диапазона частот является то, что энергия электромагнитного поля связана с основным объектом взаимодействия – электроном в атоме – энергия взаимодействия между электроном и ядром в веществе приблизительно совпадает с энергией фотона



Цвет	Диапазон длин волн, нм	Диапазон частот, ТГц	Диапазон энергии фотонов, эВ
Фиолетовый	380—440	790—680	2,82—3,26
Синий	440—485	680—620	2,56—2,82
Голубой	485—500	620—600	2,48—2,56
Зелёный	500—565	600—530	2,19—2,48
Жёлтый	565—590	530—510	2,10—2,19
Оранжевый	590—625	510—480	1,98—2,10
Красный	625—740	480—405	1,68—1,98

## 2. Генерация света

### ○ Источники света: принципиальная конструкция



основной элемент источника света –  
оптический преобразователь внешней энергии в световой поток  
(генератор света)

## 2. Генерация света

### ○ **Источники света: характеристики**

---

#### основные

- энергетические параметры (выходная мощность Вт, интенсивность Вт/см<sup>2</sup>, светимость люмен/м<sup>2</sup>);
- спектр излучения (форма спектральных линий, ширина спектра, спектральный состав, монохроматичность);
- диаграмма излучения (расходимость страд, направленность);
- когерентность (время когерентности, длина когерентности);
- поляризация (линейная, круговая, эллиптическая и естественная)

#### дополнительные

- стабильность излучения, инерционность (продолжительность сохранения параметров излучения во времени);
- КПД генерации света;
- управляемость (модуляция параметров излучения);

## 2. Генерация света

### ○ Генерация электромагнитных волн

(гармонических) происходит при периодическом (колебательном) движении частиц массой  $m$  и зарядом  $q$  в излучателе с частотой  $\nu$  при смещении  $x$  с амплитудой  $A$ :

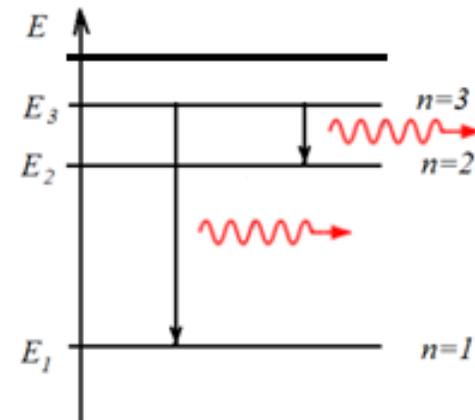
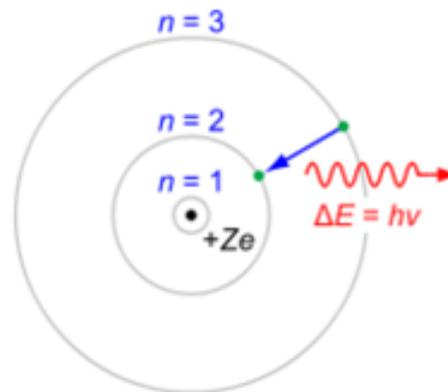
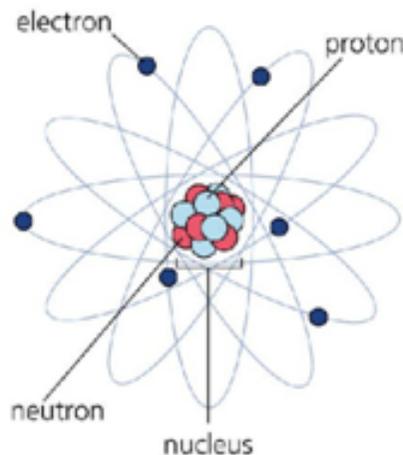
$$x = A \sin 2\pi\nu t$$

в результате заряженная частица должна двигаться с амплитудами

скорости  $v_m = 2\pi\nu A$  и ускорения  $a_m = (2\pi\nu)^2 A$ ,

которые должны расти с ростом частоты пропорционально 1 и 2 степени.

в оптической области частот – это требует создания больших напряженностей полей, которые реализуются внутри атома, поэтому основной способ генерации света происходит при внутри атомных переходах электрона



## 2. Генерация света

### ○ Возбуждение электронов в атоме

---

для формирования оптического излучения в среде необходимо перевести атомы из стабильного состояния в возбужденное состояния, т.е. когда электрон располагается на энергетическом уровне выше основного состояния

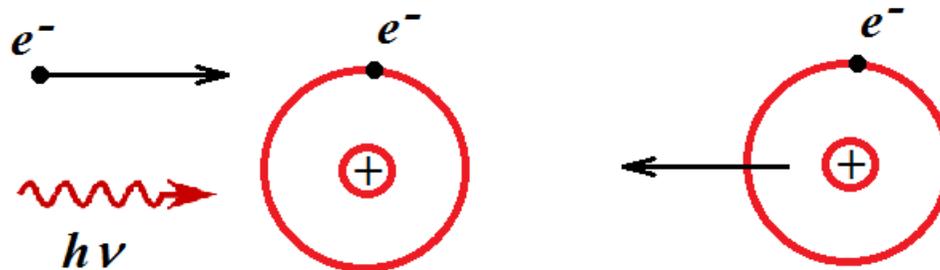
методы возбуждения атомов (электронов)

в результате соударения с соседними атомами

в результате соударения с электронами или ионами

в результате химического взаимодействия

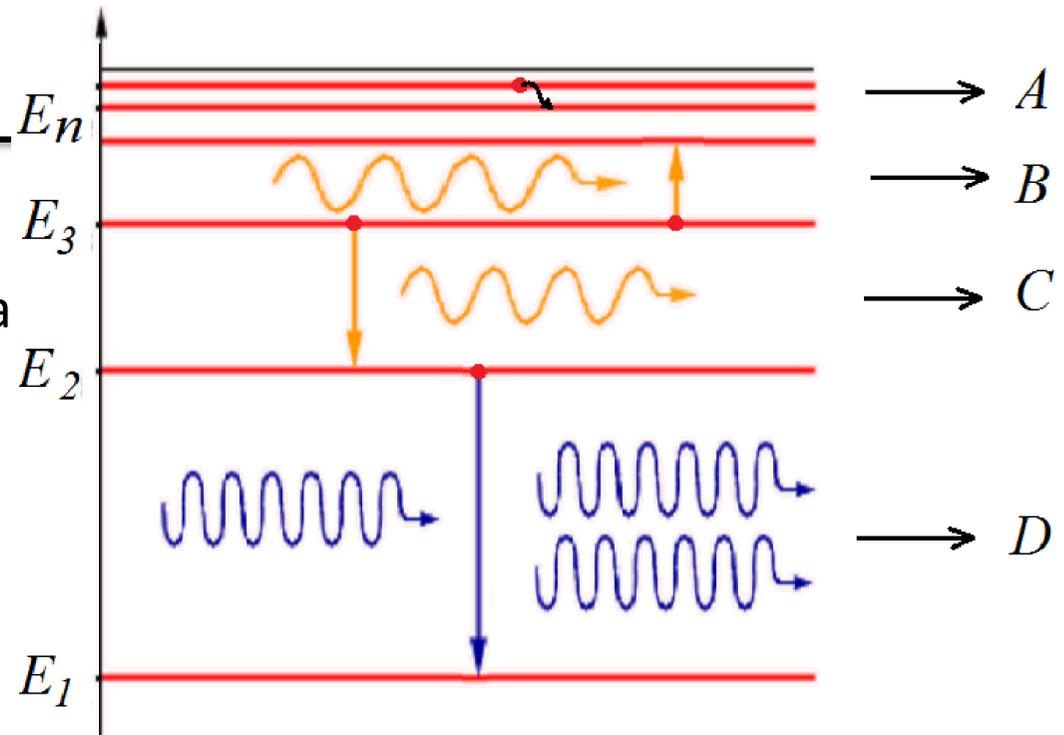
в результате взаимодействия с фотонами более высокой энергии



## 2. Генерация света

### ○ Внутриатомные переходы

- A. релаксационный переход
- B. резонансное поглощение фотона
- C. спонтанное (самопроизвольное) излучение фотона
- D. индуцированное (вынужденное) излучение фотона



в любом из переходов выполняется условие сохранения энергии

энергия излучаемого/поглощаемого фотона равна энергии перехода

$$h\nu = E_m - E_n$$

в случае вынужденного перехода под действием фотона с энергией совпадающей с энергией перехода, индуцируемый и падающий фотоны имеют одинаковые параметры

– энергию, импульс, поляризацию и фазу, т.е. фотоны когерентны

## 2. Генерация света

### ○ Равновесная и инверсная населенность электронов

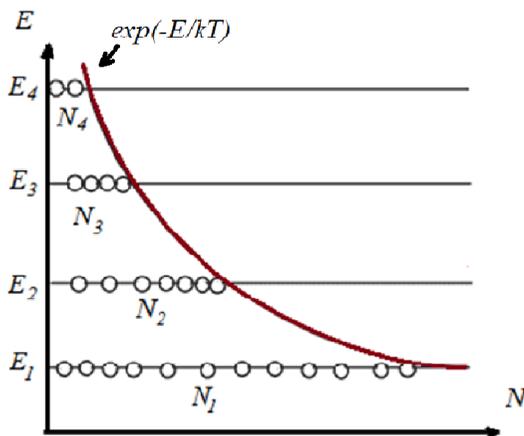
в условиях термодинамического равновесия системы атомов, вероятность распределения электронов по энергетическим уровням подчиняется *распределению Больцмана*, согласно которому число атомов  $N$  с электронами с энергией  $E$  определяется выражением

$$N_1/N_2 = \exp[-(E_1 - E_2)/kT], \quad \text{следовательно } N_1 > N_2, \text{ если } E_1 < E_2$$

где  $T$  – температура в системе,  $k$  – постоянная Больцмана,

такое состояние называется равновесным;

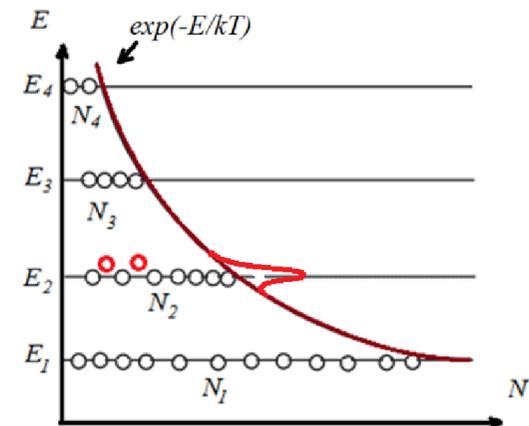
инверсная населенность уровней: в некоторых атомах время жизни на выделенных энергетических уровнях превышает время жизни на соседних, что позволяет получить состояния с нарушением распределения Больцмана



населенность

← равновесная

инверсная →



## 2. Генерация света

### ○ Виды источников света: равновесные (тепловые) источники

при нагревании тел со сплошным энергетическим спектром, они светятся, что связано с хаотическими соударениями между атомами, приводящими к возбуждению атомов и обратным переходам на нижние уровни со спонтанным излучением фотонов;

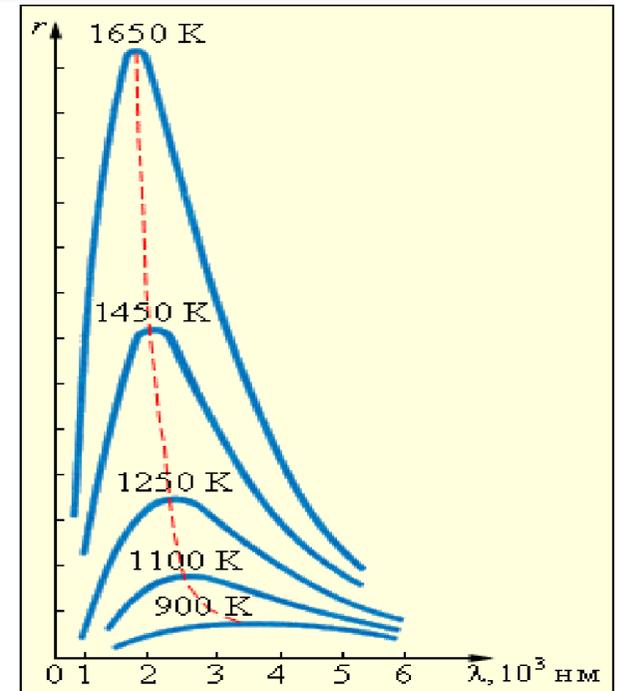
свойства теплового излучения (черное тело)

- равновесно, находится в термодинамическом равновесии с излучающим телом;
- непрерывно по спектру;

законы теплового излучения (черное тело)

Стефана–Больцмана: интегральная светимость  $R(T) = \sigma T^4$

Вина: длина волны максимума  $\lambda_{\max} = b/T$



## 2. Генерация света

### ○ **Виды источников света: неравновесные (люминесцентные) источники**

---

в излучающей системе с дискретным энергетическим спектром и энергетическими уровнями с неодинаковым временем жизни, возбуждение электронов приводит к неравновесному излучению, т.е. избыточному над тепловым при данной температуре излучающего тела;

люминесцентное свечение тел принято делить на следующие виды по типу возбуждения электронов:

фотолюминесценция — свечение под действием света (видимого и УФ-диапазона), она, в свою очередь, делится на

флуоресценция (время жизни  $10^{-9}$ – $10^{-6}$  с);

фосфоресценция ( $10^{-3}$ –10 с);

хемилюминесценция — свечение, использующее энергию химических реакций;

катодолюминесценция — вызвана облучением быстрыми электронами (катодными лучами);

сонолюминесценция — люминесценция, вызванная звуком высокой частоты;

радиолюминесценция — при возбуждении вещества ионизирующим излучением;

триболюминесценция — люминесценция, возникающая при растирании, раздавливании или раскалывании люминофоров. Триболюминесценция вызывается электрическими разрядами, происходящими между образовавшимися наэлектризованными частями — свет разряда вызывает фотолюминесценцию люминоформа.

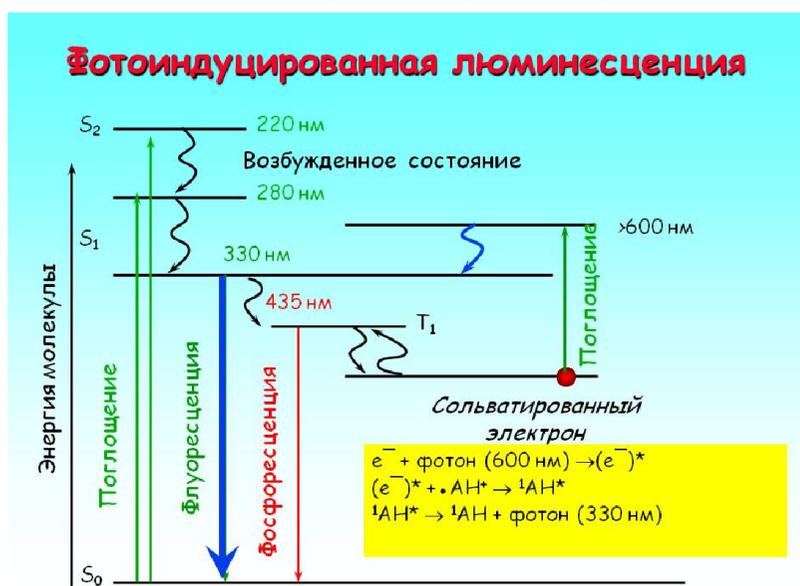
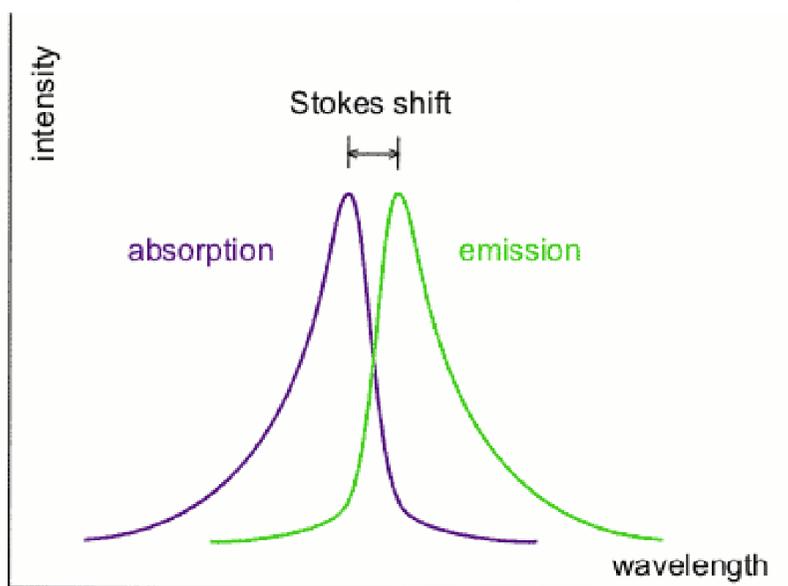
электролюминесценция — возникает при пропускании электрического тока через определённые типы люминофоров.

термолюминесценция — люминесцентное свечение, возникающее в процессе нагревания вещества.

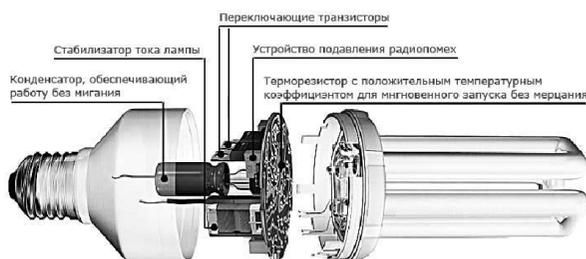
## 2. Генерация света

### ○ Виды источников света: неравновесные (люминесцентные) источники

люминесценция – неравновесное излучение с большой продолжительностью свечения после возбуждения, имеющее спектр с характерным максимумом;



люминесцентные источники света: лампы дневного света, компактные люминесцентные лампы (КЛЛ) и т.д.



## 2. Генерация света

### ○ Виды источников света: неравновесные (полупроводниковые) источники

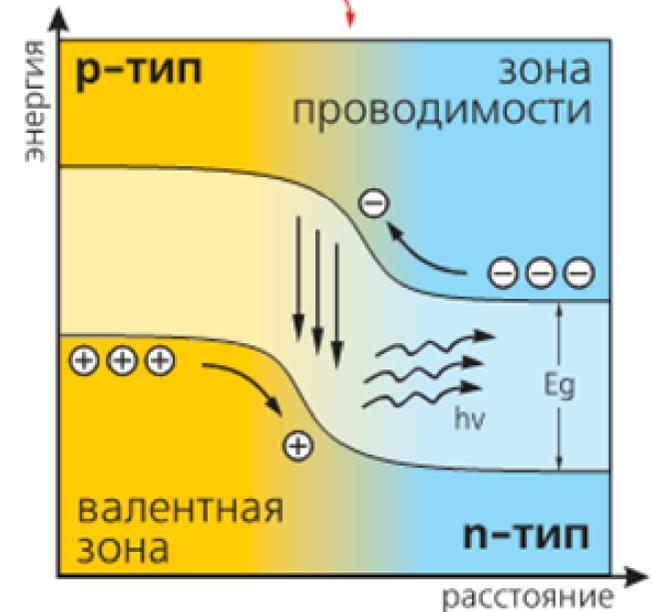
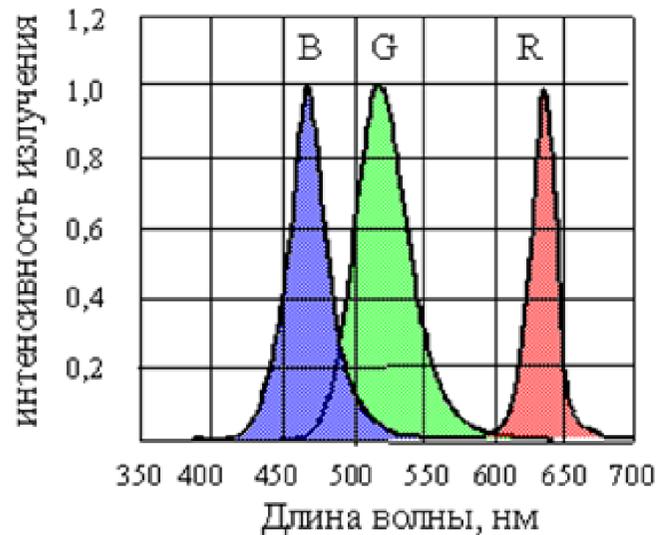
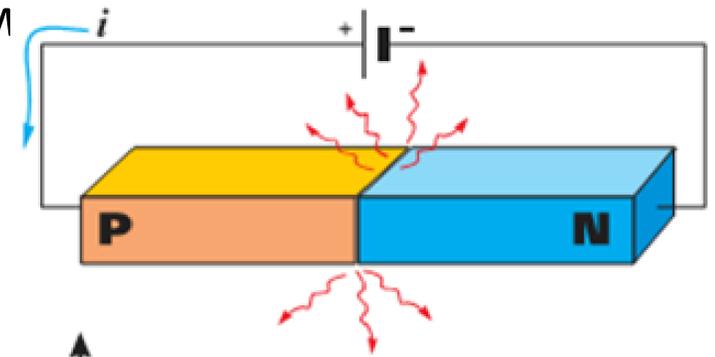
светодиоды, излучение света в результате рекомбинации дырок (p) и электронов (n) в p-n-переходе при пропускании прямого тока

спектр – линейный шириной более 40 нм

мощность – порядка 1 мВт до 200 мВт

напряжение/ток – (1,2-1,8 В)/(10-200 мА)

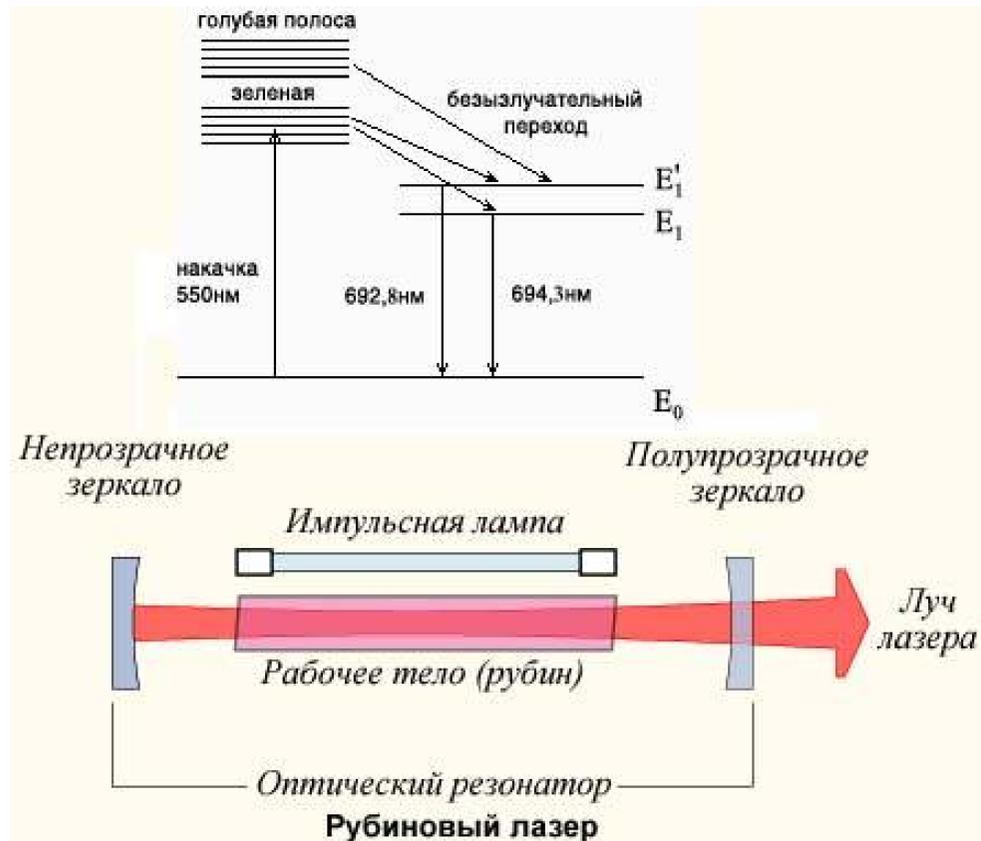
КПД – порядка 15%



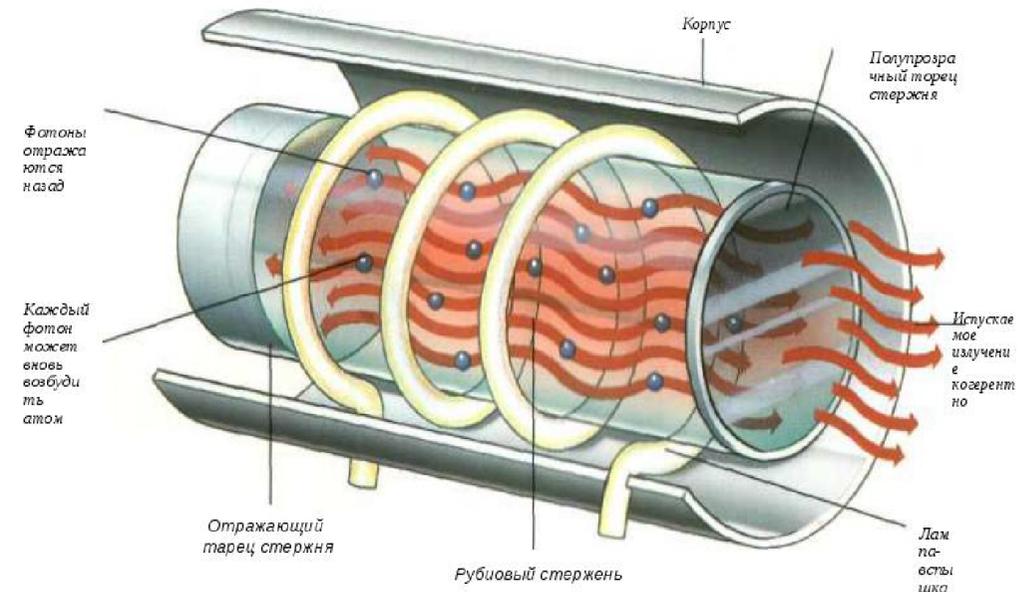
## 2. Генерация света

### ○ Виды источников света: лазеры

источники мощного направленного когерентного монохроматического излучения света, генерируемого в инверсных средах внутри резонатора, выполняющего роль обратной связи по излучению в усилителях.



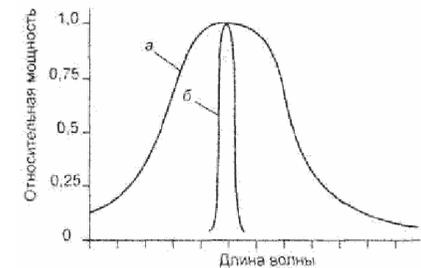
### Устройство рубинового лазера



## 2. Генерация света

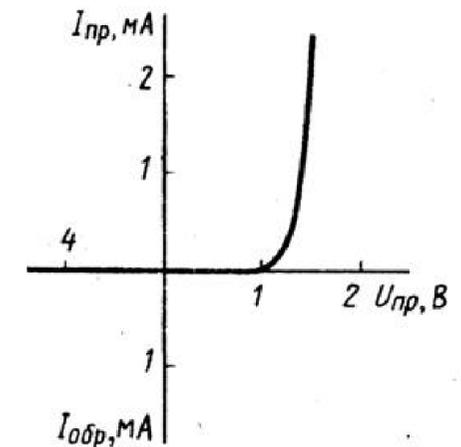
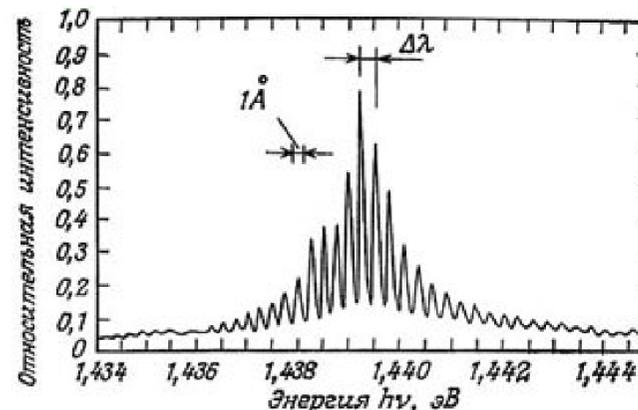
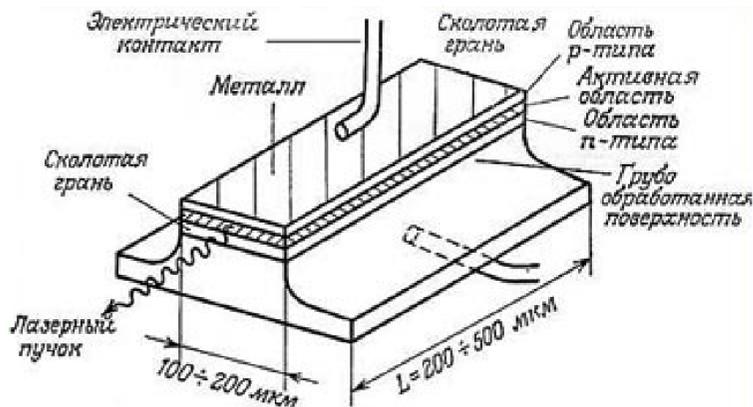
### ○ Лазеры – характеристики

мощность излучения - большая интенсивность, отнесенная к единице длины волны, которая достигает более  $\text{МВт}/\text{см}^2$ ;  
монохроматичность и когерентность – ширина полосы излучения менее  $1 \text{ нм}$  и длина когерентности более  $1 \text{ м}$ ;  
направленность пучка – расходимость менее  $0,001 \text{ рад}$   
поляризация – поляризованное/неполяризованное;  
длительность – от непрерывного до  $1 \text{ фемтосек}$  и менее;



Спектральные характеристики излучателей:  
а — светодиод, б — лазер

### полупроводниковый лазер



## 2. Генерация света

### ○ Выводы

---

источники оптического излучения делятся на

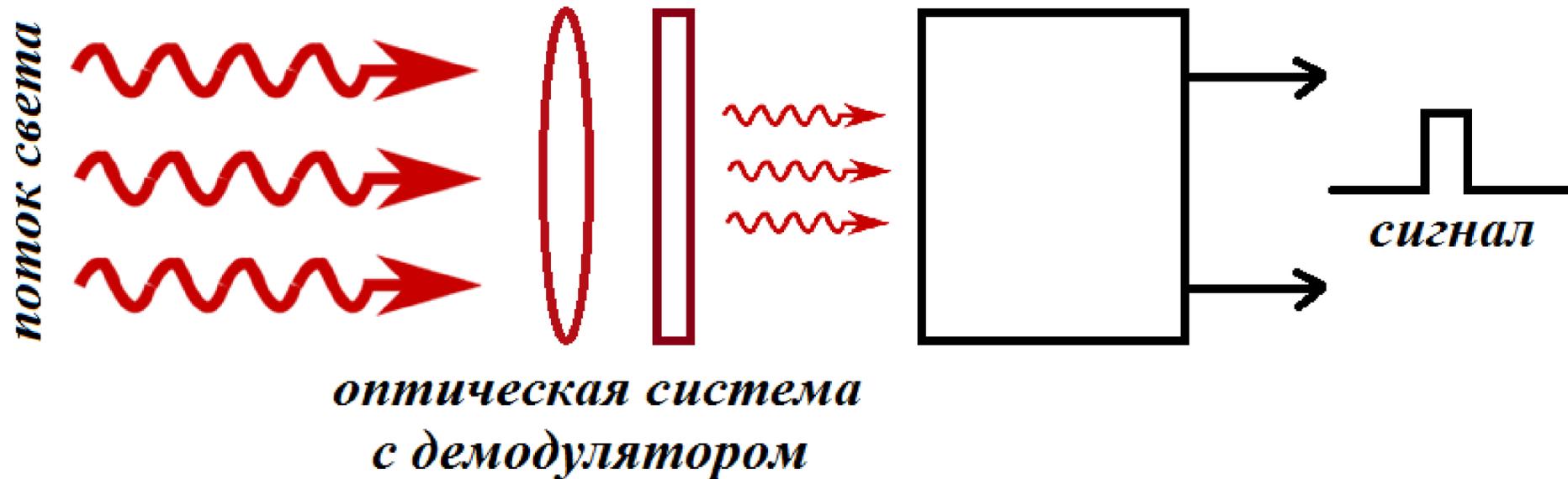
- равновесные (тепловые) источники света
- неравновесные источники света, такие как
  - люминесцентные
  - полупроводниковые (светодиодные)
- лазерные (когерентные), которые бывают
  - по активной среде (твердотельные, жидкостные, газовые и др.)
  - по накачке (оптические, электрические, химические и др.)
  - по излучению (непрерывные, импульсные длительностью до фс и частотой повторения до ГГц, поляризованные/неполяризованные, состав спектра и др.)

### 3. Регистрация параметров света

#### ○ Измерение параметров оптического излучения

обобщенная конструкция устройства регистрации параметров света

*преобразователь света*



в демодуляторе выделяется требуемый параметр оптического потока;

в преобразователе интенсивность света преобразуется непосредственно или путем нескольких преобразований в электрический сигнал, как правило;

### 3. Регистрация параметров света

#### ○ Преобразователи света – характеристики

---

чувствительность –  
масштабный коэффициент, определяемый как отношение выходного сигнала к входному оптическому сигналу;

разрешающая способность –  
наименьшая погрешность проводимого измерения;

спектральная характеристика –  
зависимость чувствительности от длины волны регистрируемого света;

динамический диапазон –  
отношение максимально измеряемого значения к его минимальному, выраженное в дБ;

инерционность –  
время отклика преобразователя на измерение параметра света;

### 3. Регистрация параметров света

#### ○ Преобразователи света – характеристики

---

**квантовая эффективность**  $\eta$  — это отношение среднего числа фотоэлектронов, эмитированных фотокатодом или образовавшихся в теле полупроводникового фотоприемника ( $\bar{n}$ ), к среднему количеству упавших на прибор фотонов ( $\bar{N}$ );

**спектральная чувствительность**  $S_\lambda$  — это отношение фототока  $i_\phi$  к мощности монохроматического излучения  $P_\lambda$ , падающего на фотоприбор:  $S_\lambda = i_\phi / P_\lambda$ , зависимость  $S_\lambda(\lambda)$  или  $\eta(\lambda)$  называется спектральной характеристикой фотоприемника;

**пороговая чувствительность, или эквивалентная мощность шума**  $P_{\text{пор}}$ , которая равна потоку излучения, необходимому для получения выходного сигнала, равного шуму приемника;

**постоянная времени**  $\tau$  — это время, в течение которого фототок фотодиода изменяется после освещения или после затемнения фотодиода в  $e$  раз (63 %) по отношению к установившемуся значению;

### 3. Регистрация параметров света

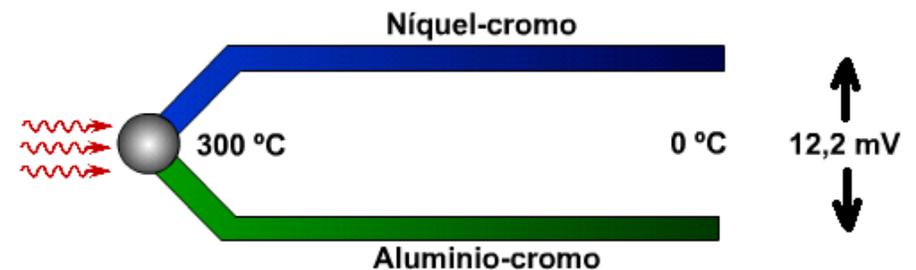
#### ○ Преобразователи света – тепловые приемники

основаны на тепловом действии света, световой поток вызывает нагревание приемника-преобразователя на температуру  $\Delta T$ , которая пропорциональна мощности потока, регистрируемая термометрическими методами:

- термоэлектрический преобразователь (термопара) –

под действием света нагревается

контакт двух металлов:  $\Delta T \sim \Delta U$



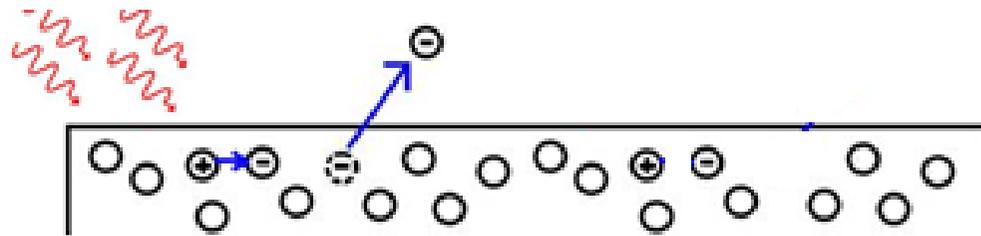
- болометр – нагревается терморезистор, что вызывает  $\Delta T \sim \Delta R$
- пироэлектрический приемник – основан на расширения при нагревании сегнетоэлектриков, что вызывает изменение поляризации и  $\Delta U$
- ячейка Галлея – основана на изменении давления газа в ячейке малого объема

### 3. Регистрация параметров света

#### ○ Преобразователи света – фотоэлектрические приемники

---

на основе фотоэлектрического преобразования – внешний и внутренний фотоэффект, т.е. выбивании фотоном электрона в п/п или из металла



на внешнем фотоэффекте

фотоэлектронные умножители (ФЭУ), микроканальные пластины (МКП)

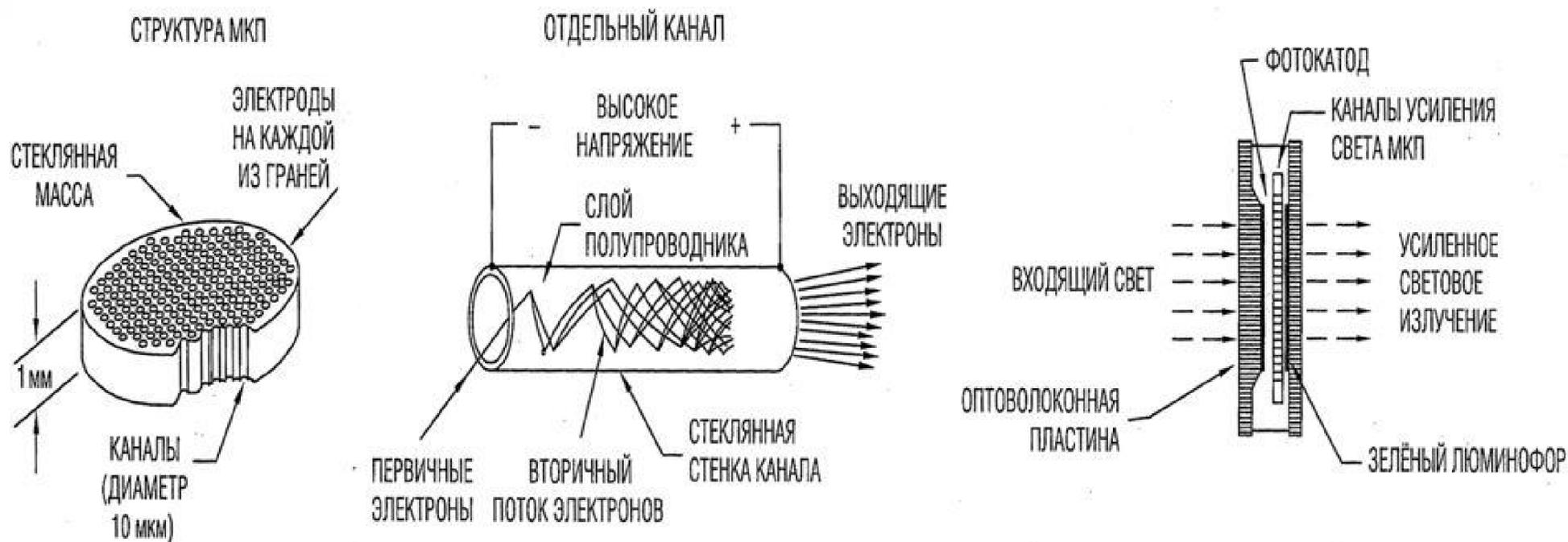
на внутреннем фотоэффекте

фоторезисторы, фотодиоды различной конструкции (p-n, p-i-n, лавинные)

### 3. Регистрация параметров света

#### ○ Преобразователи света – микроканальная пластина (МКП)

представляют собой сотовые структуры, образованные большим числом стеклянных трубок (каналов) диаметром 5-15 мкм с внутренней полупроводящей поверхностью, имеющей сопротивление от 20 до 1000 Мом, позволяющих усиливать оптический сигнал до  $10^9$  раз с высоким пространственным разрешением



(А) УСИЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ В МИКРОКАНАЛЬНЫХ ПРИБОРАХ

(В) МКП С БЛИЖНЕЙ ФОКУСИРОВКОЙ

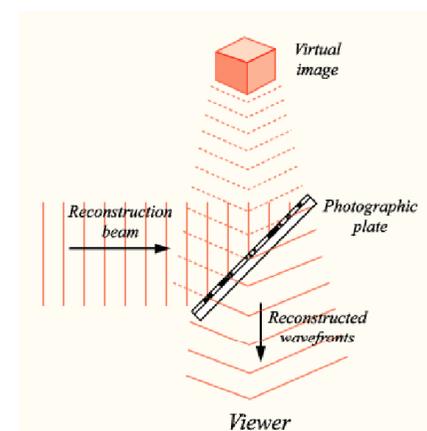
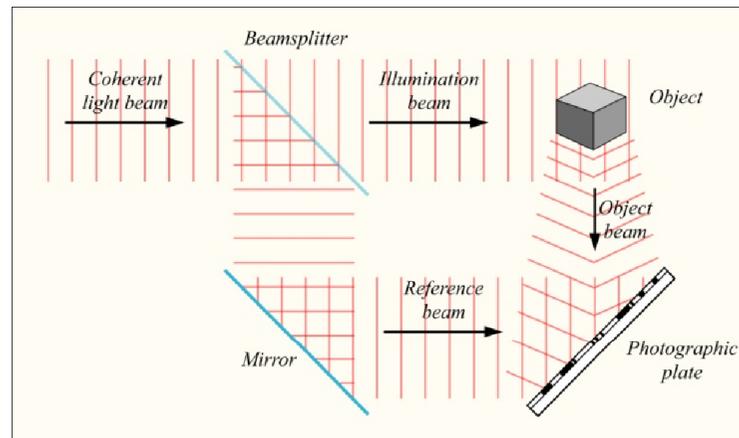


### 3. Регистрация параметров света

#### ○ Преобразователи света – специальные приемники

фотохимическая регистрация света – связано с химическими превращениями (химия возбужденных состояний молекул, фотохимические реакции), протекающие под действием света в диапазоне от дальнего ультрафиолета до инфракрасного излучения, позволяющее фиксировать на плоскости и в объеме распределение интенсивности падающего на вещество излучения.

применение



фотография - получение и сохранение (интенсивности) негативного плоского изображения при помощи светочувствительного материала;

голография - получения объёмного изображения объекта, основанный на интерференции волн объектной и опорной волн;

### 3. Регистрация параметров света

#### ○ Выводы

---

фотоприемные устройства по первичному преобразованию можно разделить на

- ✓ тепловые (термоэлектрические, пироэлектрические, ячейка Галлея, болометры);
- ✓ фотоэлектрические (на внутреннем или внешнем фотоэффекте – фотодиоды, фотоэлектронные умножители и т.д.);
- ✓ специализированные;

современные ФПУ позволяют регистрировать оптическое излучение

- с чувствительностью, соответствующей режиму счета отдельных фотонов;
- с временным разрешением более 10 ГГц;
- в динамическом диапазоне по мощности более 50 дБ;

## 4. Оптические свойства материалов

### ○ Понятие

---

твердые вещества (кристаллические, аморфные), жидкости, газообразные вещества и другие материалы пропускающие, отражающие, поглощающие излучение оптического диапазона, находящие применения в устройствах передачи и преобразования света.

основные характеристики

$n = (c/v) = \sqrt{\epsilon\mu}$  - показатель преломления, определяющий во сколько раз скорость света в вакууме ( $c$ ) больше чем в веществе ( $v$ );

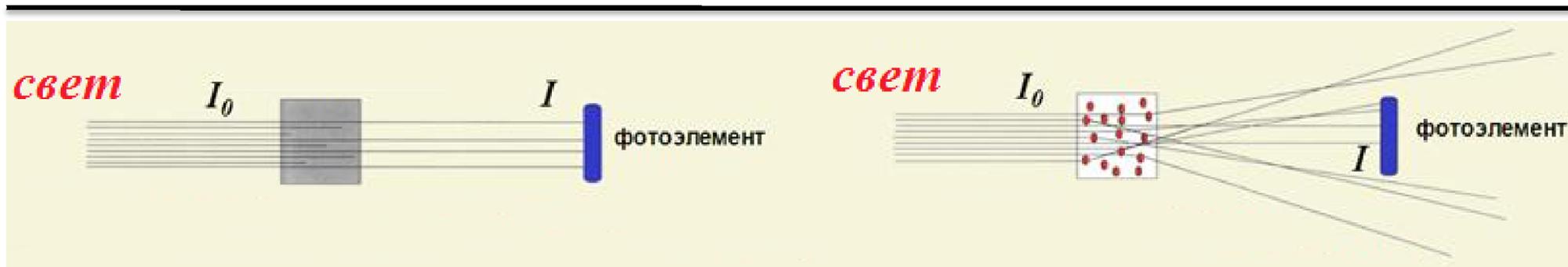
$\alpha = (1/L) \ln(I_L/I_0)$  - показатель поглощения, определяющий экспоненциальное ослабление интенсивности ( $I_0, I_L$ ) света в веществе при прохождении расстояния  $L$  законом Бугера-Ламберта-Бера  $I_L = I_0 \exp(-\alpha L)$  ;

комплексный показатель преломления среды  $\tilde{n} = n - ik, \quad k = \alpha\lambda/4\pi$

спектральные зависимости (дисперсионные параметры)  $n(\lambda), \quad \alpha(\lambda)$

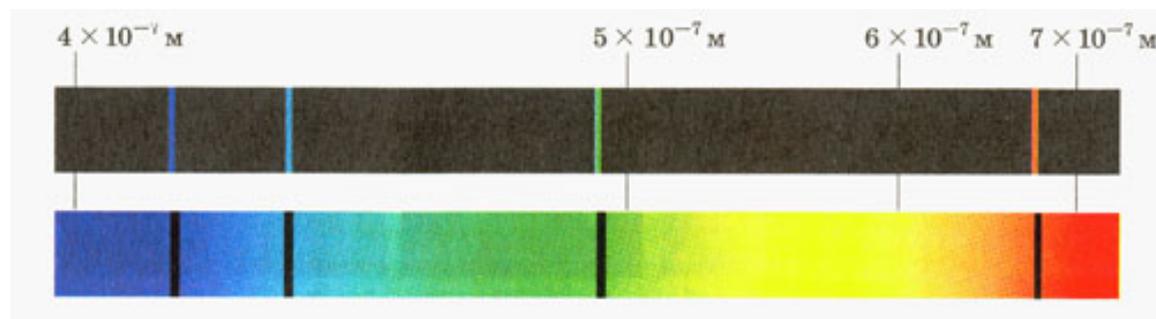
## 4. Оптические свойства материалов

### ○ Поглощение и рассеяние: поглощение



ослабление светового потока происходит в следствие поглощения и рассеяния  
**поглощение света** сопровождается поглощением фотонов из потока света, в результате чего электроны возбуждаются или отрываются от атома с последующей релаксацией энергии в тепло, в люминесцентное свечение

все вещества характеризуются спектрами испускания и поглощения  
например, для газов спектр имеет линейчатый вид



каждое вещество однозначно  
определяется своим спектром

## 4. Оптические свойства материалов

### ○ Поглощение и рассеяние: упругое рассеяние

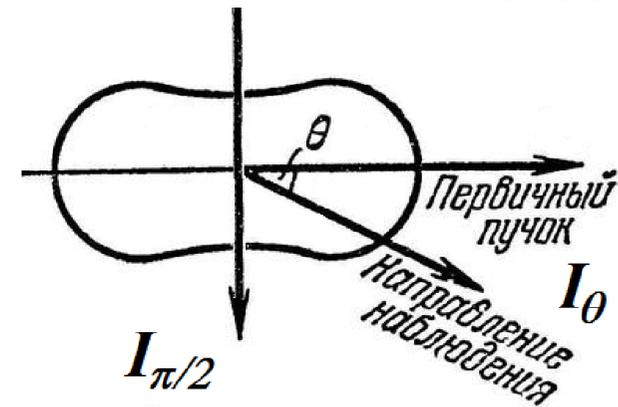
состоит в изменении направления распространения света на статических оптических неоднородностях вещества без изменения длины волны (упругое рассеяние) когерентное с падающим светом

- молекулярное рассеяние;

- рассеяние Рэля на неоднородностях  $\ll \lambda$ :  $I \sim \lambda^{-4}$

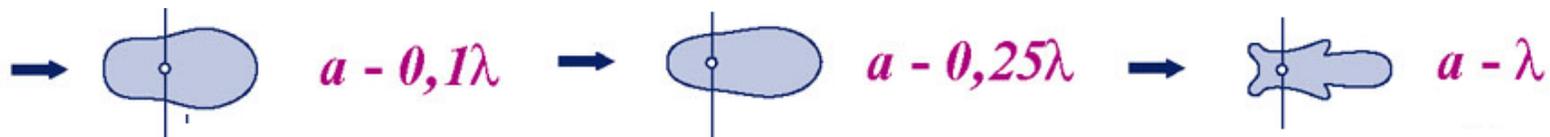
индикатриса рассеяния света

$$I_{\theta} = I_{\pi/2} (1 + \cos^2 \theta)$$



- рассеяние Ми на неоднородностях  $\gg \lambda$ :  $I$  не зависит от длины волны

индикатриса преимущественно направлено вперед, зависит от размеров неоднородности и с ростом размера направленность вперед растет



**Индикатрисы рассеяния на частицах разных размеров**

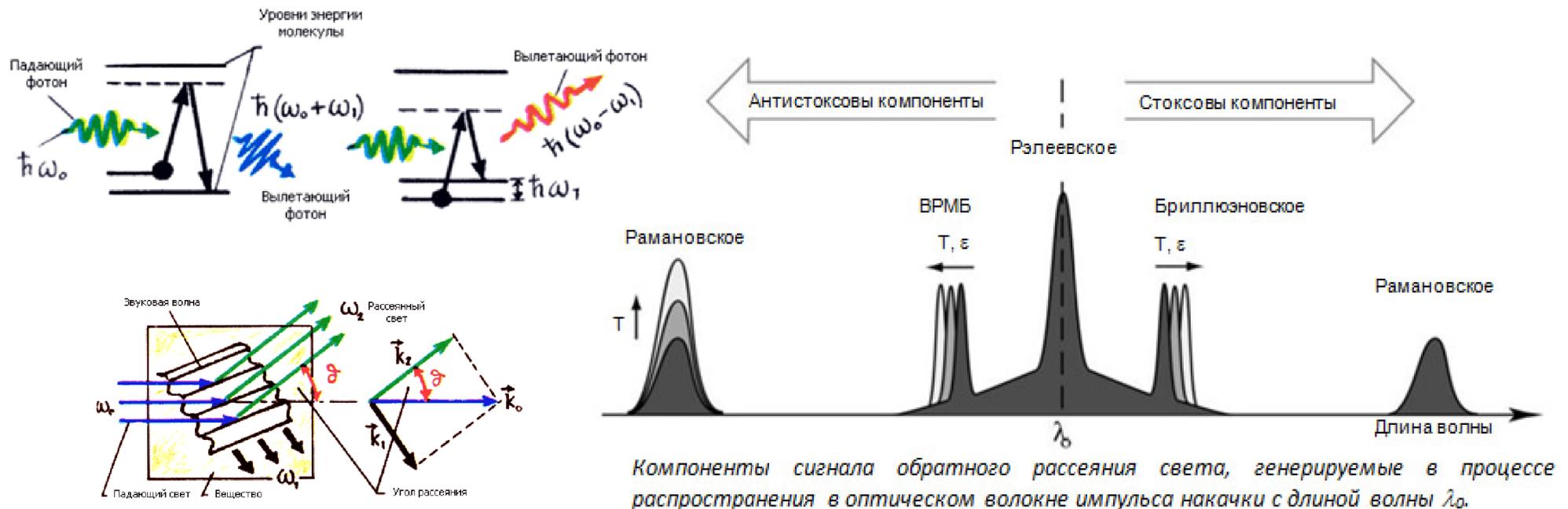
## 4. Оптические свойства материалов

### ○ Поглощение и рассеяние: неупругое рассеяние

на динамических флуктуациях среды с изменением длины волны падающего света:

—комбинационное рассеяние (Рамана), связано с колебательными движениями молекул;

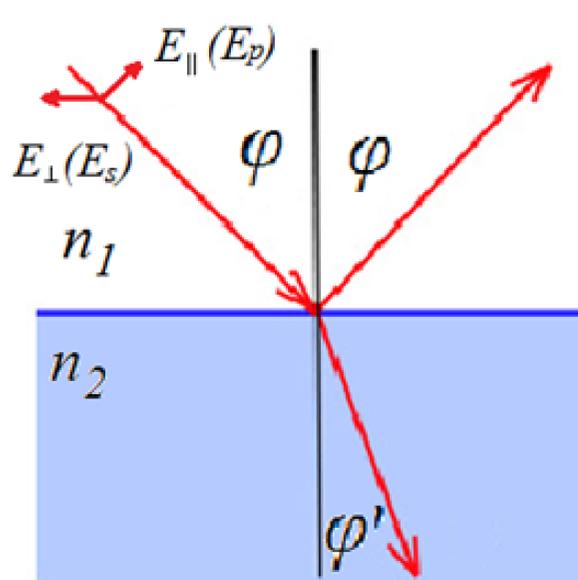
—рассеяние Мандельштама-Бриллюэна, связано с тепловыми колебаниями в конденсированных средах в виде тепловых фононов;



## 4. Оптические свойства материалов

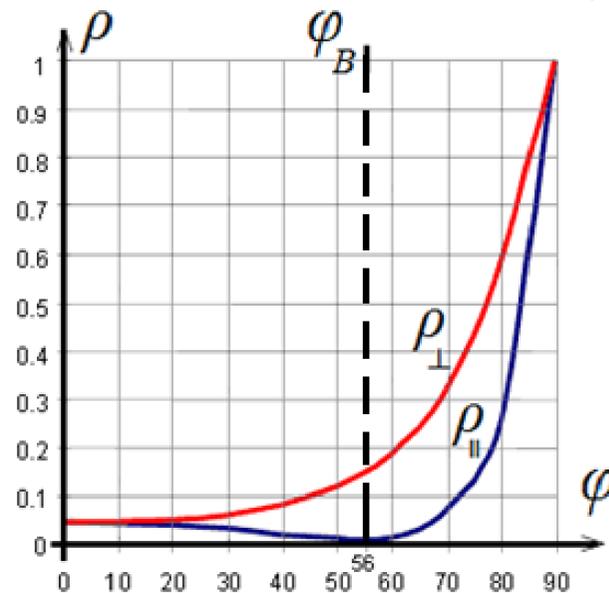
### ○ Отражение и преломление

взаимодействие с плоскими оптическими неоднородностями размером  $\gg \lambda$



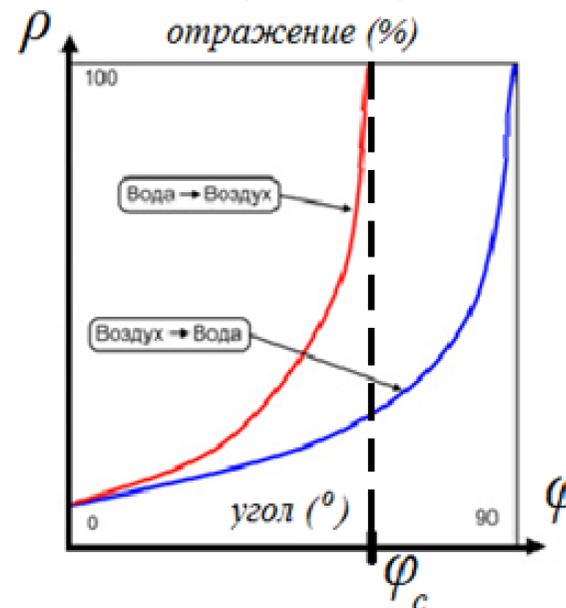
$$n_1 \sin \varphi = n_2 \sin \varphi'$$

закон Снеллиуса



$$\varphi_B = \arctg(n_2/n_1)$$

угол Брюстера



$$\varphi_c = \arcsin(n_2/n_1)$$

критический угол

$$R_{\perp} = 1 - R_{\parallel} = \frac{\sin^2(\varphi - \varphi')}{\sin^2(\varphi + \varphi')}$$

формулы Френеля

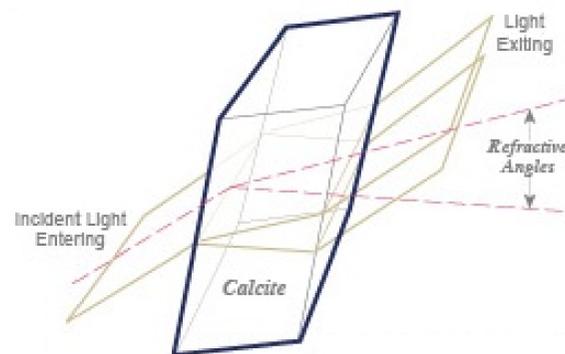
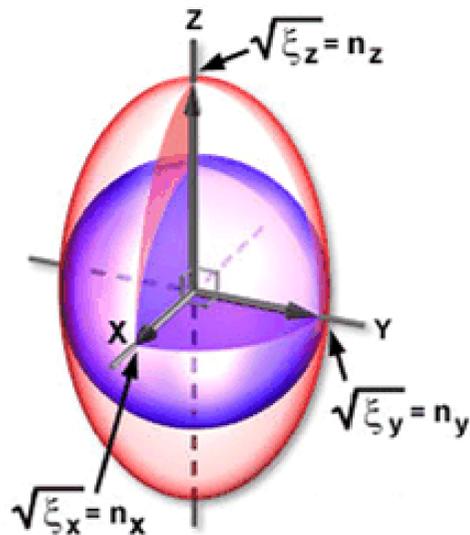
$$R_{\parallel} = 1 - R_{\perp} = \frac{\operatorname{tg}^2(\varphi - \varphi')}{\operatorname{tg}^2(\varphi + \varphi')}$$

## 4. Оптические свойства материалов

### ○ Оптическая анизотропия

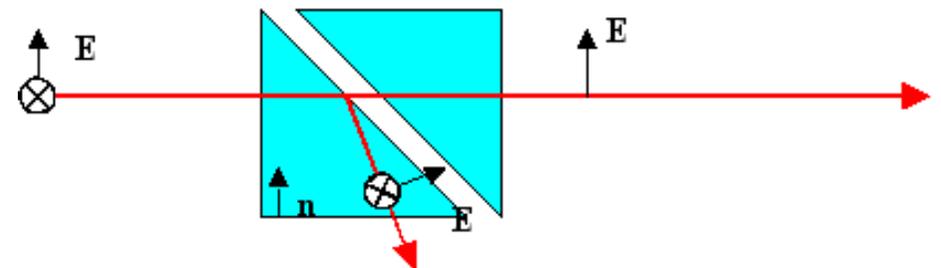


зависимость оптических свойств ( $n$  – показателя преломления,  $\alpha$  - показателя поглощения) материалов от направления распространения света и от поляризации, которая бывает естественной и индуцированной;



### ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЕ

поляризатор призма Глана



## 4. Оптические свойства материалов

### ○ Выводы

---

материалы применяемые в фотонике обладают различным набором свойств, которые проявляются при распространении света в материалах в виде зависимости показателей преломления и поглощения от направления волнового вектора, поляризации, а также внешнего воздействия;

на их основе возможно создание фотонных структур для управления оптическим излучением – направлением распространения, волновым фронтом, интенсивностью, поляризацией, спектральным составом;

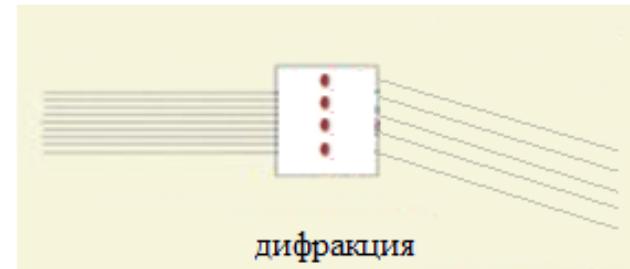
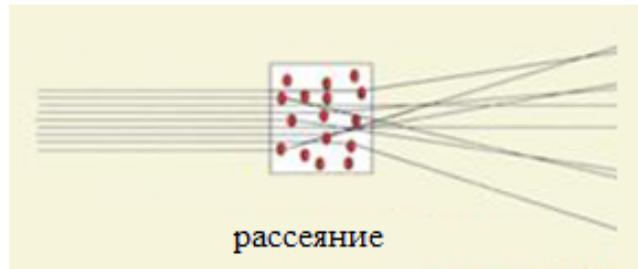
оптические фильтры, поглотители, поляризаторы и анализаторы поляризации и другие устройства

## 5. Фотонные структуры

### ○ Понятие

---

распространение света в упорядоченных структурах с модулированными оптическими параметрами, размерами сравнимыми с длиной волны – фотонных структурах – значительно отличается от распространения света в средах с неупорядоченными оптическими неоднородностями

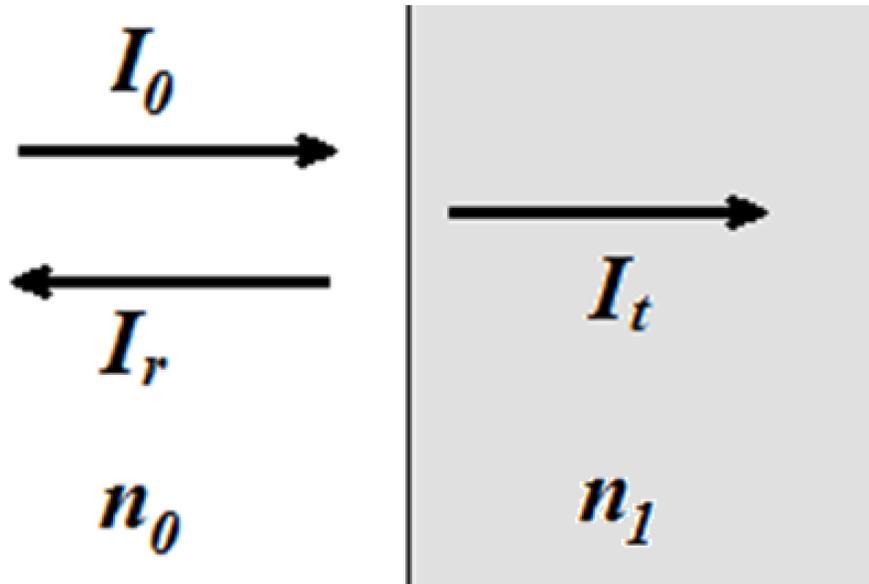


модулируемым параметром может быть

показатель преломления  $n$  или показатель поглощения  $\alpha$

## 5. Фотонные структуры

### ○ Нормальное падение на границу раздела двух сред



$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad T = \frac{I_t}{I_0}$$

$$R = 1 - T$$

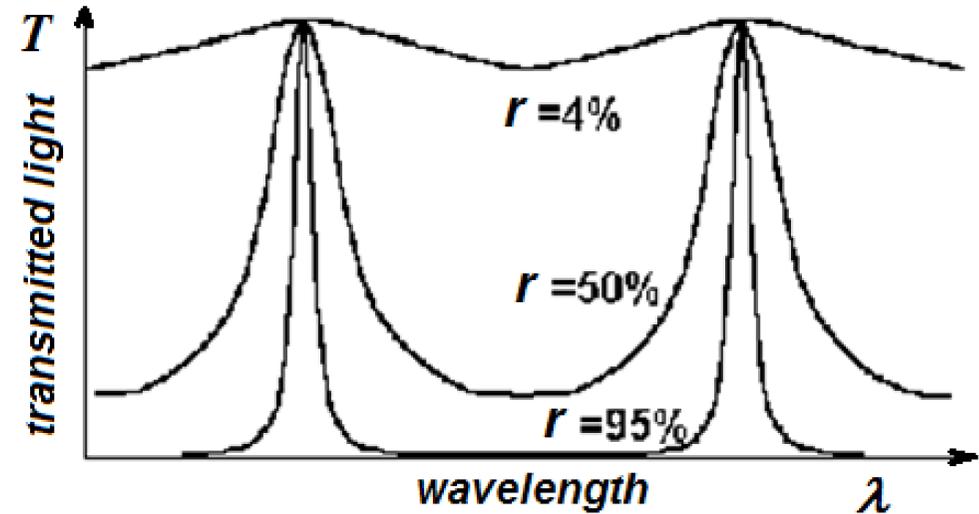
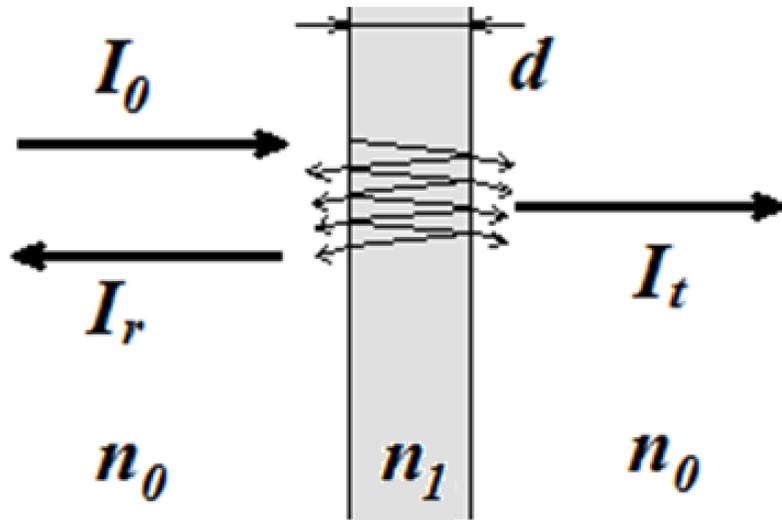
в соответствии с формулами Френеля коэффициент отражения  $R$  и прохождения  $T$  светового потока равны

$$R = 1 - T = \left( \frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \right)^2$$

в случае отражения от поверхности стекла в воздухе (стекло  $n_1=1,5$ , воздух  $n_0=1$ ) получаем отражение составляет  $R=4\%$ , а прохождения  $T=96\%$ .

## 5. Фотонные структуры

### ○ Тонкая пленка – интерферометр Фабри-Перо



Характерный размер тонкой пленки  $d \sim \lambda$  длины волны, коэффициент отражения от границ пленки  $r$ , изменение фазы при однократном прохождении пленки  $\delta$  и скачек фазы при отражении от оптически более плотной среды  $\delta_0$ . Пропускание объясняется многолучевой интерференции при отражении внутри пленки.

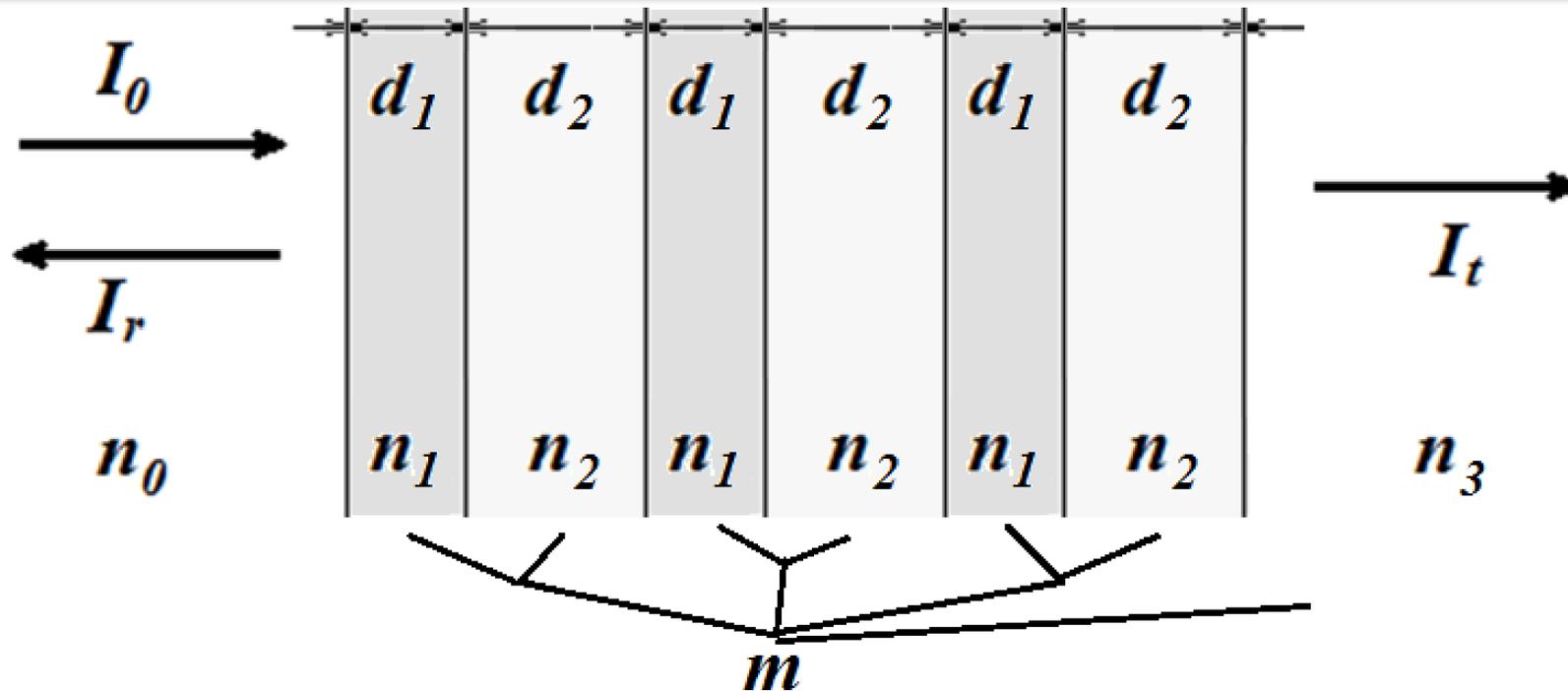
$$T = 1 - R = \frac{(1-r)^2}{(1-r)^2 + 4r \sin^2 \delta/2}$$

$$\delta = 4\pi \left( n_1 d / \lambda \right) + 2\delta_0$$

$$r = \left( \frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \right)^2$$

## 5. Фотонные структуры

### ○ Интерференционное зеркало



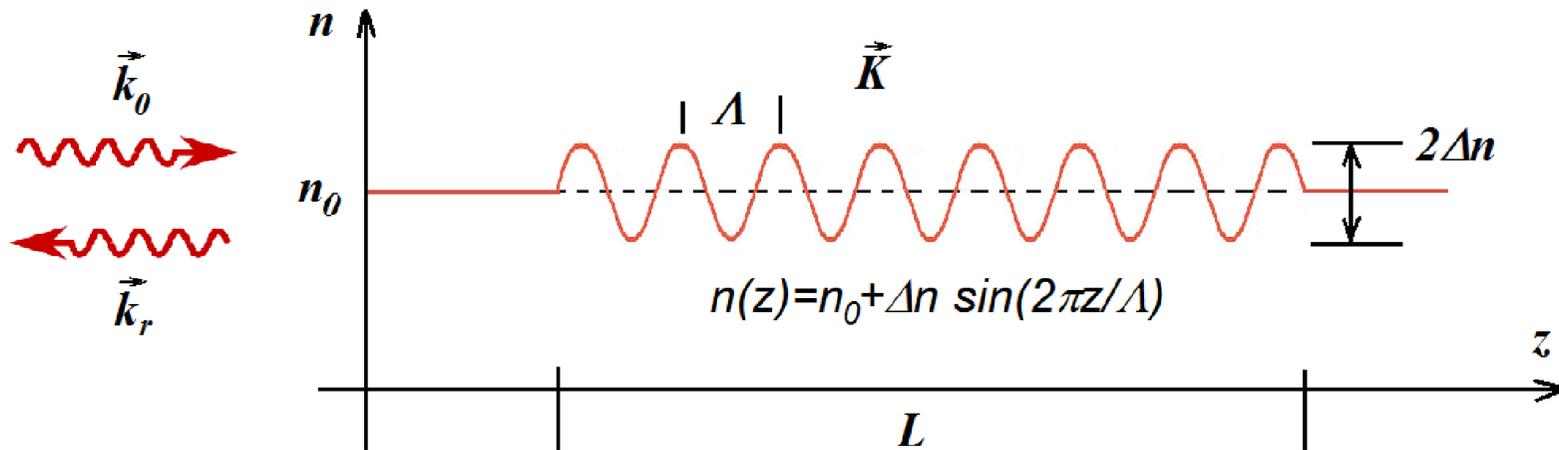
многослойное покрытие в виде пленок с чередующимися показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$  толщиной  $d_1$  и  $d_2$  общим числом пар  $m$  на подложке с  $n_3$  в среде  $n_0$ , то отражение от системы в случае  $d_1=d_2=\lambda/2$ :

$$R = \left[ \frac{1 - (n_3/n_0)(n_1/n_2)^{2m}}{1 + (n_3/n_0)(n_1/n_2)^{2m}} \right]^2$$

при  $m \gg 1$  коэффициент отражения  $R \rightarrow 100\%$

## 5. Фотонные структуры

### ○ Решетка Брэгга

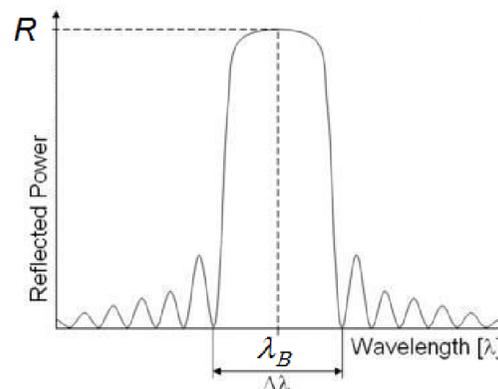


пространственно периодическая оптическая структура с амплитудой  $\Delta n$  показателя преломления в оптической среде с  $n_0$ :  $\Delta n/n_0 = 10^{-3} \div 10^{-5}$ ;

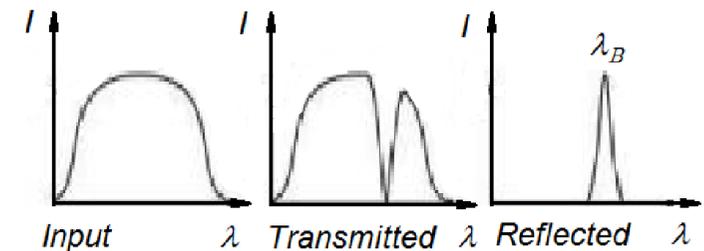
в данной структуре  $k_0$  и  $k_r$  – волновой вектор падающей волны и отраженной волны,  $\lambda_B = 2\Lambda n_0$  – брэгговская длина волны решетки,  $\Lambda$  и  $K = 2\pi/\Lambda$  – постоянная и волной вектор решетки;

$$n(z) = n_0 + \Delta n \sin(2\pi z/\Lambda)$$

$$\vec{k}_0 - \vec{K} = \vec{k}_r \quad R(K - k_0 + k_r, L)$$

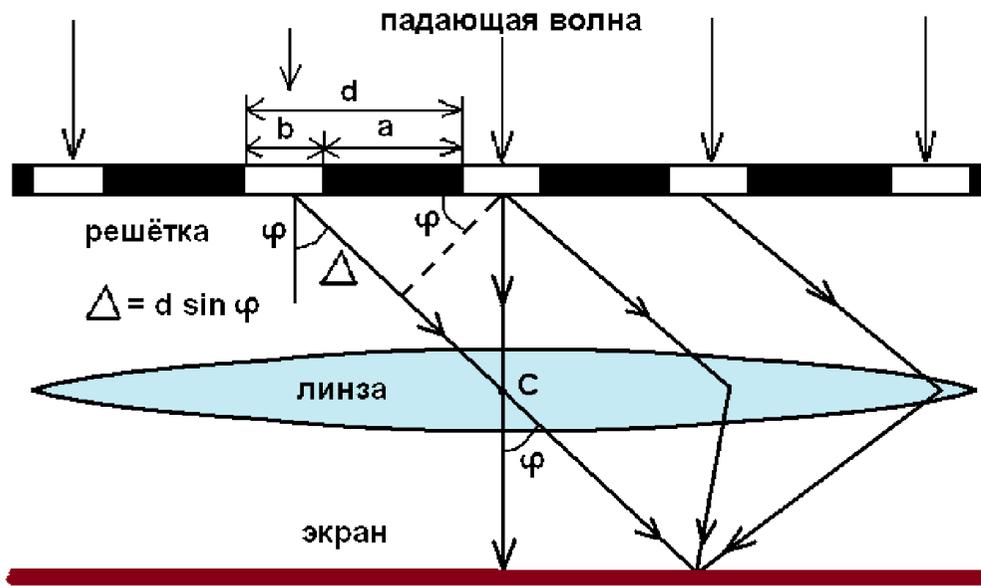


Spectral Response



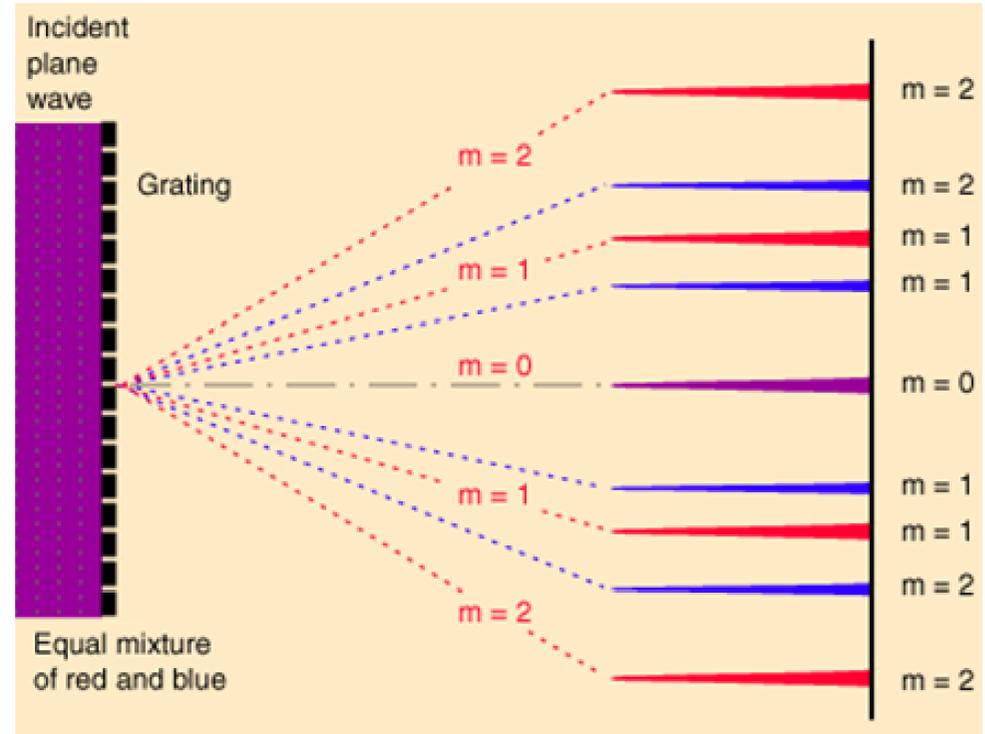
## 5. Фотонные структуры

### ○ Дифракционная решетка



$$d \sin \phi = m \lambda$$

$d$  - постоянная решетки  
 $\phi$  - угол дифракции  
 $m$  - порядок дифракции



распределение интенсивности света на экране

$$I(\delta) = I_{\max} \left( \frac{\sin^2(N\delta/2)}{\sin^2(\delta/2)} \right)^2$$

$k$  – волновое число падающего света ( $=2\pi/\lambda$ )

$N$  – число штрихов на единицу длины (шт/мм)

$$\delta = kd \sin \phi$$

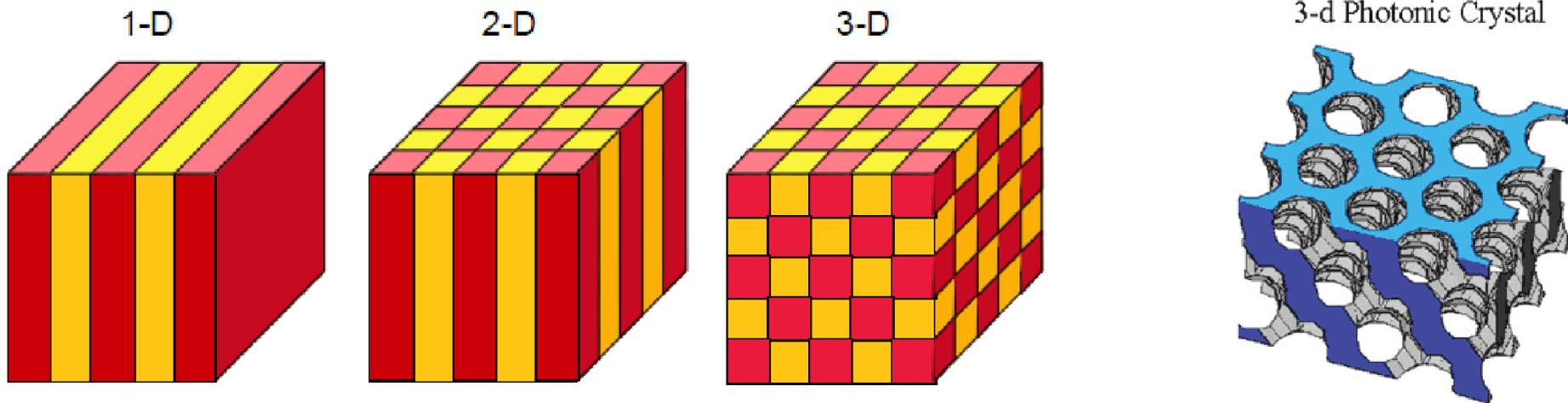
$$d \sin \phi_m = m \lambda$$

## 5. Фотонные структуры

### ○ Фотонные кристаллы (photonic crystals)

---

оптические материалы, в которых показатель преломления периодически изменяется в одном, двух или во всех направления пространства.



фотонные запрещенные зоны (photonic band gap, PBG), в которых фотоны определенных энергий и импульсов существовать не могут;

синтезируются 3D PBG кремневые структуры в области порядка  $1,5 \mu\text{m}$ ;

1D – дифракционная решетка, интерференционные зеркала и др.

2D – микроструктурированные (дырчатые) волокна

## 5. Фотонные структуры

### ○ Выводы

---

упорядоченное периодическое изменение показателей преломления и поглощения в оптических материалах позволяют создать фотонные структуры со свойствами характерными для электронов в обычных кристаллах – фотонные кристаллы, в которых существование фотонов определяется параметрами упорядочения как электронов в обычных кристаллах;

фотонные кристаллы

позволяют осуществить переход от электронных технологий к фотонным технологиям в создании вычислительных систем;

создать эффективные системы управления и преобразования оптического излучения в широких областях длин волн, энергий;

## 6. Оптические направляющие

### ○ Понятие

---

передача энергии из одной точки пространства в другую является важной задачей для систем связи, для функционирования устройств энергией, переход от электронных систем к фотонным системам передачи обеспечивает ряд преимуществ:

эффективность;

низкие потери;

помехозащищенность;

высокая плотность передачи;

оптические направляющие систем передачи можно разделить на два вида

открытые (лазерные) системы;

закрытые (световодные) системы;

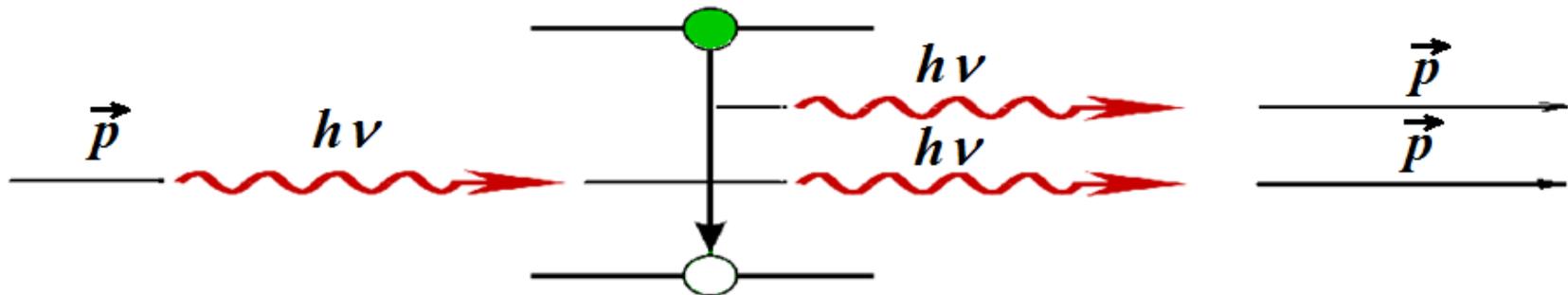
## 6. Оптические направляющие

### ○ Лазерные направляющие системы



открытые направляющие систем передачи строятся на основе лазеров, что определяется высокой направленностью лазерного излучения:

лазерное излучение генерируется в результате вынужденных переходов электронов под действием других фотонов – вторичные фотоны имеют параметры совпадающие с исходным фотоном, в том числе, и направление импульсов



расхождение  $\theta$  лазерного излучения определяется апертурой резонатора лазера ( $D$ , диаметром луча лазера)

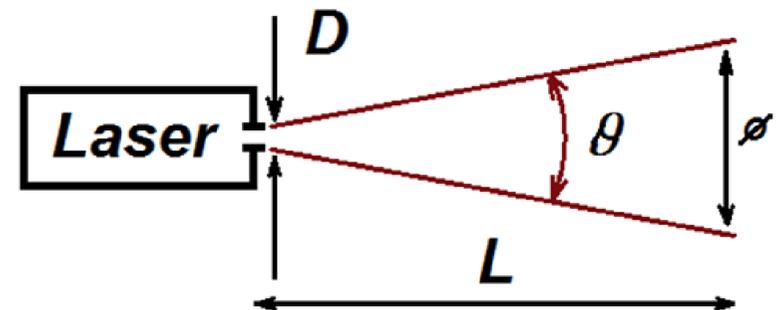
$$\varnothing \approx L\theta = \lambda L/D$$

например,

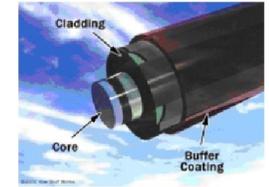
для  $\lambda=0,5$  мкм и  $D=5$  мм на  $L=10$  км диаметр луча составит  $\varnothing=1$  м

$$I \sim (\lambda L)^{-2}$$

$$\theta \approx \lambda/D$$



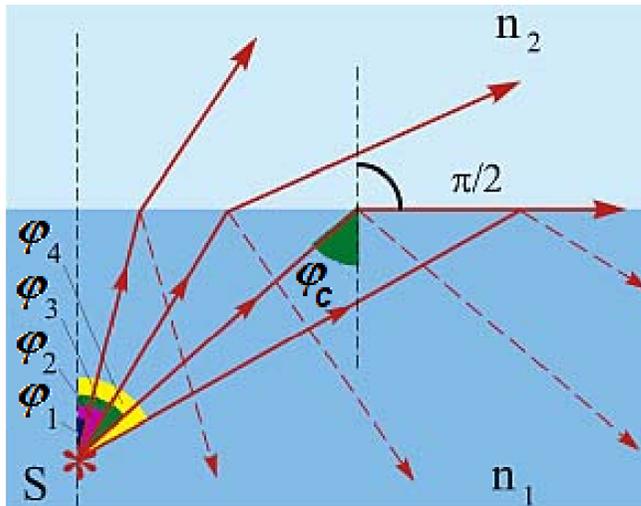
## 6. Оптические направляющие



### ○ Диэлектрические волноводы (световоды)

ограничение распространения света внутри диэлектрического волновода, канализирование света в котором связана полным внутренним отражением на границах волновода;

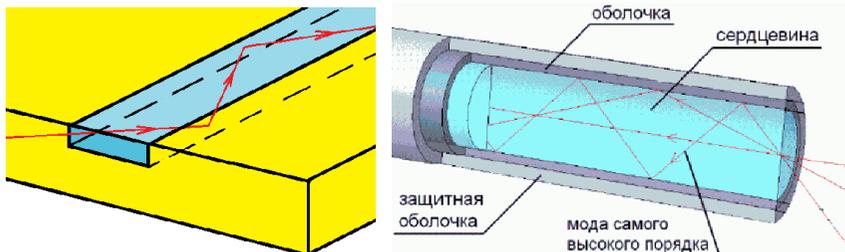
полное внутреннее отражение – явление связанное с отражением света от оптически более плотных сред ( $n_1 > n_2$ ) при углах больших критического  $\varphi > \varphi_c$



$$\varphi_c = \arcsin(n_2/n_1); \quad n_1 > n_2$$

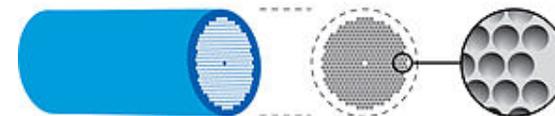
различают следующие типы волноводов

- планарные с прямоугольным поперечным сечением, используемые в интегрально-оптических устройствах;
- волоконные волноводы с цилиндрическим сечением, используемые в волоконной технике



## 6. Оптические направляющие

### ○ Микроструктурированные волноводы и волокна



фотонные кристаллы, вытянутые оптические структуры 2D типа, имеющие малое поперечное сечение с периодическим показателем преломления и большую длину, обладающие гибкой конструкцией и предназначенные для передачи, преобразования световой энергии:

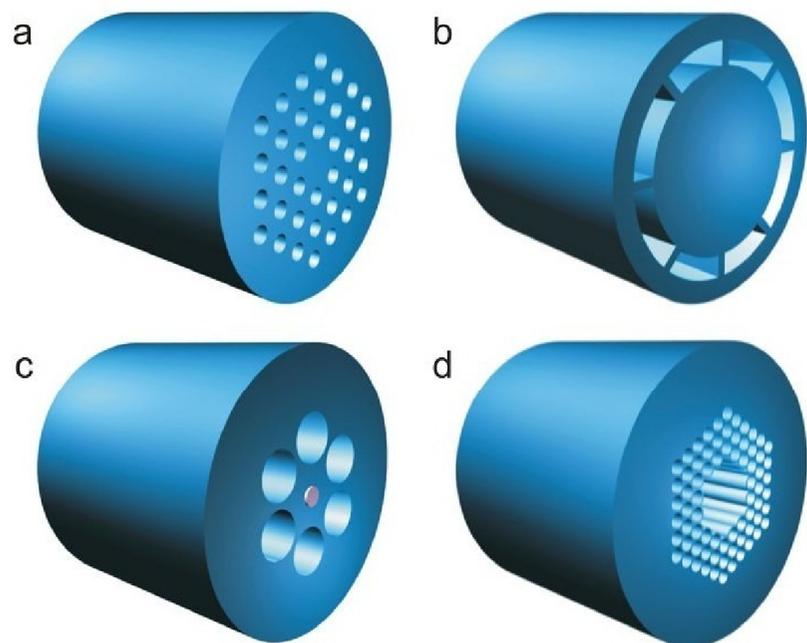
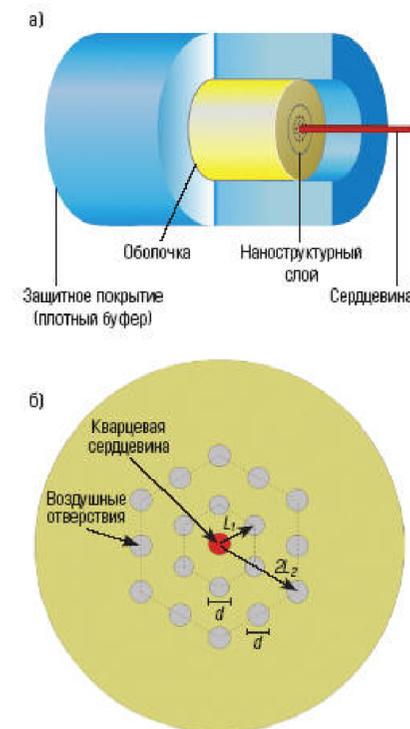


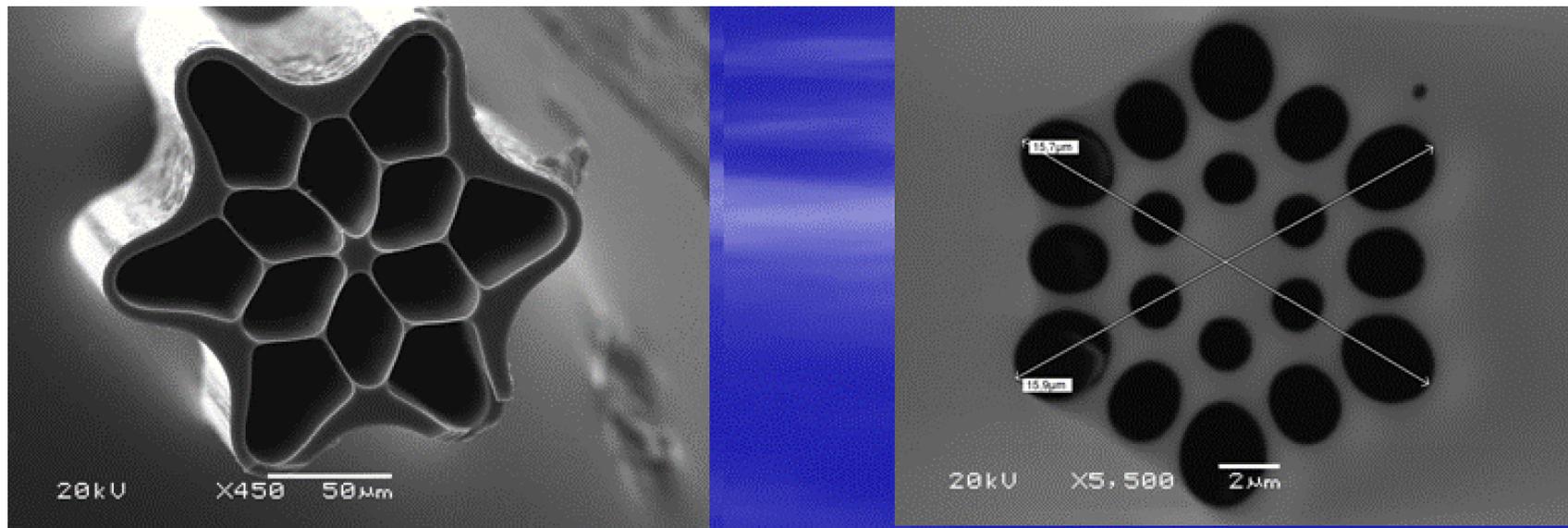
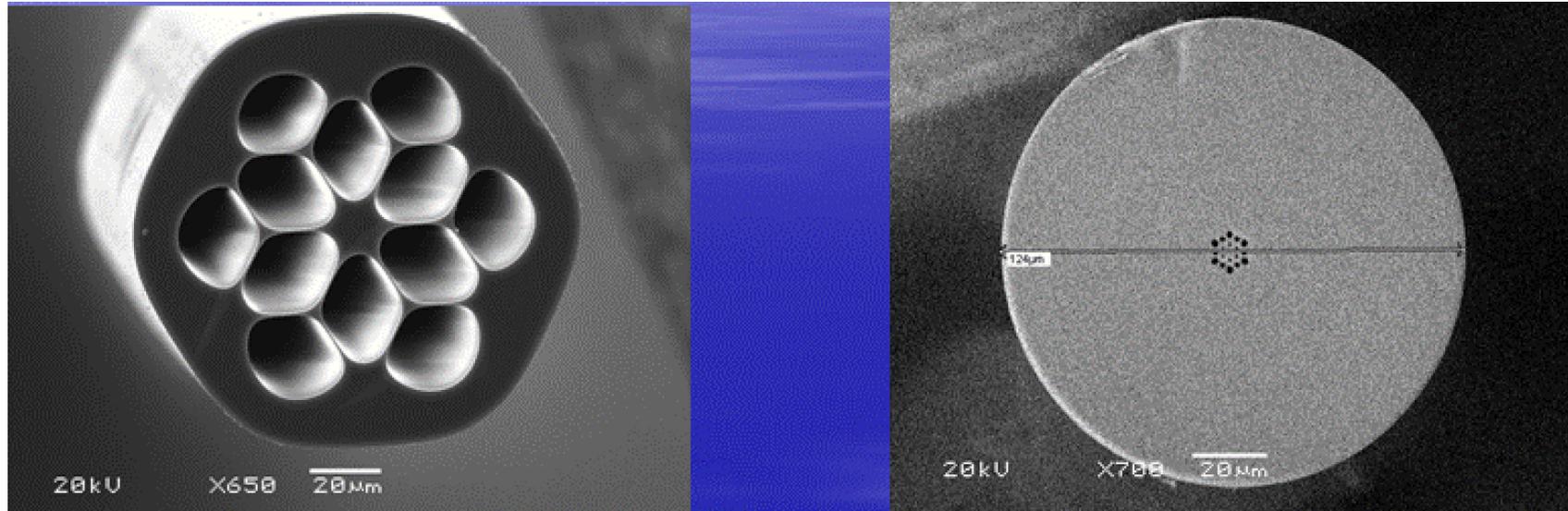
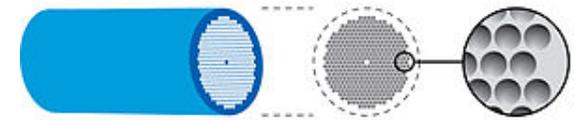
Иллюстрация различных типов полостных волокон. (a) Одномодовое полостное волокно, где цилиндрические воздушные полости размещены гексагонально симметрично и центральная воздушная полость отсутствует. (b) Многомодовое волокно использует в качестве внешнего слоя кольцо из воздушных областей. (c) Активное волокно создается с использованием элементов из допированного стекла. Формированное второе внешнее слоя из воздушных полостей позволяет получить волоконный лазер. (d) Полое волокно с фотонным кристаллом с запрещенной зоной.



каналлирование света связано с невозможностью распространения определенных поперечных составляющих мод;

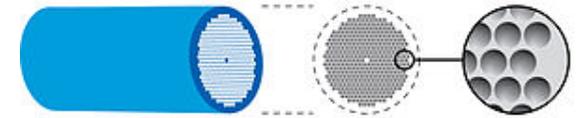
## 6. Оптические направляющие

### ○ Микроструктурированные волноводы и волокна



## 6. Оптические направляющие

### ○ **Микроструктурированные волноводы и волокна**



микроструктурированные (дырчатые, фотонно-кристаллические) волоконные световоды рассматриваются сегодня в качестве перспективных оптических элементов для применения в лазерной технике в качестве активных сред, а также для передачи и нелинейно-оптического преобразования мощных световых потоков с заданным распределением светового излучения в поперечном сечении;

возможности микроструктурированных световодов определяются такими отличительными особенностями как существование только основной моды в неограниченном спектральном диапазоне, возможность смещения длины волны нулевой дисперсии в видимую часть спектра, достижение одномодового режима распространения излучения в сердцевинах большого (более 10 мкм) диаметра;

## 6. Оптические направляющие

### ○ Выводы

---

оптические направляющие

представляются в виде

лазерного излучения с малой расходимостью в свободном пространстве

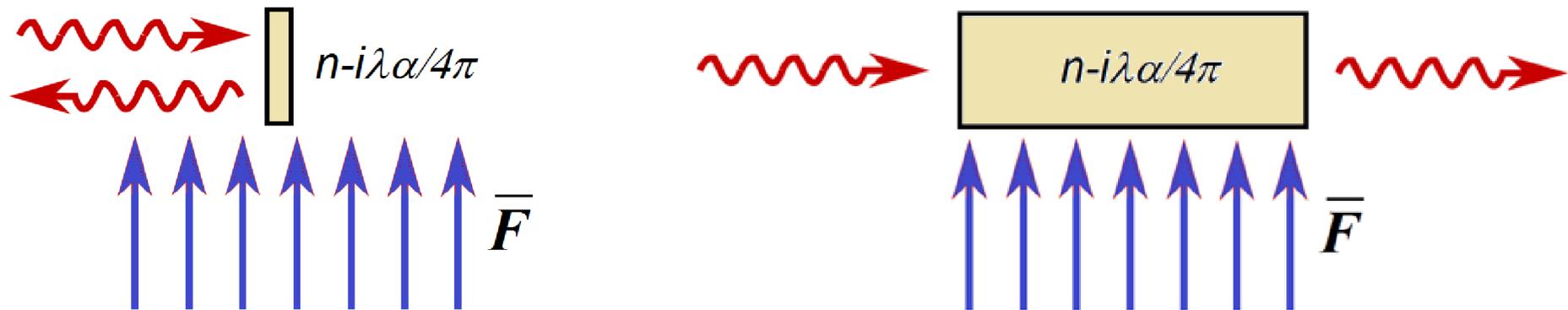
оптических волноводов с малым поглощением в оптических волокнах, планарных волноводов, микроструктурированных волокон

находят широкое применение в системах дальней связи, таких как лазерная связь, волоконно-оптические линии связи и других системах, их применение в закрытых линиях связи полностью вытесняет медные линии к настоящему времени на длинах более 1 км, а на меньших расстояниях в ближайшем будущем;

находят использование в устройствах преобразования параметров оптического излучения – лазеры, измерительные системы и т.д.

## 7. Взаимодействие света с веществом

### ○ Понятие



внешнее воздействие в форме векторного поля  $F$  изменяют параметры оптического материала, при взаимодействии с которым свет изменяет свои параметры либо при отражении от материала либо при прохождении от материала;

Воздействие	Тип эффекта по полю	Эффект	Открытие
Механическое давление	Линейный	Фотоупругости	Т.И. Зеебек (1813), Д. Брюстер (1815)
Электрическое поле	Линейный	Поккельса	Ф.К. Поккельс (1894)
	Квадратичный	Керра	Д. Керр (1875)
Магнитное поле	Расщепление	Зеемана	П. Зееман (1896)
	Линейный	Фарадея	М. Фарадей (1846)
	Квадратичный	Коттон-Мутона	Э. Коттон, А. Мутон (1907)

## 7. Взаимодействие света с веществом

### ○ Поляризационные оптические эффекты

---

одним из основных результатов воздействия  $F$  является наведенная анизотропия (тензора) показателя преломления ( $n$ ) и поглощения ( $\alpha$ ):

$$\hat{n}_x = \hat{n}_0 \vec{F} \quad \hat{\alpha}_x = \hat{\alpha}_0 \vec{F}$$

т.е. при внешнем воздействии изменяются анизотропные свойства материала:

- для материалов не обладающих оптической анизотропией, она появляется;
- для анизотропных материалов, она изменяется;

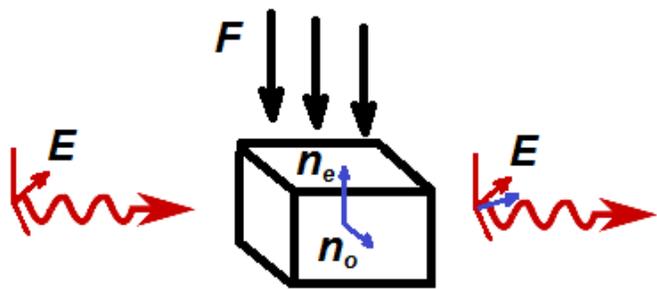
проявление эффекта зависит от взаимной ориентации физического поля, волнового вектора внешнего оптического излучения и тензора показателя преломления ( $n$ ) и поглощения ( $\alpha$ )

различают пьзооптический, электрооптический и магнитооптический эффекты

## 7. Взаимодействие света с веществом

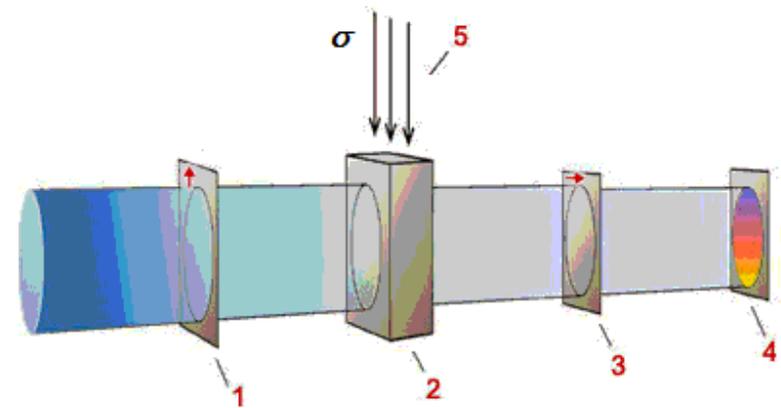
### ○ Пьезооптические (упругооптические) эффекты

являются проявлением фотоупругих свойств оптических материалов  
фотоупругость – изменение тензора показателя преломления ( $n_i$ ) вещества под действием упругих механических напряжений ( $\sigma_j$ ) и описываемый пьезооптическими коэффициентами  $p_{ij}$  :



$$\Delta \left( \frac{1}{n^2} \right)_{ij} = \sum_k p_{ijk} \sigma_k$$

$$\Delta n = -\frac{1}{2} n^3 p_{eff} \sigma$$



эксперимент:

световой поток проходит через поляризатора (1) и скрещенный с ним анализатор (3), между которыми размещен фотоупругий стеклянный куб (2) размером порядка сантиметра: на экране (4) наблюдается темное поле, в случае приложения механического давления (5) порядка 100 кг к грани куба на экране появляется разноцветная засветка, обусловленная фотоупругой оптической анизотропией образца.

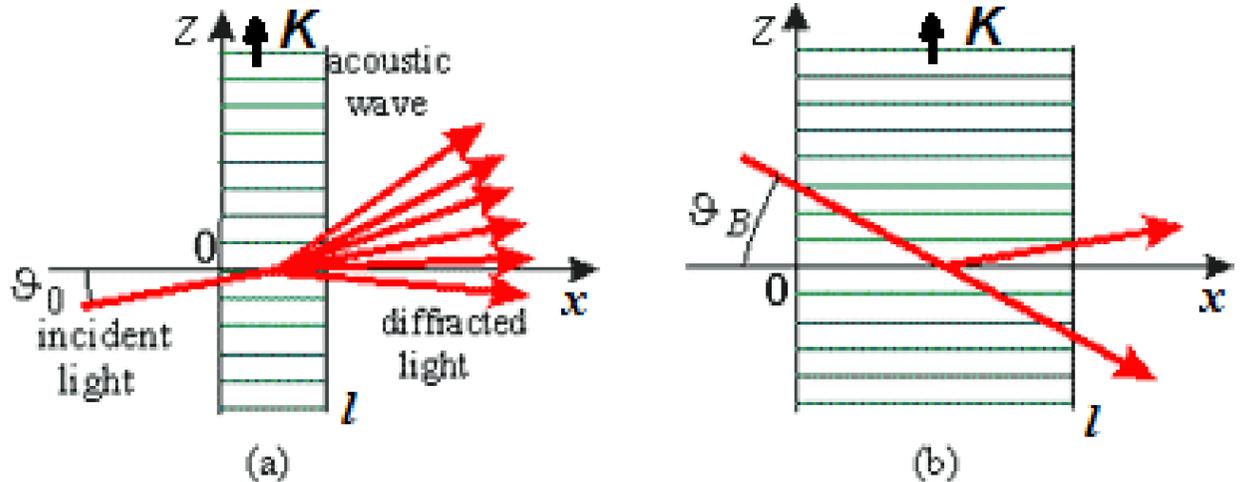
## 7. Взаимодействие света с веществом

### ○ Акустооптические эффекты

модуляция показателя преломления акустической (упругой) волной в фотоупругих оптических материалах, приводящее к дифракции световой волны на акустической (упругой) волне вызывающее изменение направления распространения света

$$n(z, t) = n_0 + \Delta n \cos(2\pi ft - Kz)$$

$$\Delta n = -\frac{1}{2} n^3 p_{eff} \sigma$$



Diffraction of Raman-Nath (a) and Bragg (b)

дифракция двух типов

Рамана-Ната соответствует относительно низким акустическим частотам  $f$  и малой длине акустооптического взаимодействия  $l$  (обычно  $f < 10$  МГц и  $l < 1$  см);

Брэгга наблюдается на высоких частотах ультразвука  $f > 10$  МГц;

## 7. Взаимодействие света с веществом

### ○ Электрооптические эффекты

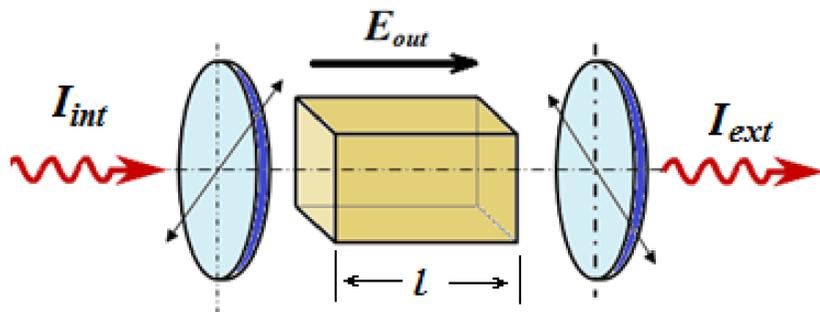
проявляются при приложении электрического поля  $E$  к образцу, которое вызывает изменение показателя преломления в нем по разным направлениям так, что общее изменение

$$\Delta n = aE + bE^2 \quad \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_{ij} = \sum_k r_{ijk} E_k \quad \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_{ij} = \sum_{k,l} R_{ijkl} E_k E_l$$

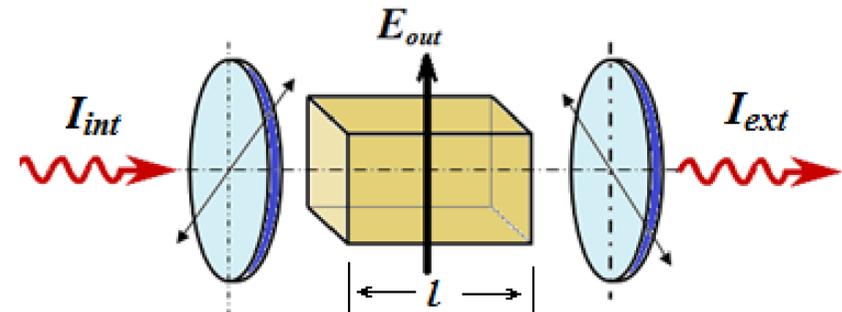
где коэффициент  $a$  отвечает за эффект Поккельса и  $b$  отвечает за эффект Керра  
 $r_{ijk}$ ,  $R_{ijkl}$  – линейные (Поккельса) и квадратичные (Керра) электрооптические коэффициенты

$$I_{ext} = I_{int} \sin^2(\Delta\varphi) \quad \Delta\varphi = (2\pi/\lambda)l(n_e - n_o)$$

величина фазового сдвига  $\Delta\varphi$  в следствие электрооптического эффекта



$$(n_e - n_o)_P = AE_{out} \quad (n_e - n_o)_K = nBE_{out}^2$$



$A$  – постоянные Поккельса  
 $B$  – постоянная Керра

## 7. Взаимодействие света с веществом

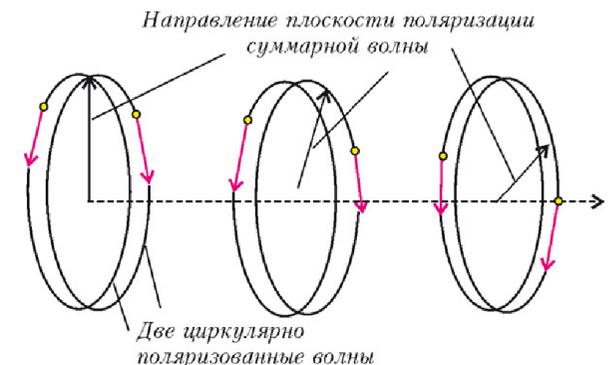
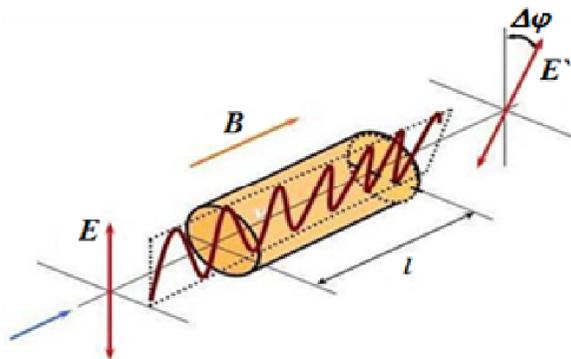
### ○ Магнитооптические эффекты

поворот плоскости поляризации света во внешнем продольном магнитном поле – линейный магнитооптический эффект Фарадея

линейно-поляризованное излучение представляется как суперпозиция двух циркулярно право- и лево- поляризованных волн, имеющие показатели преломления  $n_+$  и  $n_-$ , в изотропных материалах  $n_+ = n_-$ , а в присутствии магнитной индукции  $B$  их значения становятся различными, что и приводит к повороту плоскости поляризации света.

$$\Delta\varphi = \left(\frac{\pi}{\lambda}\right)l(n_+ - n_-)$$

$$(n_+ - n_-)_F = VB\lambda/\pi$$



поворот плоскости поляризации во внешнем поперечном магнитном поле – квадратичный магнитооптический эффект Коттон-Мутона (магнитное поле перпендикулярно волновому вектору)

## 7. Взаимодействие света с веществом

### ○ Нелинейно-оптические эффекты

---

проявление нелинейной зависимости оптических параметров вещества  $n(E, H)$  и  $\alpha(E, H)$  от напряженности электромагнитного поля световой волны при превышении критических напряженностей

$$n(E) = n_L + n'E + n''E^2 + \dots \quad \alpha(E) = \alpha_L + \alpha'E + \alpha''E^2 + \dots$$

один из возможных откликов оптической среды на воздействие электромагнитной волны определяется поляризацией среды, которую можно разделить на линейную  $P_L$  и нелинейную  $P_{NL}$ , так что

$$P = P_L + P_{NL} \quad \vec{P}_L = \varepsilon_0 \hat{\chi}_E \vec{E} \quad \vec{P}_{NL} = \varepsilon_0 \left( \hat{\chi}_2 \vec{E} \vec{E} + \hat{\chi}_3 \vec{E} \vec{E} \vec{E} + \dots \right)$$

вследствие малости нелинейных восприимчивостей  $\chi_2, \chi_3 \dots$ , нелинейные эффекты начинают проявляться при высоких интенсивностях излучения, синхронизации процессов и других условиях

## 7. Взаимодействие света с веществом

### ○ **Нелинейно-оптические эффекты**

---

Оптическое детектирование

Генерация оптических гармоник

Параметрическая генерация света

Самофокусировка света

Вынужденное рассеяние света

Многофотонные процессы (ионизация, фоторефракция)

Просветление среды

Эффект насыщения

Самокомпрессия световых импульсов и оптические солитоны

Обращение волнового фронта

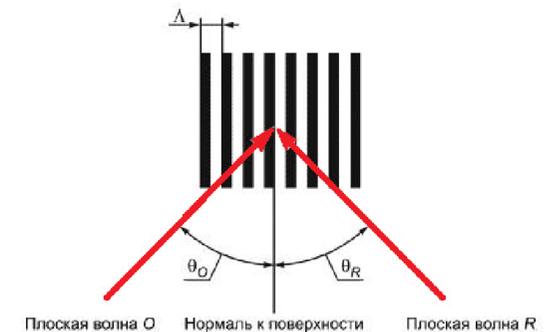
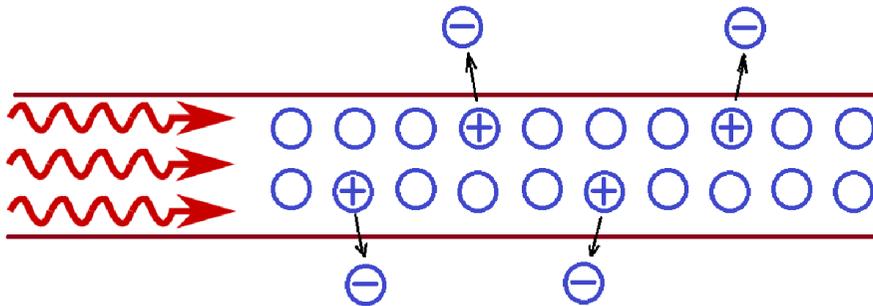
Эффекты оптических бистабильности и мультистабильности

## 7. Взаимодействие света с веществом

### ○ Фоторефракция

индуцированное лазерным излучением неоднородности показателя преломления в электрооптических кристаллах, таких как  $\text{Fe:LiNbO}_3$  и кристаллы со структурой силленита  $\text{Bi}_{12}\text{MO}_{20}$  ( $M=\text{Si, Ge, Ti}$ );

при прохождении лазерного излучения в освещенной части кристалла образуются свободные фотоэлектроны, которые мигрируют в неосвещенную часть кристалла (вследствие диффузии, дрейфа во внешних электрических полях, фотовольтаического эффекта), где захватываются ловушками и локализуются образуя неоднородное электрическое поле, вызывающее изменение показателя преломления;



применяется для создания дифракционных решеток, записи голограмм

## 7. Взаимодействие света с веществом

### ○ Выводы

---

управление оптическим излучением осуществляется путем внешнего воздействия на вещество, через которое проходит оптическое излучение

основные управляющие воздействия

электромагнитное поле – эффекты Поккельса, Керра, Фарадея и др.;

акустическое поле и поле упругих деформаций – эффекты фотоупругий, акустооптический и др.;

другие поля – радиационные, тепловые;

эффективность взаимодействие с оптическими материалами определяется

свойствами материалов – электрооптическими, магнитооптическими, фотоупругими, нелинейно-оптическими и другими параметрами;

структурой материала – оптическими неоднородностями материала, упорядоченностью оптических параметров и др.

## 8. Применения фотоники

### ○ Структура применений и развития фотонных технологий

---

основные применения фотонных технологий

транспорт

информации и энергии

измерение

измерительные датчики и системы

преобразование

генерация и преобразование света

отдельное значение для всех применений имеют волоконно-оптические технологии

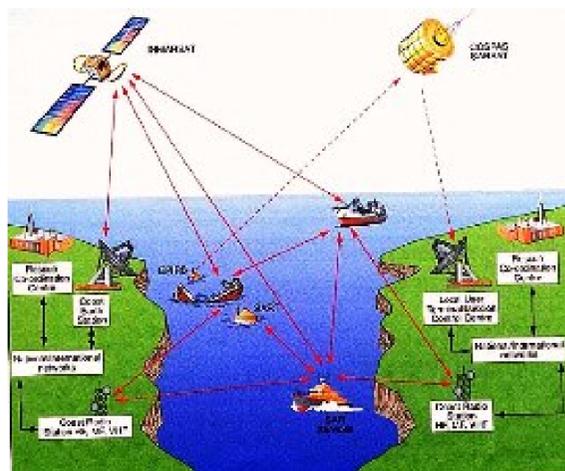
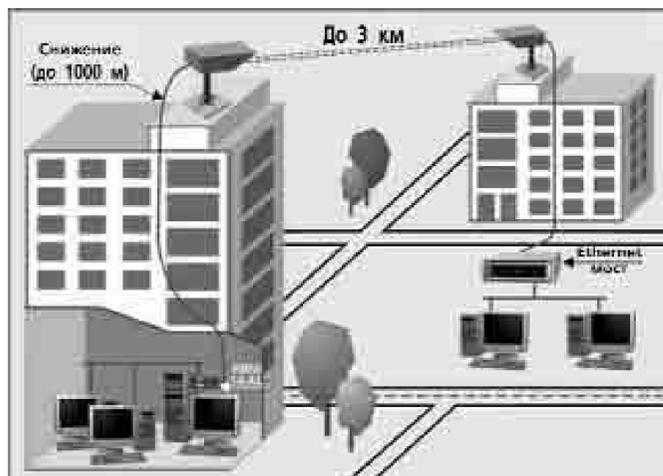
## 8. Применения фотоники

### ○ Фотонный транспорт энергии и информации

дальняя оптическая связь: технология FSO (Free Space Optics, атмосферная оптическая связь – АОЛС, АОЛП, беспроводный оптический канал связи – БОКС) – способ передачи информации оптическим излучением через свободное пространство (атмосферу, космическое пространство) путем модуляции излучения в инфракрасном/видимом диапазоне длин волн и его последующим детектированием оптическим фотоприемным устройством, обладающее преимуществами:

не требует лицензирования и оперативно устанавливаются за 10-15 мин при малых затратах по сравнению с волоконно-оптической линией связи;

высокие скорости передачи до 10 Гбит/сек на дальностях от 100 м до 5 км в атмосфере и до 100000 км в открытом космосе;



## 8. Применения фотоники

### ○ Фотонный транспорт энергии и информации

---

ближняя оптическая связь:

Infrared Data Association (IrDA), ИК-порт, Инфракрасный порт — группа стандартов передачи данных с использованием инфракрасного диапазона световых волн в качестве среды передачи со скоростями более 4,0 Мбит/сек и на расстояния десятки метров.

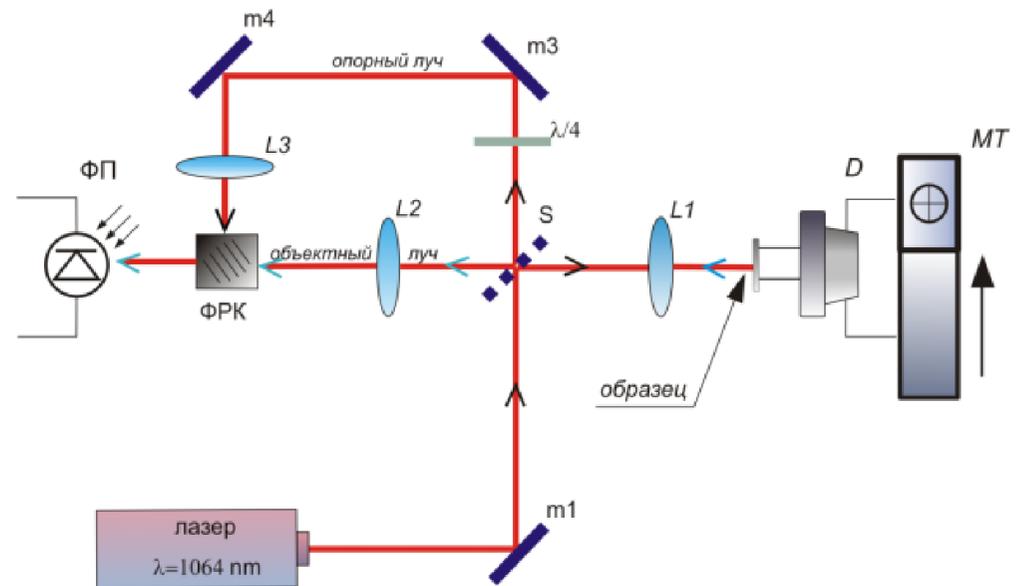
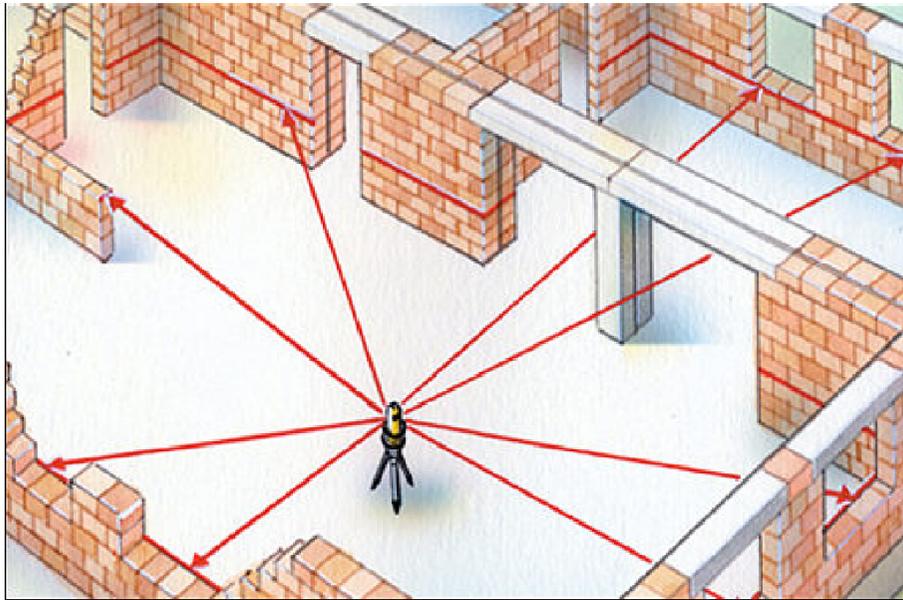
Visible Light Communication (VLC), Light Fidelity (Li-Fi) - ультра скоростной беспроводная технология связи через оптическое (видимое) излучение ламп освещения со скоростями до 10 Гбит/сек внутри помещения.



## 8. Применения фотоники

### ○ Оптические измерения

нивелиры, дальномеры, голографические измерения деформаций, пирометры и т.д.

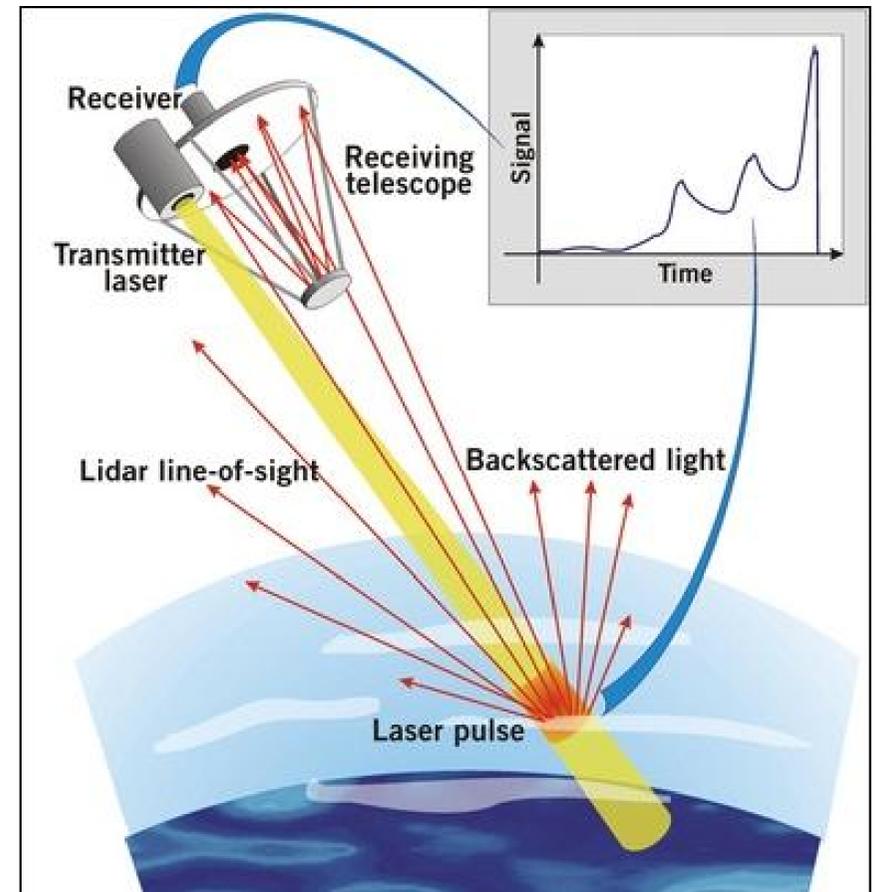
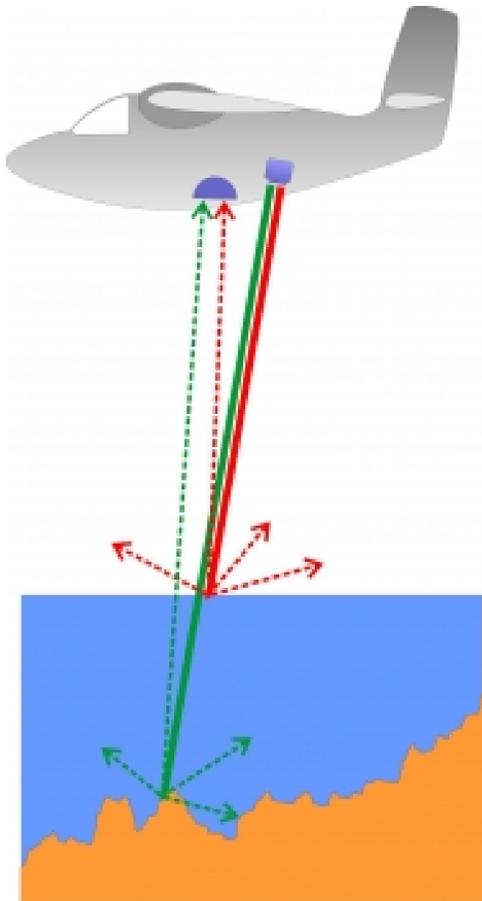


отличительная черта оптических измерений – высокая чувствительность, быстродействие, пространственное разрешение;

## 8. Применения фотоники

### ○ Оптические измерения

лидары – зондирование свободного пространства лазерным излучением и регистрация обратно рассеянного/отраженного излучения с целью определения параметров зондируемой среды



## 8. Применения фотоники

### ○ Выводы

---

уникальные возможности фотонных технологий находят широкое применение

- в технике передачи информации, энергии;
- в технике проведения измерений;
- в технологических устройствах;

преимущества фотоники связаны с особенностями фотонов как незаряженной, без массовой частицы и как волны электромагнитного поля с высокой частотой ( $10^{15}$  Гц), малой длиной волны ( $10^{-6}$  м) распространяющейся со скоростью света ( $3 \cdot 10^8$  м/с)

одно из наиболее важных достижений фотоники – волоконно-оптические технологии, которые позволяют эффективно реализовать все преимущества фотонике в технике передачи информации и измерения;

# Темы для обсуждения по лекциям 1-2

## «Фотонные технологии»

Волновое и квантовое описание света.

Материалы фотоники.

Генерация и регистрация света.

Оптические направляющие (световоды).

Взаимодействие света с веществом.

Основные применения фотоники.