

**Московский государственный университет  
имени М.В.Ломоносова**

# **СОВРЕМЕННЫЕ ЛАЗЕРЫ: НОВЫЕ ГРАНИ СВЕТА**

**Межфакультетский курс лекций**

**Морозов Вячеслав Борисович  
Оленин Андрей Николаевич**

**2020**

**Лекция 1. ВВЕДЕНИЕ В КУРС. УНИКАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА И  
ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

**Лекция 2. СВЕТОВЫЕ ВОЛНЫ И ПУЧКИ**

**Лекция 3. ИЗЛУЧЕНИЕ. ВЕЩЕСТВО. КВАНТЫ СВЕТА**

**Лекция 4. СОЗДАНИЕ ЛАЗЕРА. ОБЩАЯ СХЕМА УСТРОЙСТВА**

**Лекция 5. КАК НАКОПИТЬ СВЕТ? ЛАЗЕРНЫЙ РЕЗОНАТОР**

**Лекция 6. УСИЛЕНИЕ И ГЕНЕРАЦИЯ. ЛАЗЕРНЫЕ СРЕДЫ.**

**Лекция 7. НЕПРЕРЫВНАЯ И ИМПУЛЬСНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ. УЛЬТРАКОРОТКИЕ  
ИМПУЛЬСЫ СВЕТА**

**Лекция 8. ОПТОЭЛЕКТРОНИКА. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ**

**Лекция 9. ЛАЗЕРЫ В СИСТЕМАХ ЗАПИСИ, ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ  
ИНФОРМАЦИИ**

**Лекция 10. ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА. ВОЛОКОННЫЕ ЛАЗЕРЫ**

**Лекция 11. ЛАЗЕРЫ И ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ СВЯЗИ**

**Лекция 12. ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ**

**Лекция 13. ЛАЗЕРЫ В МЕДИЦИНЕ И БИОЛОГИИ**

**Лекция 14. ЛАЗЕРЫ В СИСТЕМАХ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ,  
ДАЛЬНОМЕТРИИ И НАВИГАЦИИ.**

**Лекция 15. ДРУГИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРОВ. УНИКАЛЬНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ  
СИСТЕМЫ**

# **СОВРЕМЕННЫЕ ЛАЗЕРЫ:** **новые грани света**

## **Лекция 1**

### **ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.**

Оптика и свет. Источники оптического излучения. Монохроматичность. Когерентность. Высокая интенсивность. Направленность. Сравнение лазеров с классическими источниками света. Лазеры и современная оптика. Фотоника

# Что мы знаем о Лазерах?



# Что мы знаем о Лазерах?

Яндекс

[Видео](#) [Картинки](#) [Новости](#) [Карты](#) [Маркет](#) [Переводчик](#) [Музыка](#) [ТВ онлайн](#) [ещё](#)

лазерный



Найти

Найдётся всё. Например, сколько недель в году

**Лазерный** принтер

**Лазерный** уровень

**Лазерный** дальномер

**Лазерный** гироскоп

**Лазерный** прицел

**Лазерный** нивелир

**Лазерный** гравер

**Лазерный** маркер

**Лазерный** доктор

**Лазерный** скальпель

**Лазерный** пилинг

**Лазерный** аппарат (?)

**Лазерный** звукозаписывающий аппарат

**Лазерный** интерферометр

**Лазерная** эпиляция

**Лазерная** хирургия

**Лазерная** коррекция зрения

**Лазерная** резка

**Лазерное** оружие

**Лазерное** шоу

**Лазерное** отбеливание

**Лазерное** отбеливание

**Лазерные** технологии

**Лазерный** шиномонтаж

**Лазерный** шлем для роста волос

.....бетоноукладчик

# Законы классической оптики

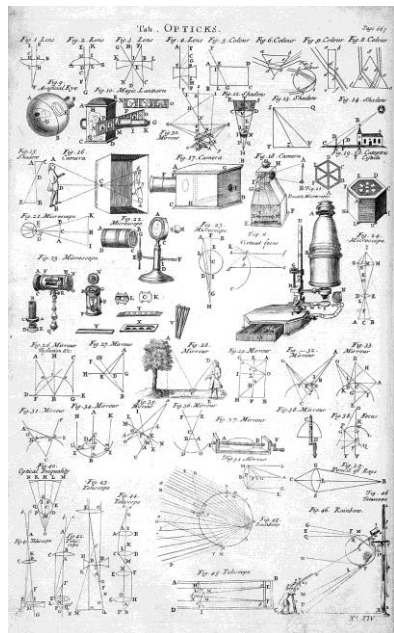


Таблица «Оптика» в  
Циклопедии 1728 г. (Англия)  
(Cyclopaedia or an Universal  
Dictionary of Arts and Sciences)

## Прямолинейное распространение света

### Отражение света:

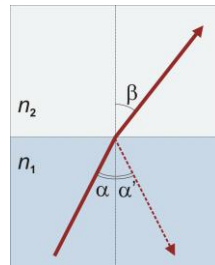
$$\alpha = \alpha'$$

### Преломление света

(закон Снеллиуса, 1621г.)

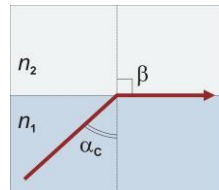
$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$$

Падающий, отраженный,  
преломленный пучки лежат  
в плоскости падения



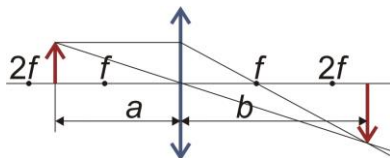
### Полное внутреннее отражение

$$\alpha_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$



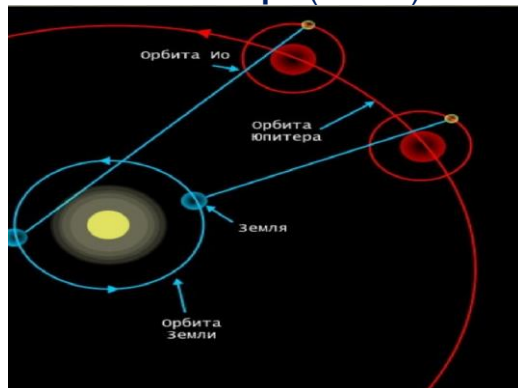
### Формула линзы

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}$$



# Скорость света

## Опыты Рёмера (1676г.)

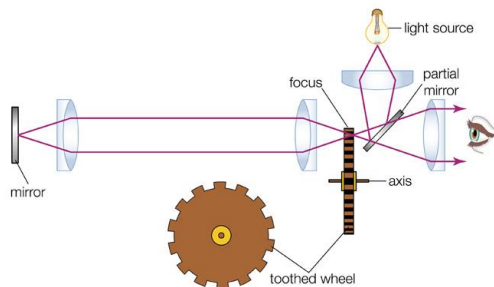


По затмениям спутников Юпитера оценивали точное время (по Гринвичу) и географическую долготу.

Рёмер обратил внимание, что в зависимости от расстояния от Земли до Юпитера частота затмений смещается относительно среднего значения. Он предположил, что из-за конечности скорости света. Сделанная оценка:

**227000 км/с**

## Опыты Физо (1849г.)



База измерений составляла 8,2 км. Зубчатое колесо имело 720 зубьев. Постепенно увеличивая скорость, добивались исчезновения изображения источника. Найденное тогда значение скорости:

**313000 км/с**

Фуко повторил измерения с базой около 20 м и 8-гранной призмой в качестве прерывателя:

**298000,5 км/с**

# Развитие представлений о природе света.

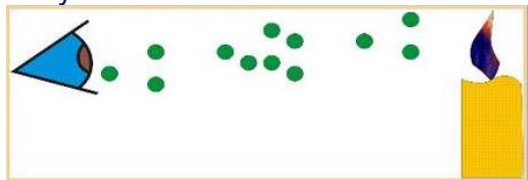
## Волна или частица?

Природа света оставалась предметом дискуссий вплоть до начала XIX века

**И.Ньютон**

«Оптика» («*Opticks or a treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light*») 1704 г.

Свет – поток частиц, «корпускул», испускаемых телами



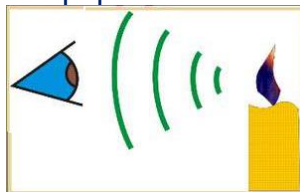
Прямолинейность распространения света, наличие резкой тени

«Справедливо, что я заключаю из моей теории о телесности света, но я делаю это безо всякой абсолютной определенности...»

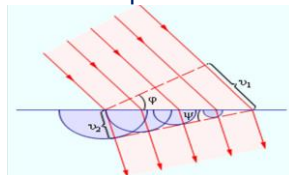
**Х.Гюйгенс**

«Трактат о свете», 1695 г.

Свет – волны, заполняющие мировой эфир



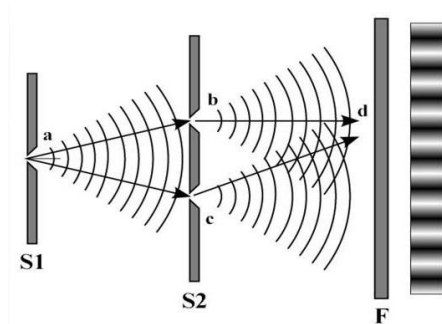
Перекрытие пучков света, размытость тени, огибание препятствий



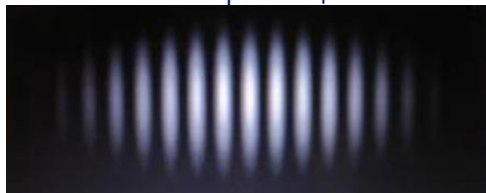


# XIX век: золотое время волновой оптики

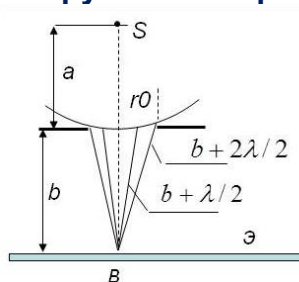
Опыты Г.Юнга(1803г.)



Если вместо отверстий щели



Опыты Френеля по дифракции на круглом отверстии (1816г.)



$$m = \frac{r_0^2}{\lambda} \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)$$

- число открытых зон Френеля

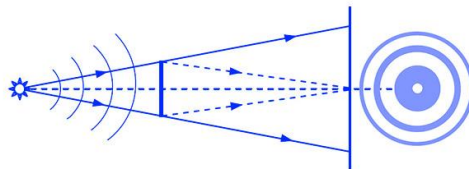
$m \gg 1$

$m \sim 1$

$m < 1$



Араго: светлое пятно (пятно Араго-Пуассона) в центре тени (наблюдалось Делилем еще в 1713г., но осталось необъясненным)



# Электромагнитная природа света

Открытия в области электричества и магнетизма первой половины XIX века свидетельствовали о глубокой связи этих явлений

**Дж.К.Максвелл**

«Трактат об электричестве и магнетизме» (1873г.)

**Доказательство электромагнитной теории Максвелла**

**Электромагнитная природа света**

**Открытие внешнего фотоэффекта**

**Г.Х.Эрстед** – влияние тока на магнит (1820г.)

**Ж.-Б.Био – Ф.Савар** – выражение для магнитной индукции (1820г.)

**А.М.Ампер** – влияние магнитного поля на электрический ток, взаимодействие проводников с током (1822-1826гг.)

**М.Фарадей** – закон электромагнитной индукции (1831г.), гипотеза об э.-м. поле

Обобщение его теоретических работ с 1855г.

Система уравнений для электрического и магнитного полей, описывающая их взаимное влияние и связь со средой.

**Г.Р.Герц** – обнаружение электромагнитных волн, измерение скорости (равна скорости света, но длины волн гораздо больше), исследование отражения, преломления, поляризации, создание радиопередатчика, искрового радиоприемника (1885-1889гг.)

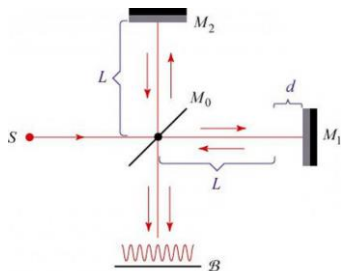
С утверждением электромагнитной теории свет был идентифицирован как электромагнитные волны

**Г.Р.Герц** – (1886-1887гг.)

# От волн к квантам

Абсолютное главенство волновой теории нарушено, не обнаружен мировой эфир

Опыты **А.Майкельсона-Э.У.Морли** (1881г.)



**Идея об излучении света порциями – световыми квантами**

**М.Планк** – получил и обосновал формулу, описывающую распределение энергии в спектре излучения абсолютно черного тела, ввел понятие кванта  **$h$**  (1900г.)

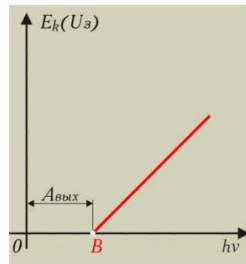
$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$



**Фотоэффект**

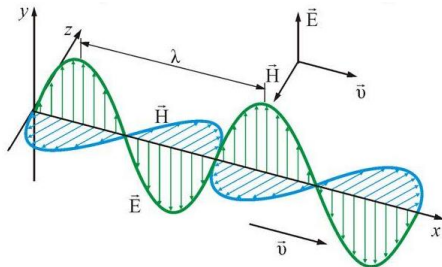
А.Эйнштейн – поглощение также происходит квантами

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv^2}{2}$$



# Корпускулярно-волновой дуализм

Свет – электромагнитная волна



Поперечная волна, векторы электрического и магнитного полей взаимно перпендикулярны

$$\nu = \frac{\nu}{c}, \quad \nu = \frac{c}{n}$$

Вектора электрического и магнитного полей равноправны. Фотохимическое, фотоэлектрическое и физиологическое

действие связаны в основном с  $\vec{E}$ .

Поэтому плоскость колебаний  $\vec{E}$  определяют как плоскость поляризации

Свет – поток фотонов

Не имеет массы покоя, электр. заряда

Энергия фотона  $\varepsilon = h\nu$

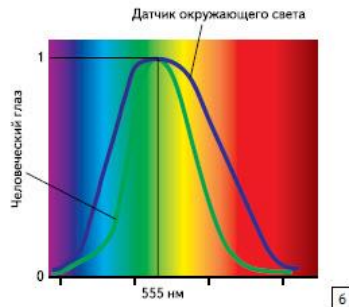
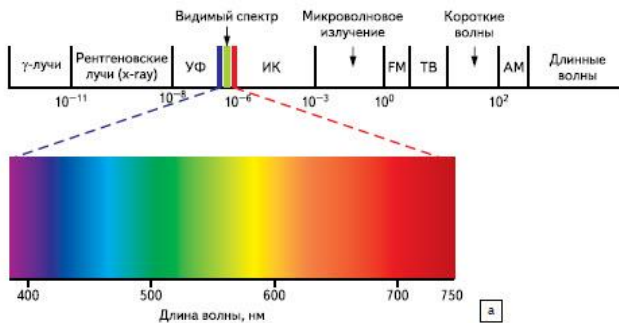
Импульс фотона  $\vec{p}$

$$p = h\nu/c = h/\lambda, \quad h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

Плоская монохроматическая поляризованная волна представляет набор фотонов в одном и том же состоянии.

Фотон является бозоном. Чем больше фотонов в данном состоянии, тем более вероятно его заселение другими фотонами

# Спектр электромагнитных волн



# Цель создания лазера: получение источников света с новыми свойствами

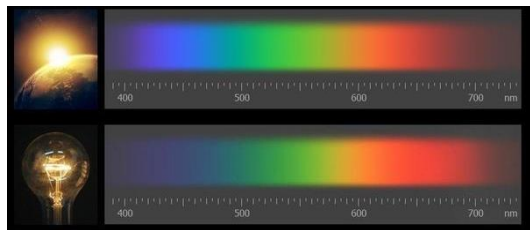
**Лазерное излучение** - электромагнитное излучение оптического диапазона, обладающее такими свойствами, как

- **монохроматичность**
- **когерентность**
- **направленность**
- **спектральная яркость**
- **поляризованность**

что позволяет создавать большую локальную концентрацию энергии

Сам термин «**ЛАЗЕР**» появился в 1958 году, незадолго до создания первого работающего лазера

«Приготовить» **излучение тепловых источников** с подобным набором свойств – нереализуемая задача



$$\Delta \nu_{heat} = \frac{c}{\lambda_{blue}} - \frac{c}{\lambda_{red}} \sim 3,7 \times 10^{14} \text{ Гц},$$

$$\Delta \lambda = 400 \text{ нм}$$

$$\Delta \nu_{las} \sim 1,5 \times 10^9 \text{ Гц}, \Delta \lambda = 0,002 \text{ нм}$$

# Монохроматичность

**Монохроматическая волна** — строго гармоническая (синусоидальная) волна с постоянными во времени **частотой, амплитудой и начальной фазой**

Спектр монохроматической волны представляет бесконечно узкую линию.



**Степень немонохроматичности:**

$$\xi = \Delta\nu/\nu_0 = 1/\tau_{\text{ког}} \nu_0,$$

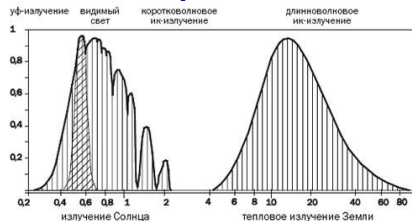
$\Delta\nu$  - разброс частот

$\Delta\nu \approx 1/\tau_{\text{ког}}$ ,  $\tau_{\text{ког}}$  - характерная длительность цугов (монохроматических участков),

$\tau_{\text{ког}}$  - **время когерентности**.

**Длина когерентности**  $l \approx \tau_{\text{ког}} \cdot c$

Спектр излучения Солнца и теплового излучения Земли



**Пространственная когерентность**

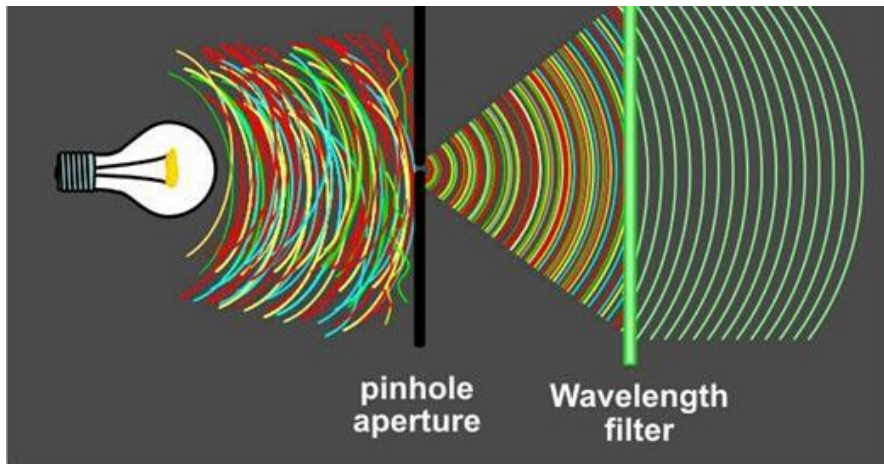
**Радиус когерентности** - максимальное, поперечное направлению распространения волны расстояние, на котором возможно проявление интерференции

$$r_{\text{ког}} \approx \lambda/\varphi, \quad \varphi - \text{угловой размер}$$

# Когерентность

Когерентность волны означает, что в различных пространственных точках волны осцилляции происходят синхронно, то есть разность фаз между двумя точками не зависит от времени. Отсутствие когерентности, следовательно — ситуация, когда разность фаз между двумя точками не постоянна, а меняется со временем. Такая ситуация может иметь место, если волна была сгенерирована не единым излучателем, а совокупностью одинаковых, но независимых (то есть, некоррелированных) излучателей.

Как приготовить пространственно-когерентный источник из некогерентного?





# Направленность излучения

Классический источник

Лазерный источник



Лирическое отступление:

## Почему А.Н.Толстой написал «Гиперboloид инженера Гарина»?

А.Н.Толстой,

Гиперboloид инженера Гарина,

1927 год

Переработка 1939 года



А.Н.Толстой: «Когда писал «Гиперboloид инженера Гарина» (старый знакомый, Оленин, рассказал мне действительную историю постройки такого двойного гиперboloида; инженер, сделавший это открытие, погиб в 1918 году в Сибири), — пришлось ознакомиться с новейшими теориями молекулярной физики»

# Отражение в кинематографе



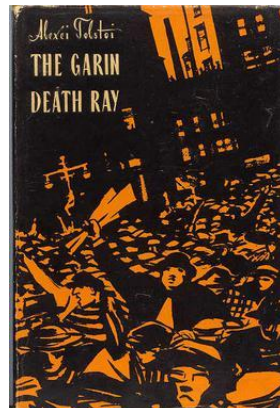
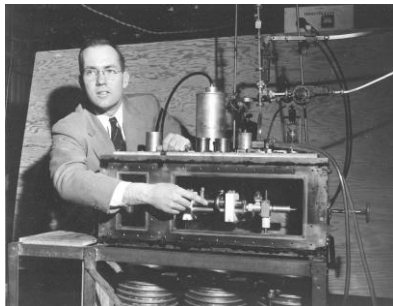
Экранизация 1965 года



Экранизация 1973 года



## «Гиперboloид инженера Гарина»



Cover of the 1955 English revised  
edition

Charles H. Townes, the inventor of laser,  
said that his invention had been inspired  
by this novel\*.

\*) The Pentagon's Brain: An Uncensored History of  
DARPA, America's Top-Secret  
DARPA – the Defense Advanced Research Projects  
Agency

# Лазер – одно из главных технологических достижений XX века

Изобретение **лазера** рассматривается в числе 12 наиболее значимых:



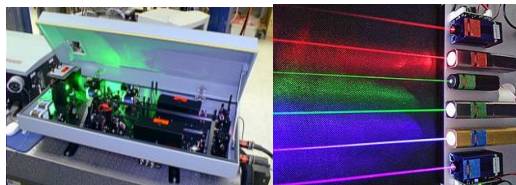
# Что может войти в список достижений XXI века?

- ? Квантовые каналы связи
- ? Портативные источники энергии
- ? Аддитивные технологии
- ? Социальные сети
- ? Квантовый компьютер
- ? Беспилотный транспорт
- ? Летящие автомобили
- ? Системы виртуальной реальности
- ? Генная инженерия
- ? Регенеративная медицина
- ? Искусственные органы
- ? Искусственный интеллект
- ? Управление и считывание информации через мысленный интерфейс
- ?
- ?

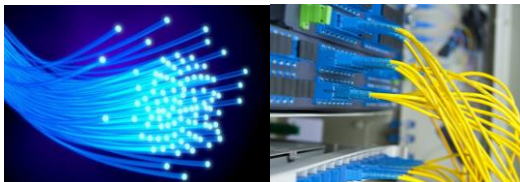
# Основные устройства современной оптики

Изобретения, кардинально изменившие место **оптики** в науке, технологическом развитии, хозяйственной и повседневной жизни:

- **лазеры** (новое качество света, проникновение во все сферы человеческой деятельности)



- **оптические волокна** [с низкими потерями] (возможности дистанционной передачи, кардинальное изменение емкости каналов связи)



- **полупроводниковые оптические устройства** (источники, в т.ч., лазерные, детекторы излучения, усилители, переключатели, коммутаторы и пр.).



# Современная оптика и смежные дисциплины

В результате развития **лазеров, оптических волокон, полупроводниковых оптических устройств** во взаимосвязи со смежными областями (электроника, электротехника, оптические материалы, магнетики и пр.) появились новые оптические термины и развиваются новые дисциплины, такие как

**оптоэлектроника** - *использование оптических и электрических методов обработки, хранения и передачи информации*

**электрооптика** - *изменение оптических свойств среды под действием электрического поля*

**квантовая электроника** - *усиление, генерация и преобразование частоты ЭМ колебаний и волн, основанные на вынужденном излучении или нелинейном взаимодействии с веществом*

**квантовая оптика** – *изучение квантовых свойств света*

**оптические технологии** – *решение практических задач при использовании оптического излучения*

## Фотоника

В последние годы вошел в употребление и получил развитие термин **фотоника**. По аналогии с электроникой. Электроника – управление потоками зарядов (в вакууме, в веществе, на границе сред). **Фотоника** – управление потоками фотонов (в свободном пространстве, в среде, на границе сред).



**МФК**  
**СОВРЕМЕННЫЕ ЛАЗЕРЫ:**  
**НОВЫЕ ГРАНИ СВЕТА**

2020, весенний семестр

**Среда 15.00**

Корпус нелинейной оптики,

**2-й этаж, ауд. 2-17**