

Физическая оптика «ФОТОНИКА»

А.В. Шамрай, д.ф.- м.н.
Курс лекций
2014 г.

- Преподаватель

- Шамрай Александр Валерьевич
д.ф.-м.н., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН

- Книги

- Борн М. Вольф Э. Основы оптики.
- Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика: Учебник (МГУ)
- Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. 1996.
- Ярив А., Юх П. Оптические волны в кристаллах.
- Ландсберг, Г. С. Оптика : учеб. пособие для вузов / Г. С. Ландсберг .— Изд. 5-е, перераб., доп. — М. : Наука, 1976 — 926 с.
- Фриман, Роджер. Волоконно-оптические системы связи / Р. Фриман ; пер. с англ. под ред. Н. Н. Слепова .— 3-е изд., доп .— М. : Техносфера, 2006 .— 495 с

- Интернет ресурсы

- <http://optdesign.narod.ru/book.htm>
- http://www.ph4s.ru/book_ph_opt_volok.html
- <http://x311.siteedit.ru/books>

Содержание курса лекций

- Базовые фундаментальные понятия классической и квантовой оптики.
- Основные практические применения.
- Новые направления и тенденции развития оптики (фотоника).

Требования для экзамена

- Активность в решение и защите домашних заданий (экзамен автоматом)
- Устный экзамен: теоретический вопрос + решение задачи

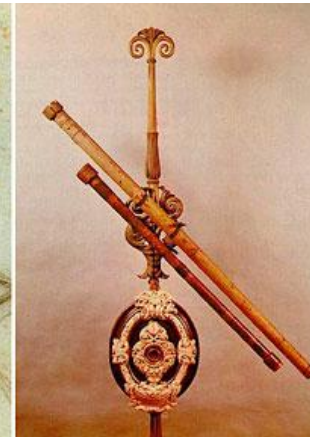
Лекция 1: Введение

Развитие оптики

- Древняя греция (Пифагор, Платон, Аристотель)
 - Прямолинейное распространение лучей, закон отражения
 - Законы преломления не удалось объяснить
- Оптические приборы (Г. Галилей)
- Природа света
 - Корпускулярная (Ньютон)
 - Волновая (Юнг, Френель)
 - Электромагнитная (Максвелл)
 - Взаимодействие света с веществом
 - Квантовая теория света
- Оптика в информационных технологиях
 - Связь
 - Память
 - Датчики



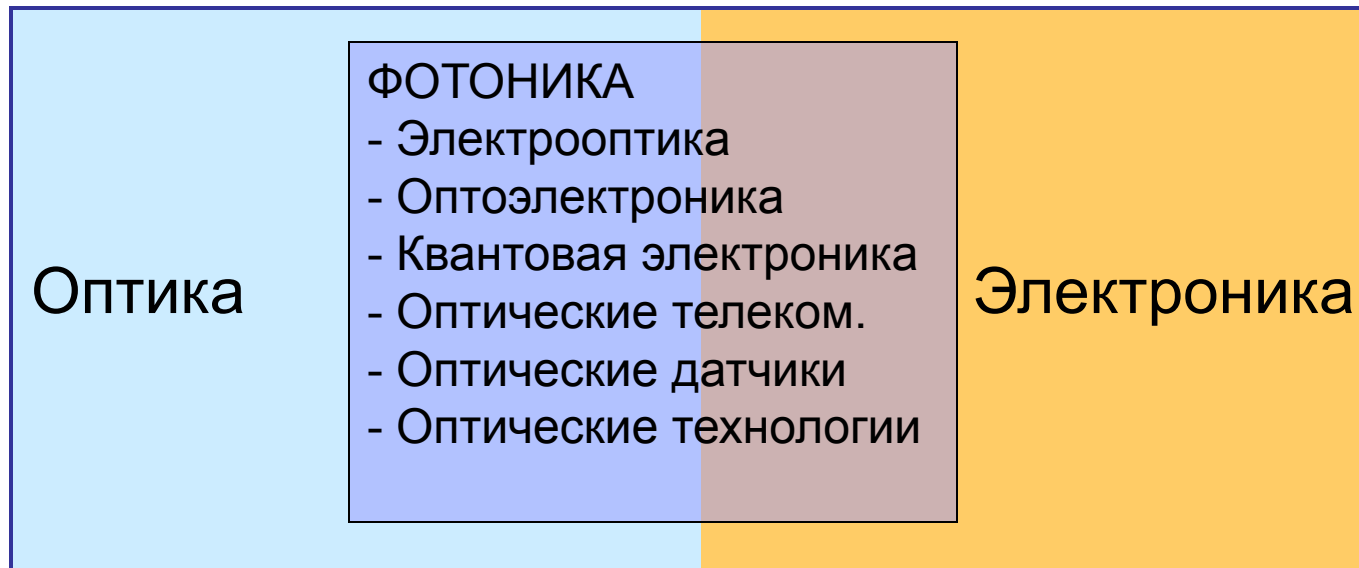
Архимед сжигает вражеский флот



Телескоп Г. Галилея

Что такое фотоника?

- Термин возник в области информационных технологий по аналогии с электроникой.
 - **Электроника** - генерация и управления электронами.
 - **Фотоника** - генерация и управление фотонами

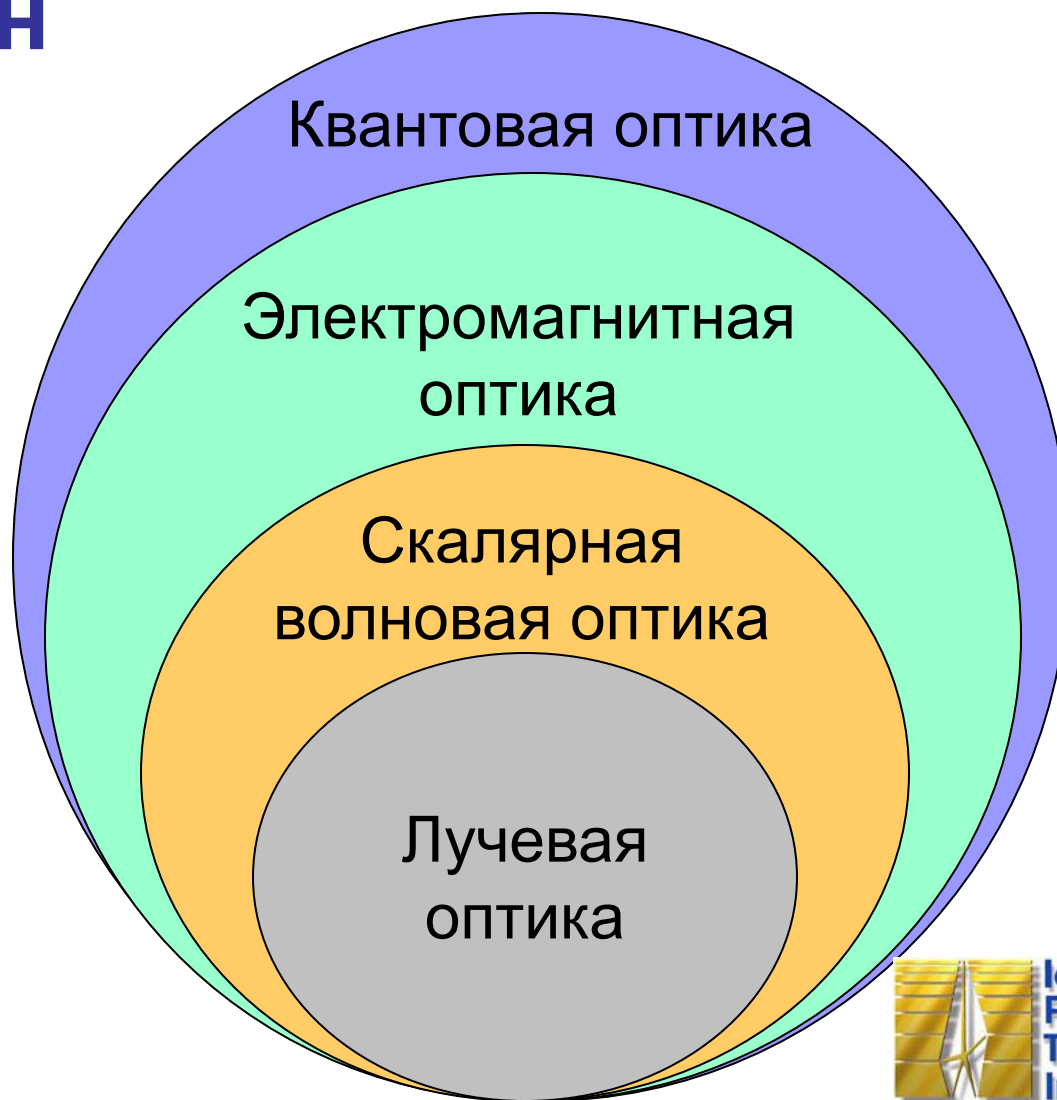


«Фотоника» - производная слова фотон

Условия когда
проявляются
квантовые свойства

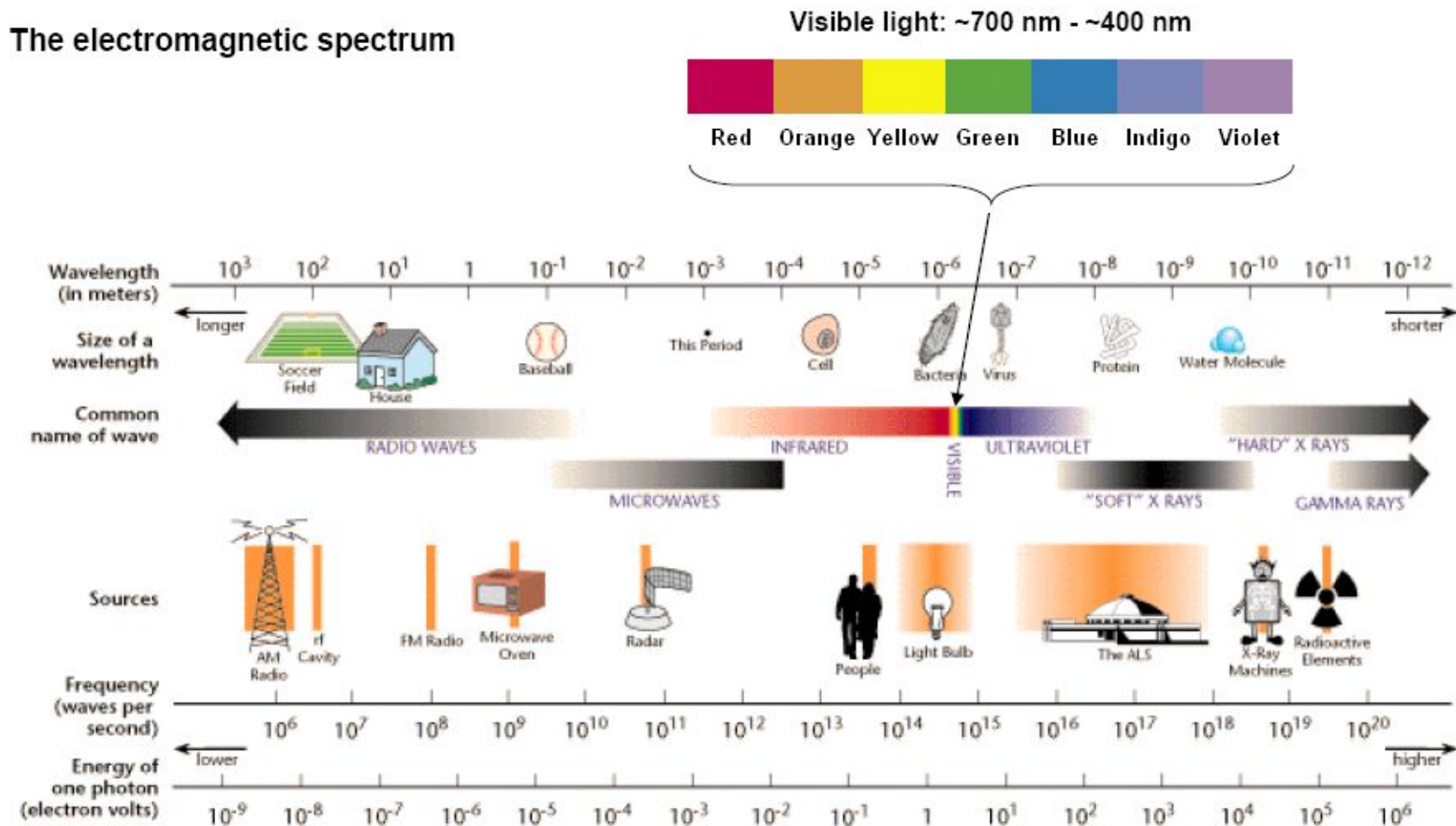
$$E_{ph} = h\nu = hc/\lambda > kT$$

при ком. темп. 300 K
 $\nu = 6 \text{ THz}$

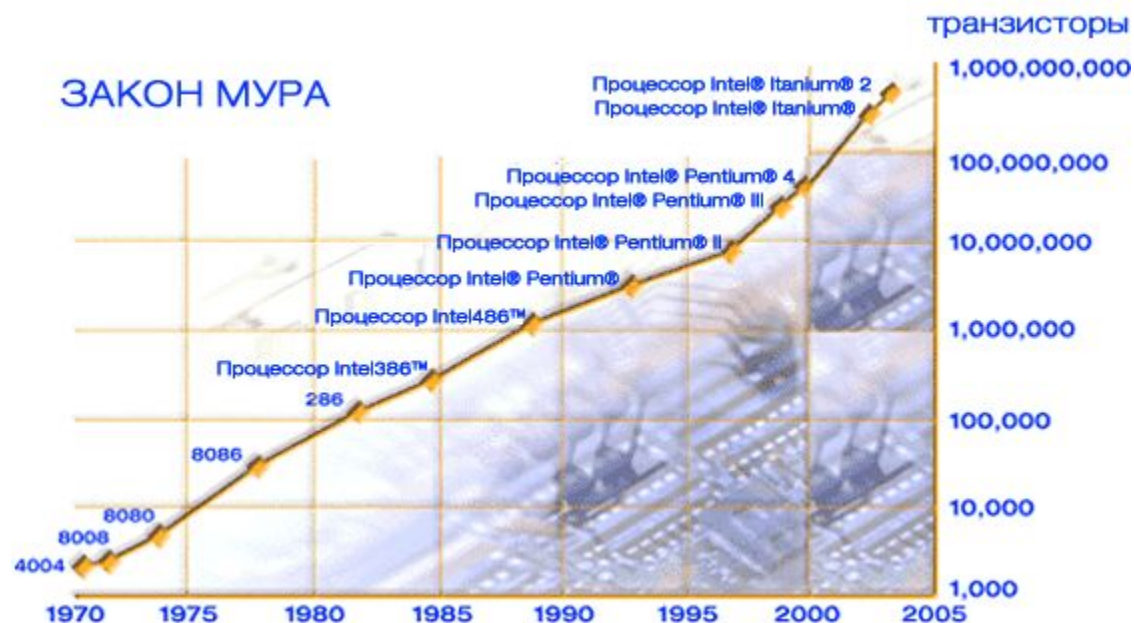


Электромагнитная шкала

The electromagnetic spectrum

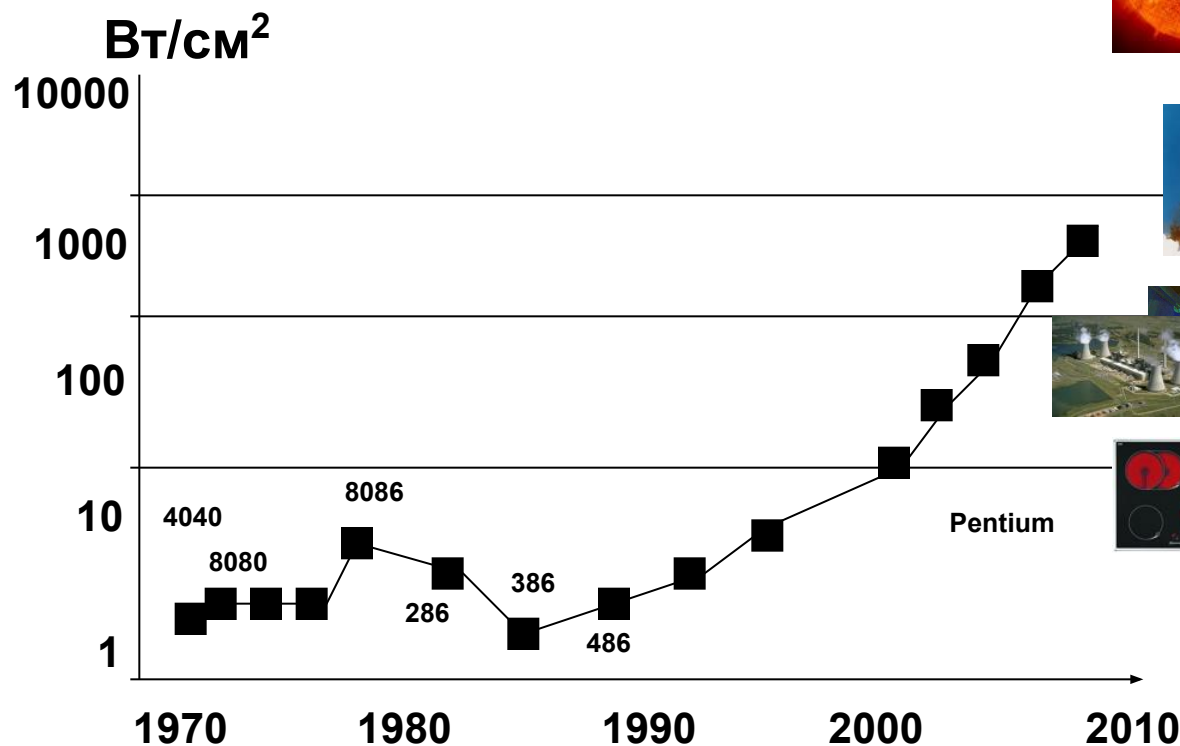


Закон Мура



Electronics magazine, 19 апреля 1965

Рост температуры процессора с ростом частоты

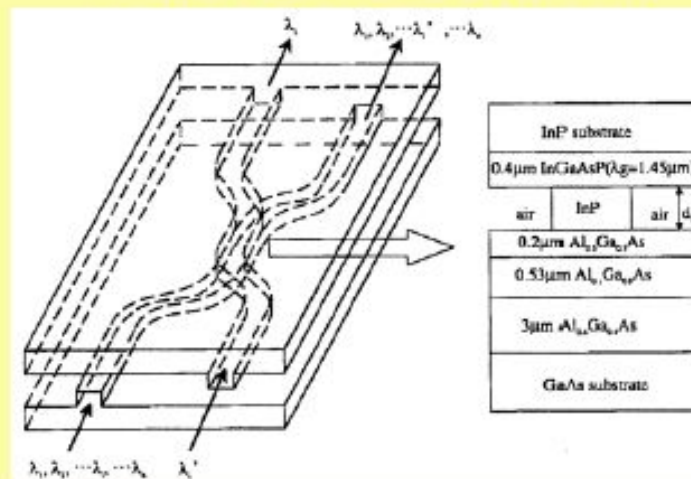


Электронные интегральные схемы или оптические



6.35 Million Transistors
Six Interconnect Levels

FUSED VERTICAL COUPLER



Two Interconnect Levels

Ключевые компоненты и технологии

- Изобретение когерентных источников света (LASER).

Some lasers and their operating wavelength

Laser (optical gain) medium Wavelength

C ⁶⁺ (p)	18.2 nm
ArF excimer (g)	193 nm
KrF excimer (g)	248 nm
He-Cd (g)	442 nm
Ar ⁺ (g)	515 nm
Rhodamine-6G dye (l)	560-640 nm
He-Ne (g)	633 nm
Kr ⁺ (g)	647 nm
Ruby (s)	694 nm
Ti ³⁺ :Al ₂ O ₃ (s)	0.66-1.18 μm
Nd ³⁺ :glass (s)	1.06 μm
Nd ³⁺ : YAG (s)	1.064 μm
KF color center (s)	1.25-1.45 μm
He-Ne (g)	3.39 μm
FEL (LANL)	9-40 μm
CO ₂ (g)	10.6 μm
H ₂ O (g)	118.7 μm
HCN (g)	336.8 μm

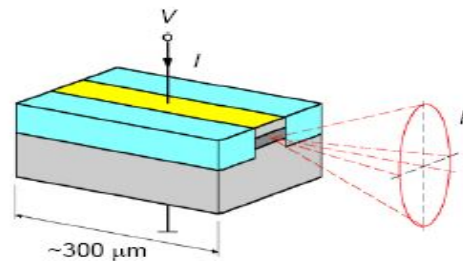
g = gas
s = solid
l = liquid
p = plasma

He-Ne laser



Semiconductor lasers:

CdZnSe	400-550 nm
InGaN	400-550 nm
GaAlInP	600-800 nm
AlGaAs	700-900 nm
InGaAlAs	0.9-1.6 μm
InGaAsP	1.0-1.6 μm
CdHgTe	3-14 μm
PbSnTe	5- μm



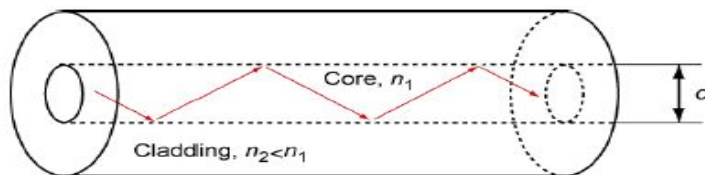
CdZnSe laser



Ключевые компоненты и технологии

- Создание оптических волноводов с низкими потерями (оптическое волокно).

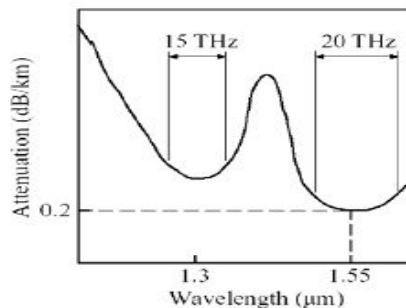
Optical fibers



Core medium: GeO_2 -doped SiO_2
Cladding medium: SiO_2

Single mode fibers: $d \sim 10 \mu\text{m}$
Multimode fibers: $d \sim 50\text{-}200 \mu\text{m}$

Attenuation characteristics:



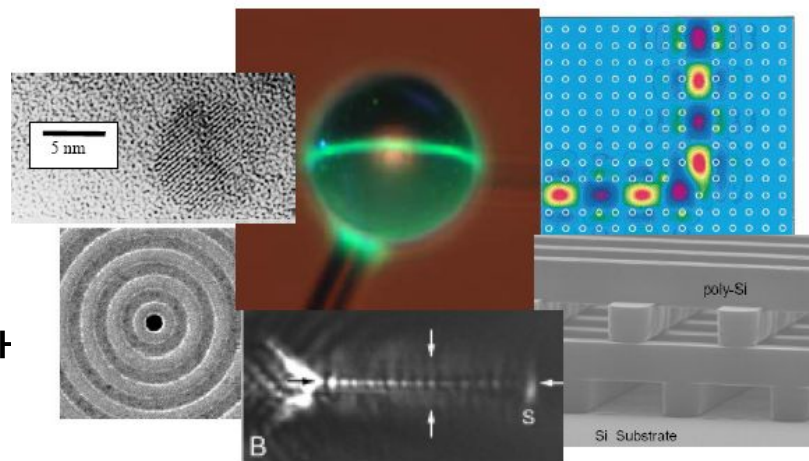
Minimum attenuation = 0.2 dB/km @ 1.55 μm
→ 4% lost after 1 km

High carrier frequency (IR) $\sim 200 \text{ THz}$
→ Available bandwidth $\sim 35 \text{ THz}$
(equivalent to 3.5 million TV-channels in one single optical fiber!)



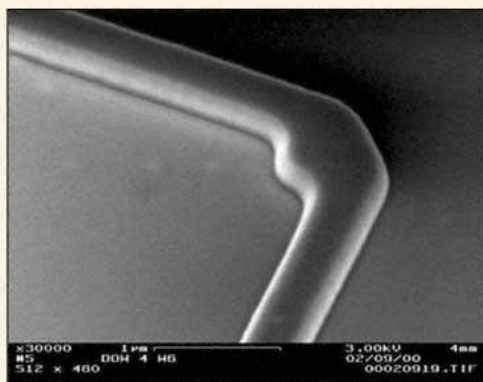
Области применения

- Информационные технологии
 - Увеличение скорости управления светом
 - Уменьшение размеров устройств
 - Управление света светом
- Новые применения
 - Медицина
 - Спектроскопия с высоким временн-пространственным разрешением
 - Уникальное научное оборудование
 - Обработка материалов
 - Энергетика
- Новые оптические материалы



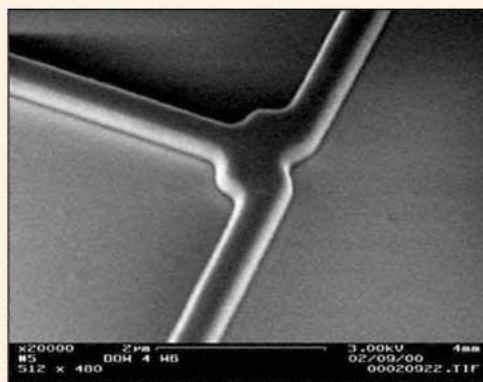
Области применения

- Кремниевые интегральные схемы
 - симбиоз фотоники и электроники
 - уменьшение радиуса поворота волноводов



(a)

- Area: $0.5 \mu\text{m}^2$
- Loss: $0.32 \pm 0.05 \text{ dB/turn}$
vs. $0.42 \pm 0.05 \text{ dB/turn}$ for $1\text{-}\mu\text{m}$ bend on the same die.



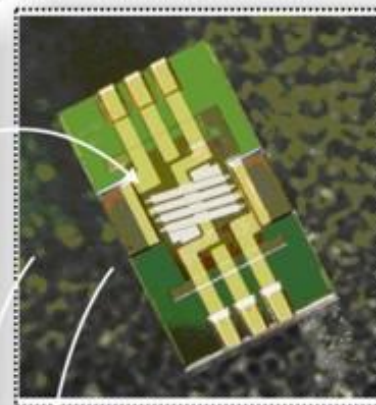
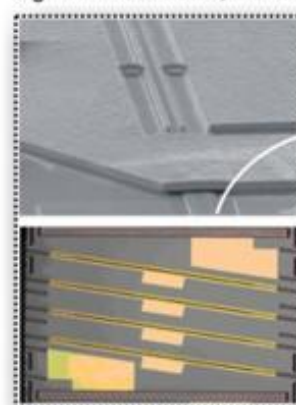
(b)

- Loss: 1 dB
 - Nonuniformity: $\sigma/\mu = 0.2$ (will be improved by design)
- Designed with C. Monolato and H. Haus, MIT;
Fabricated with P. Maki at MIT Lincoln Laboratories

monolithic elements/arrays

e.g. InP modulators, SOAs, EAMs

silicon submounts



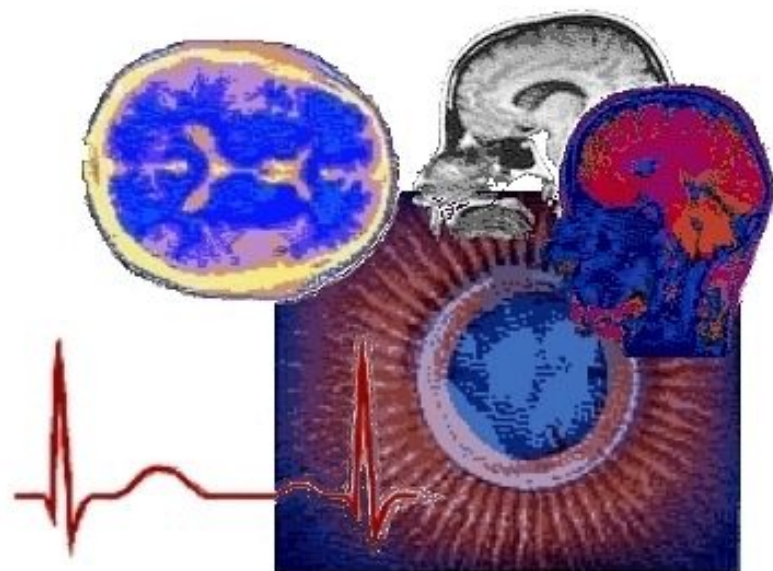
Si PLC Motherboard
hybrid platform
optical PCB



Arrowhead
pigtails

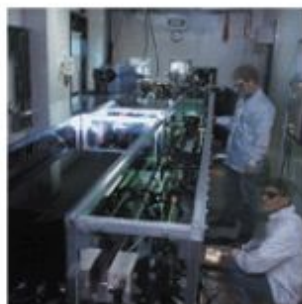
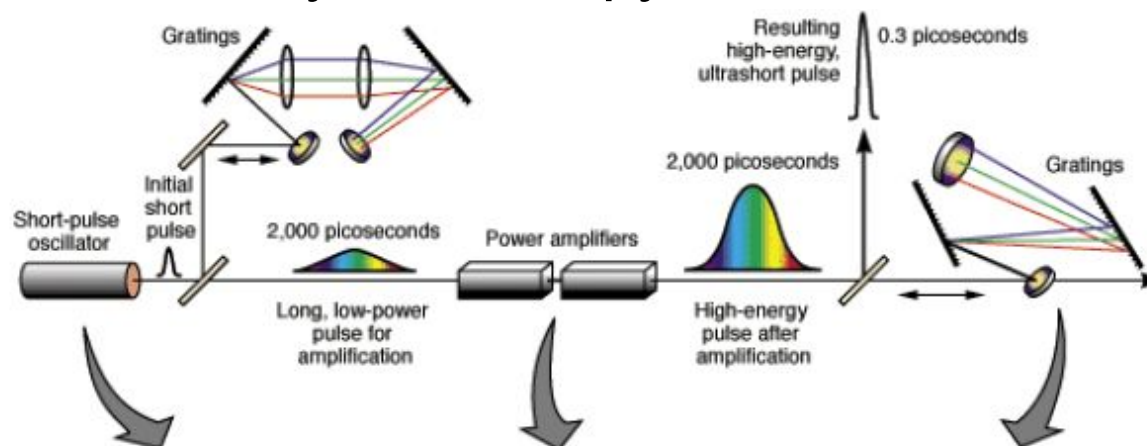
Области применения

- Биомедицинские применения
 - Новая быстро развивающаяся область



Области применения

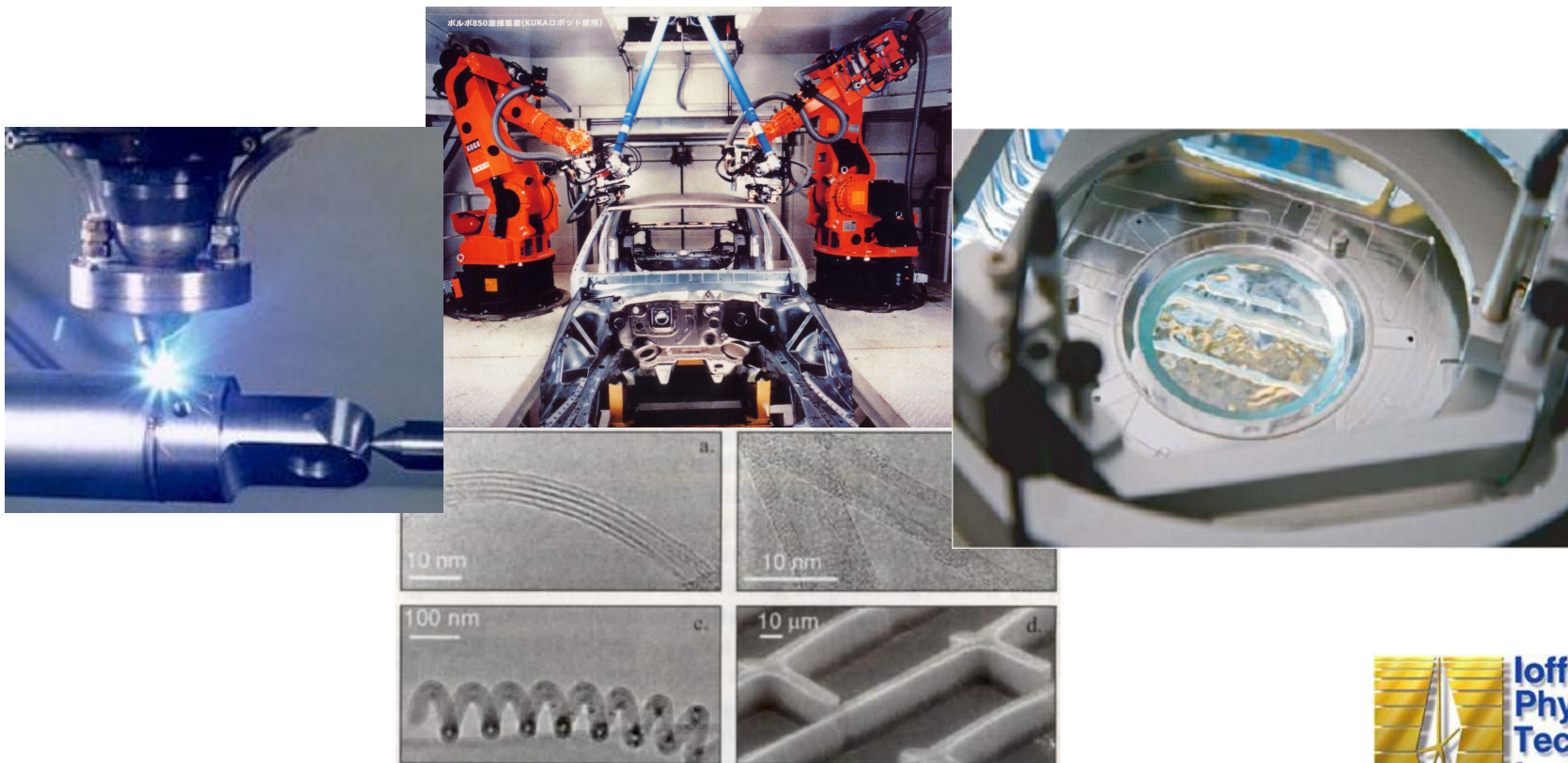
- Уникальное научное оборудование



- Lawrence Livermore Laboratory построен лазер с пиковой мощностью более 10^{15} Вт

Области применения

- Обработка материалов



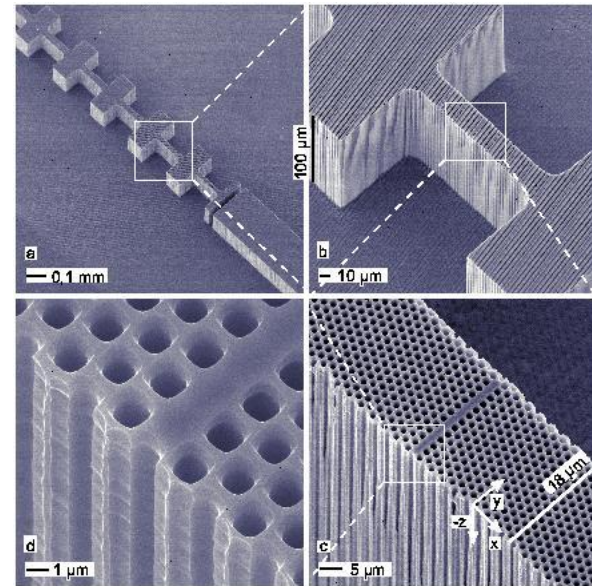
Области применения

- Энергетика



Области применения

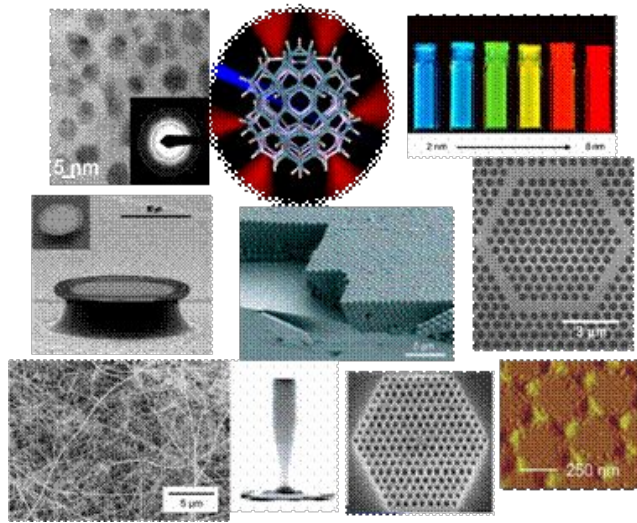
- Новые материалы
 - Органическая (полимерная) фотоника
 - Фотонные кристаллы и метаматериалы



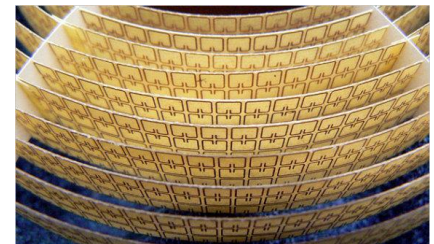
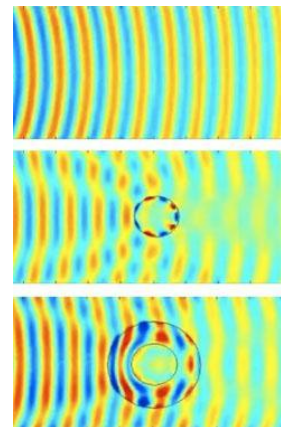
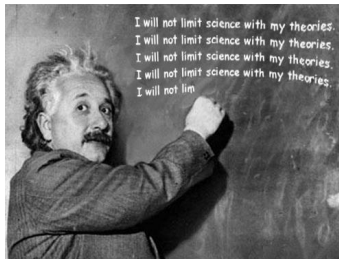
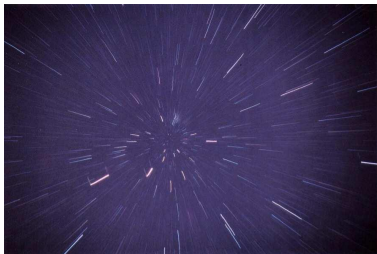
Новая физика

Нано

Новые необычные свойства



Быстрее скорости света



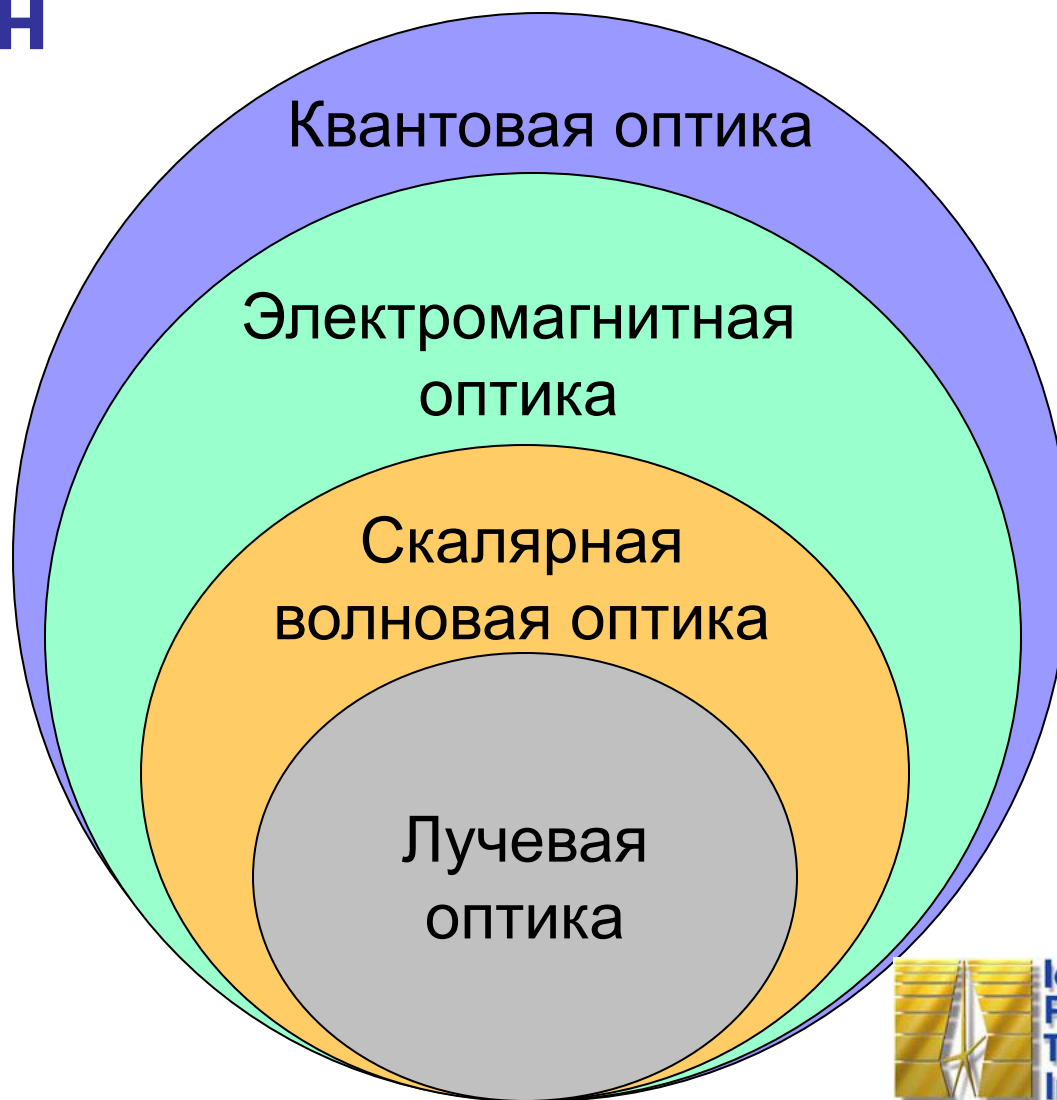
Лекция 1: Лучевая оптика

«Фотоника» - производная слова фотон

Условия когда
проявляются
квантовые свойства

$$E_{ph} = h\nu = hc/\lambda > kT$$

при ком. темп. 300 K
 $\nu = 6 \text{ THz}$



Лучевая оптика (геометрическая оптика)

- Оперирует с понятием лучей, независимых друг от друга и подчиняющихся определенным законам распространения.
- Луч – абстрактное понятие, а геометрическая оптика предельный случай $\lambda \rightarrow 0$ (длина волны гораздо меньше размеров объектов)
 - В изотропных средах (стекло, воздух) лучи эквивалентны направлению распространения света
- Применяется для расчета оптических систем формирования изображений (объективы, микроскопы, телескопы и т.п.)

Постулаты геометрической оптики

- Свет распространяется в виде независимых лучей
- Показатель преломления определяет скорость распространения света

$$V = c/n$$

- Принцип Ферма (1660)



Пьер Ферма

Свет распространяется по пути, для прохождения которого требуется минимальное время

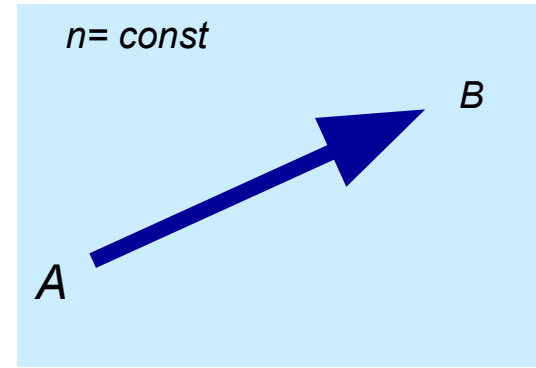
$$L = \int_A^B n(r) dS$$

Принцип минимальной оптической длины

$$\delta \int_A^B n(r) dS = 0$$

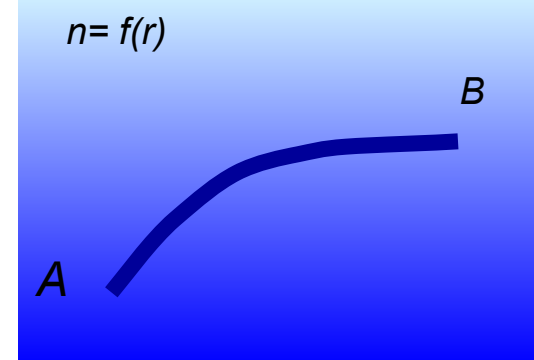
Лучи

- Однородная среда [$n(r) = \text{const}$]
 - Луч прямая



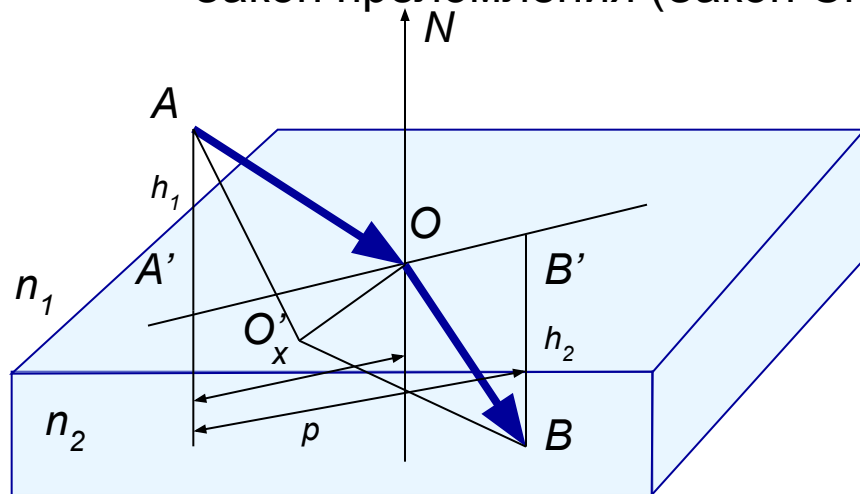
- Неоднородная среда
 - В неоднородной среде луч изгибается в сторону увеличения показателя преломления

$$\frac{d}{dS} \left(n(r) \frac{dr}{dS} \right) = \text{grad}[n(r)]$$



ЗАКОНЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

- Закон преломления (Закон Снелла XVII век)



$$t = \frac{AO}{V_1} + \frac{OB}{V_2}$$

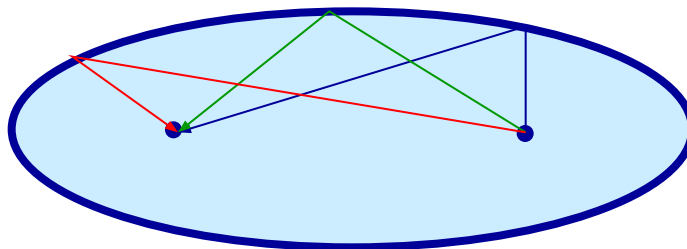
$$t = \frac{\sqrt{h_1^2 + x^2}}{V_1} + \frac{\sqrt{h_2^2 + (p-x)^2}}{V_2} \Rightarrow \min$$

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$



Виллерброрд Снелл

- Закон отражение (**вывести самостоятельно**)
- Экстремум означает не только минимум
 - Пример: отражение от эллиптической поверхности

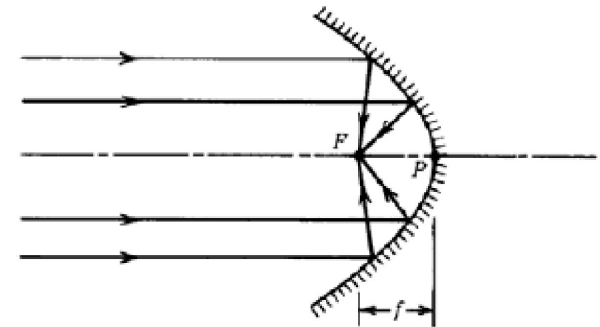


построение изображений

- Точка в точку - точечные изображения (стигматическое, волновая поверхность сфера)
- Точка – источник расходящихся лучей

Параболическое зеркало

- F – фокус
- Фокус положительный



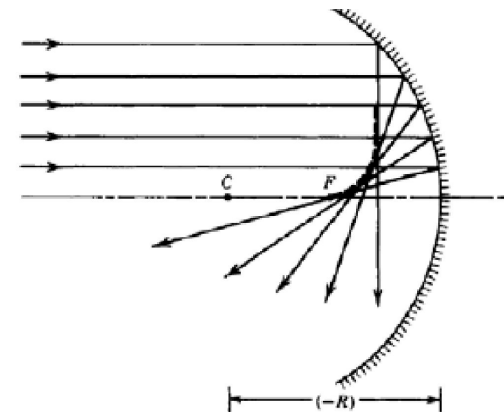
Сферическое зеркало

- Для параксиальных лучей (малый угол к оптической оси)

$$\tan \theta \approx \theta$$

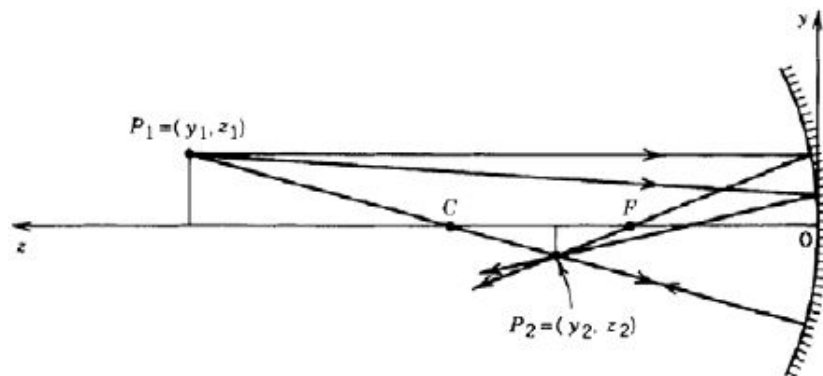
$$f \approx -\frac{R}{2}$$

R – отрицательный для вогнутой поверхности и
Положительный для выпуклой



построение изображений

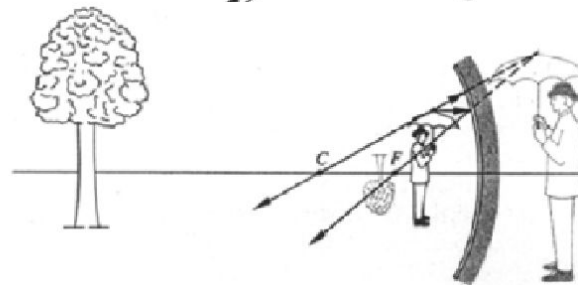
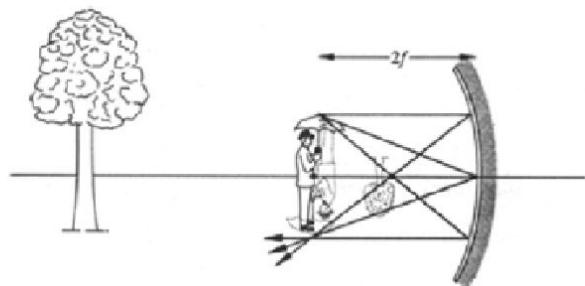
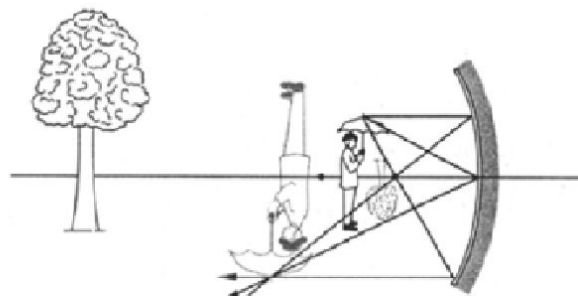
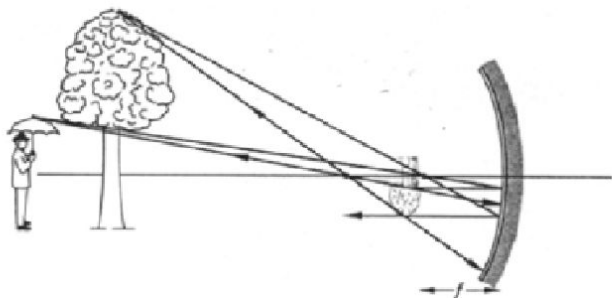
Сферическое зеркало



$$\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} = \frac{1}{f}$$

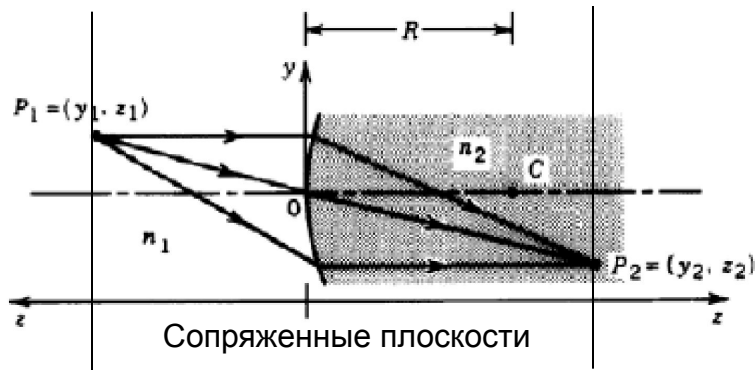
$$M = \frac{y_2}{y_1} = -\frac{z_2}{z_1}$$

Увеличение
Отрицательное для
перевернутого изображения



построение изображений

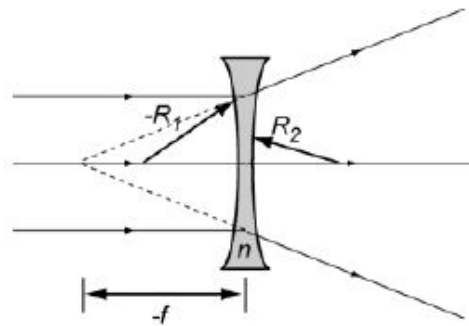
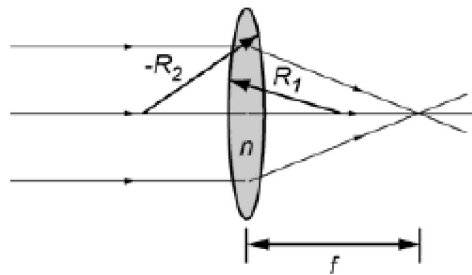
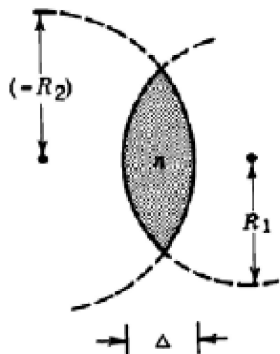
Преломление на сферической
поверхности
(параксиальное приближение)



$$\frac{n_1}{z_1} + \frac{n_2}{z_2} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

$$M = \frac{y_2}{y_1} = -\frac{n_1}{n_2} \frac{z_2}{z_1}$$

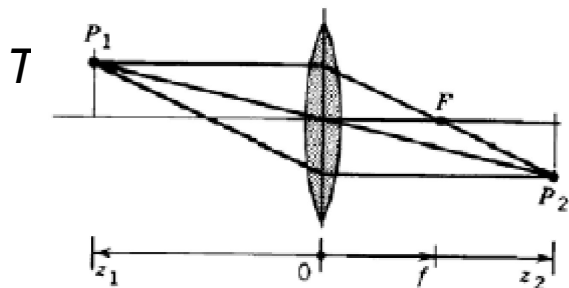
Сферическая линза



Тонкая линза - толщина мала
по сравнению с радиусом
кривизны

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

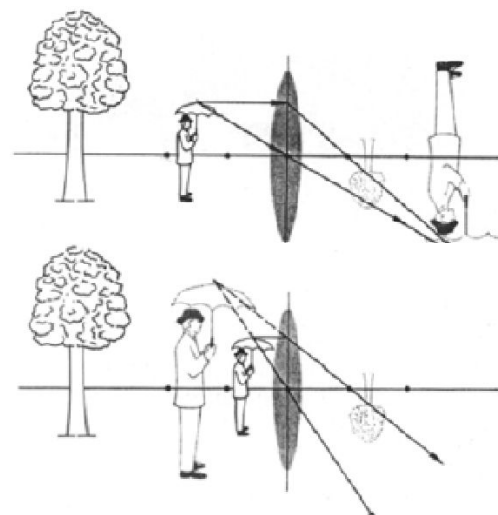
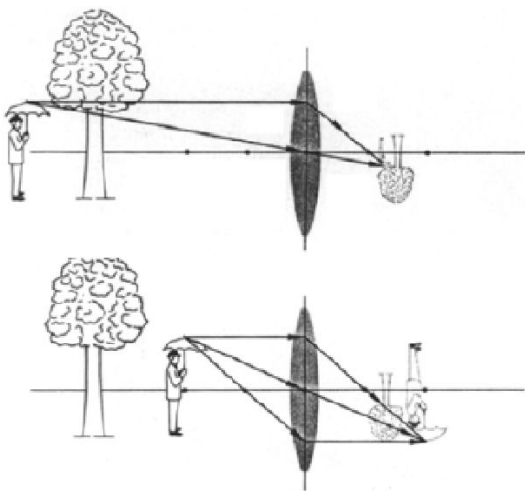
Построение изображений



$$\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} = \frac{1}{f}$$

$$M = \frac{y_2}{y_1} = -\frac{z_2}{z_1}$$

$$\text{диоптрии} [m^{-1}] \Rightarrow \frac{1}{f}$$

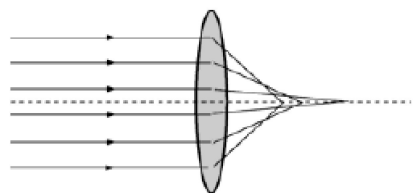


Аберрации

- Ошибки, или погрешности изображения, вызываемые отклонением луча от направления в идеальной оптической системе.

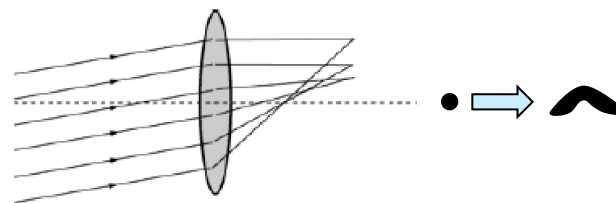
Сферическая

Без нарушения симметрии

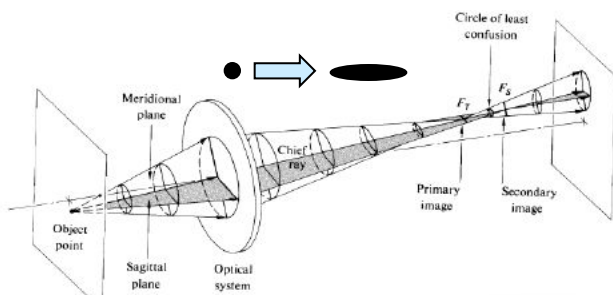


Кома (греч. волосы)

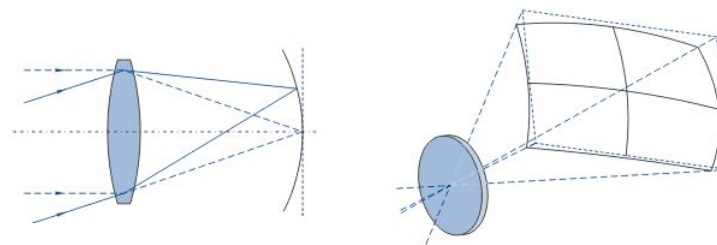
Для удаленных от оси точек



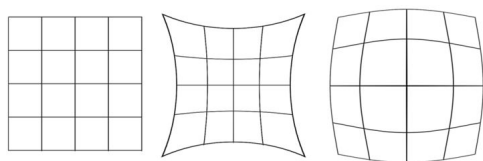
Астигматизм



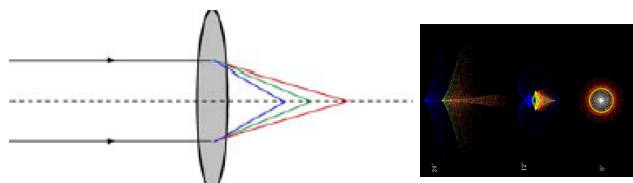
Кривизна поля



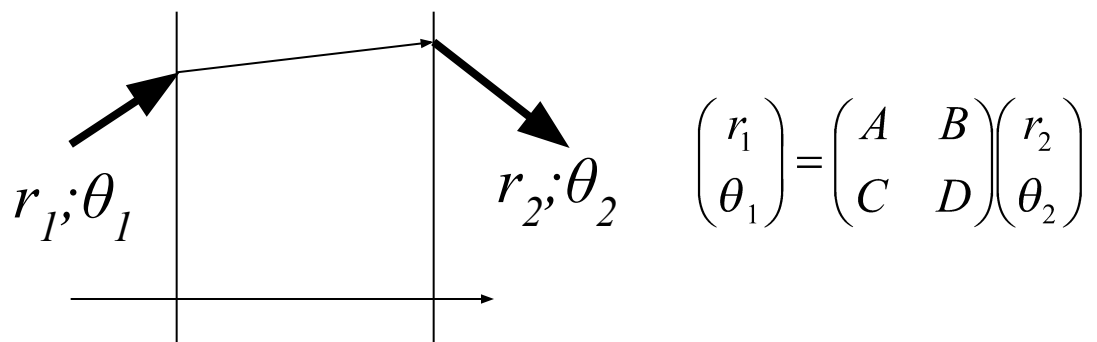
Дисторсия



Хроматическая



Матричная оптика



$$M = \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} - \text{однородная среда}$$

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & n_1/n_2 \end{pmatrix} - \text{граница раздела}$$

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} - \text{тонкая линза}$$



Вывести формулу системы двух линз

$$f = \frac{f_1 \cdot f_2}{d - (f_1 - f_2)}$$