

# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Связь ЭВМ с внешней средой: линии связи между ЭВМ

Методы кодирования информации: амплитудная, фазовая, частотная и другие типы модуляции.

Распределенные линии для разных диапазонов частот. Двух- и многопроводные линии. Телеграфное уравнение. Скорость распространения сигналов и волновое сопротивление. Согласование с нагрузкой.

Модем. Передача данных через телефонные линии связи. Коаксиальный кабель, витая пара и радиоканал.

Оптические волокна и волоконно-оптические кабели. Распространение света по оптическим волокнам. Оптические моды, дисперсия мод, отсечка. Градиентные волокна и волокна со ступенчатым профилем показателя преломления.

Оптические передатчики и приемники: свето- и фотодиоды, полупроводниковые лазеры.

Предельная скорость передачи информации. Оптические солитоны

# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

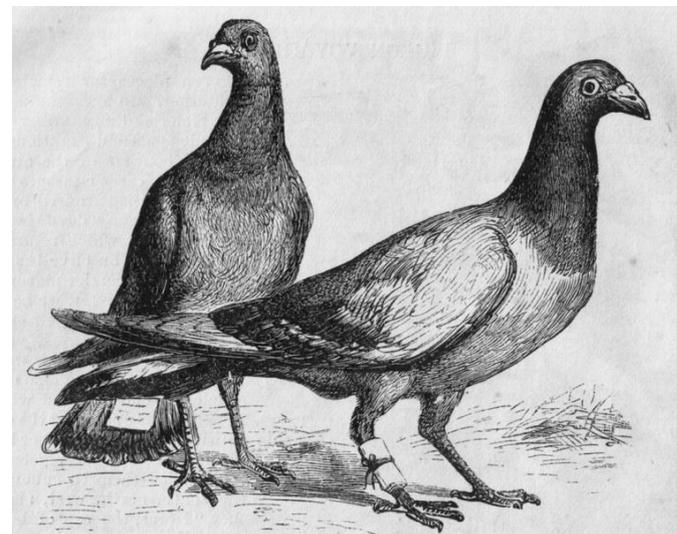
## История: марафон и голубиная почта



*Марафон*

Согласно легенде греческий воин по имени Филиппид в 490 году до н.э. после битвы при Марафоне пробежал, не останавливаясь, от Марафона до Афин (42 км 195 метров), чтобы возвестить о победе греков. Добежав до Афин, он успел крикнуть «Радуйтесь, афиняне, мы победили!» и упал замертво

- Греки сообщали имена победителей Олимпиад с помощью почтовых голубей.
- В Египте при Нур ад-Дине (1146-1173 г.г.) за пару почтовых голубей платили по 1000 динариев
- Почтовые голуби использовались в 1572-1574 г.г. при осаде городов Харлем и Лейден



*Почтовые голуби*

# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## История: оптическая связь



*Индийские костры*



*Семафор*



283 г. до н.э.  
*- Александрийский маяк*

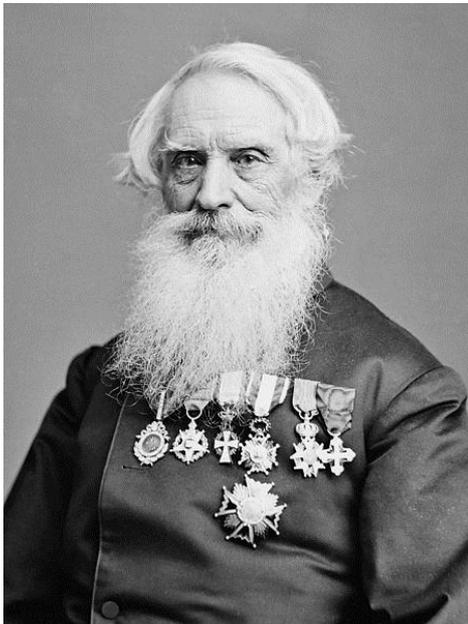


1868 - *Найт,*  
*Лондон, первый светофор*

# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## История: связь по проводам и без проводов

Код Морзе (после 1914 г. азбука Морзе) - способ знакового кодирования т.е. представления букв, цифр, знаков препинания и др. символов последовательностью троичных сигналов: длинных («тире») и коротких «точек». Единица времени - длительность точки. Длительность тире - 3 точки. Пауза между элементами знака - точка, знаками в слове - 3 точки, словами - 7 точек



Принцип кодирования: буквы, которые чаще используются (в английском языке), кодируются более простыми сочетаниями знаков

Сэмюэль Морзе

и его код

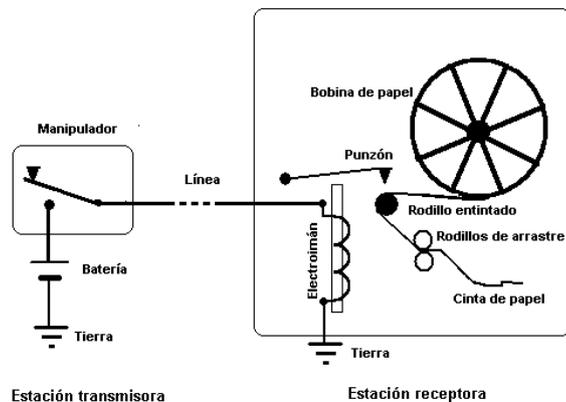
### INTERNATIONAL MORSE CODE

1. A dash is equal to three dots.
2. The space between parts of the same letter is equal to one dot.
3. The space between two letters is equal to three dots.
4. The space between two words is equal to five dots.

A	• —	U	• • —
B	— • • •	V	• • • —
C	— • — •	W	• — —
D	— • •	X	— • • —
E	•	Y	— • — —
F	• • — •	Z	— — — •
G	— — •		
H	• • • •		
I	• •		
J	• — — —		
K	— • —	1	• — — — —
L	• — • •	2	• • — — —
M	— —	3	• • • — —
N	— •	4	• • • • —
O	— — —	5	• • • • •
P	• — — •	6	— • • • •
Q	— — — •	7	— — • • •
R	• — •	8	— — — — •
S	• • •	9	— — — — — •
T	—	0	— — — — — —

# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## История: связь по проводам



Телеграф - метод и технические средства для передачи информационного сигнала по проводам или другим каналам электросвязи

### *Телеграфный аппарат*

- 1774 - Лесаж, Женева, первый телеграфный аппарат (24 провода соединяют две станции)
- 1787 - Ломон, станции соединяет всего один провод
- 1798 - Сальва, Мадрид, первая телеграфная линия
- 1837 - Сэмюэль Морзе, телеграфный аппарат
- 1844 - Вайль, усовершенствует аппарат Морзе



*Аппарат Морзе*

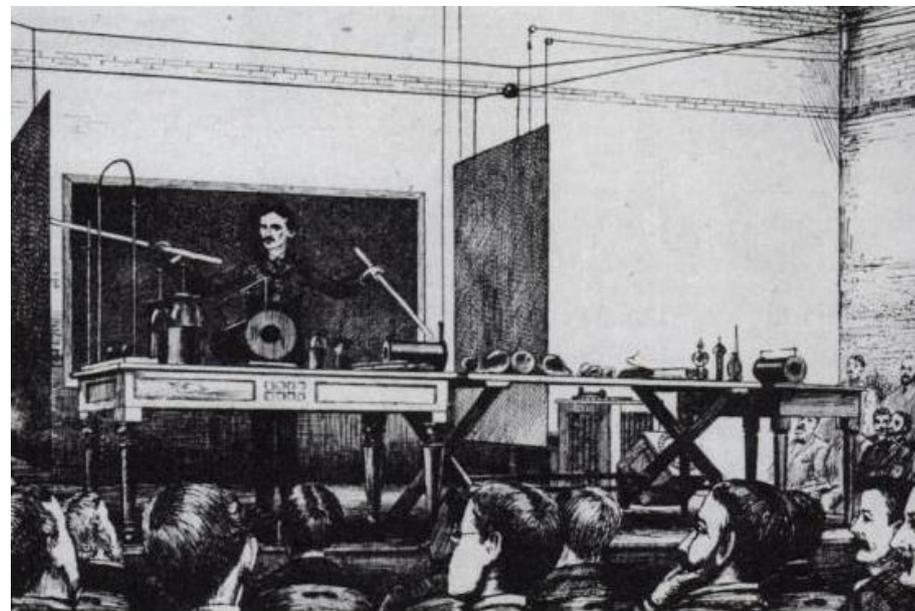
# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## История: связь без проводов



*А.С. Попов*

*Никола Тесла*



*Гульельмо Маркони*



Радиотелеграф – средство для передачи (обмена) текстовой информации (информацией) по радио. Буквы алфавита представлены комбинациями точек и тире (код Морзе). В настоящее время используется в основном энтузиастами и иногда военными радистами

# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## История: оптическая связь



Гелиограф (оптический телеграф) - устройство для передачи информации на расстояние посредством световых вспышек. Его главная часть - подвижное зеркало, посредством наклонов которого проводят серию вспышек (обычно с помощью азбуки Морзе) в направлении получателя сигнала

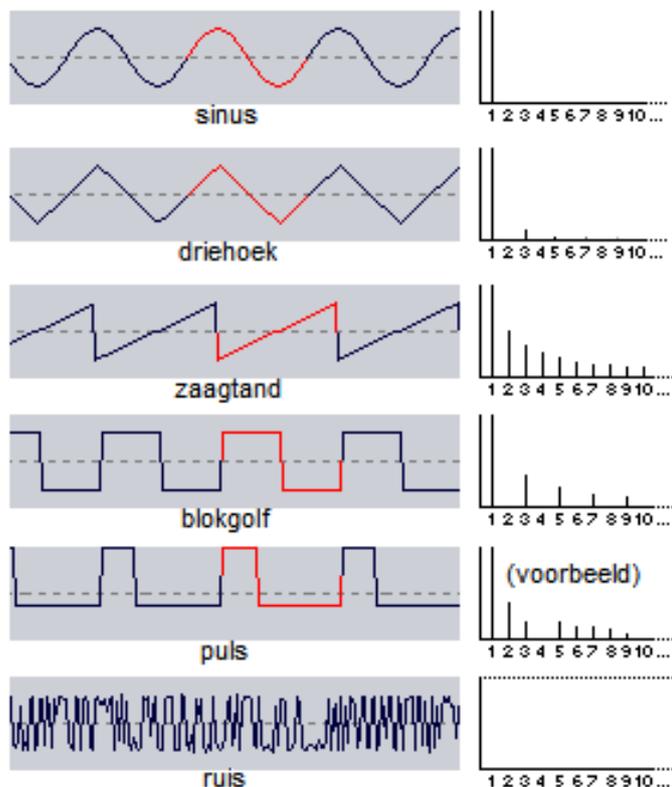
*Оптический телеграф*

Дальность связи в хороших условиях (солнечный день, чистая атмосфера) могла превышать 50 км. Рекорд дальности связи был поставлен в США в 1894 году (расстояние между точками передачи и приёма 295 км, обе располагались на горных вершинах).



# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Видео- или радиоимпульс ?



*Последовательности  
импульсов*

Импульс - кратковременный всплеск какой-то величины в определённом, конечном промежутке времени

Различают видеоимпульсы - единичные выбросы какой-либо формы и радиоимпульсы - всплески амплитуды высокочастотных колебаний на т.н. несущей частоте

В отличие от видеоимпульсов радиоимпульсы имеют нулевую площадь и поэтому могут распространяться с минимальными потерями энергии

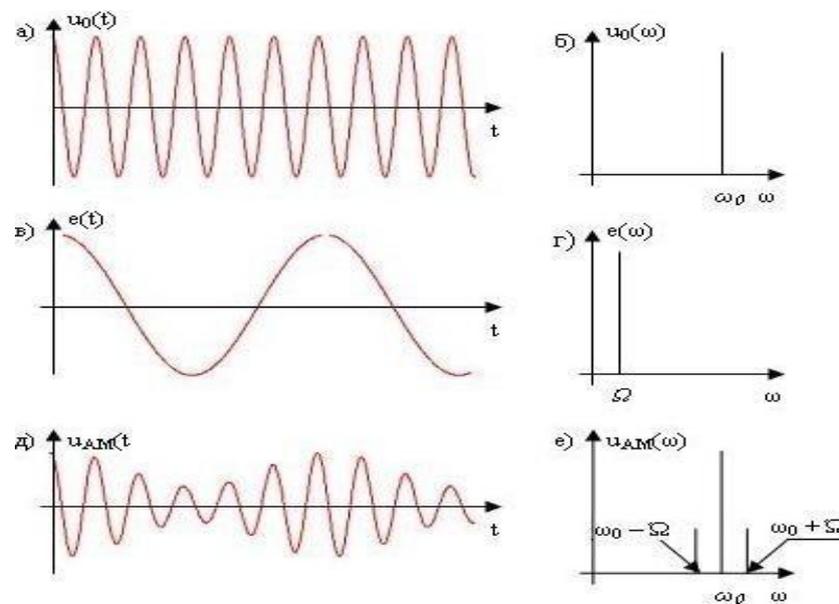
# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Модуляция

Модуляция - процесс изменения одного или нескольких параметров высокочастотного несущего колебания по закону низкочастотного информационного сигнала (сообщения).

Передаваемая информация содержится в управляющем (модулирующем) сигнале, а переносчиком информации является высокочастотное колебание, называемое несущим, характеристики которого заведомо известны

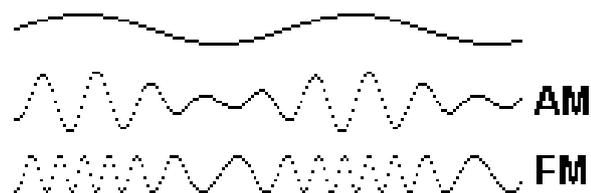
В результате модуляции спектр низкочастотного информационного сигнала переносится в область высоких частот. Это позволяет при организации вещания настроить функционирование всех приёмо-передающих устройств на разных частотах с тем, чтобы они «не мешали» друг другу



# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Модуляция

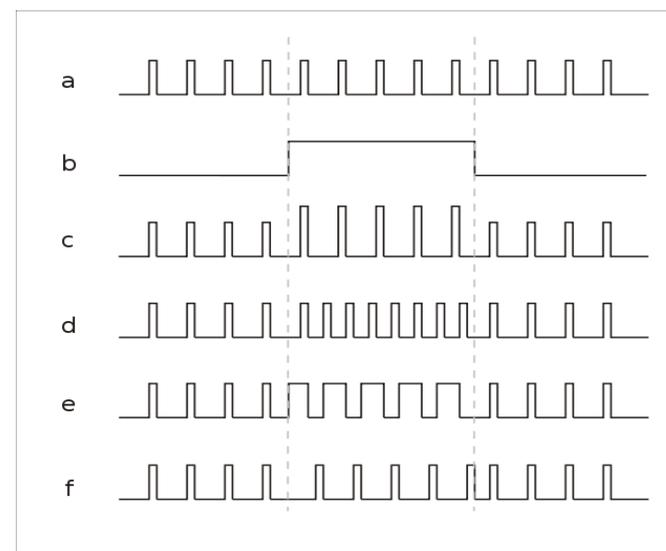
В качестве несущего могут быть использованы колебания различной формы (прямоугольные, треугольные и т. д.), однако чаще всего применяются гармонические колебания. В зависимости от того, какой из параметров несущего колебания изменяется, различают виды модуляции: амплитудная, частотная, фазовая и др. Модуляция дискретным сигналом называется цифровой модуляцией



*Амплитудная и фазовая модуляция*

Некоторые виды импульсной модуляции:

- амплитудно-импульсная модуляция (АИМ)
- частотно-импульсная модуляция (ЧИМ)
- широтно-импульсная модуляция (ШИМ)
- фазово-импульсная модуляция (ФИМ)



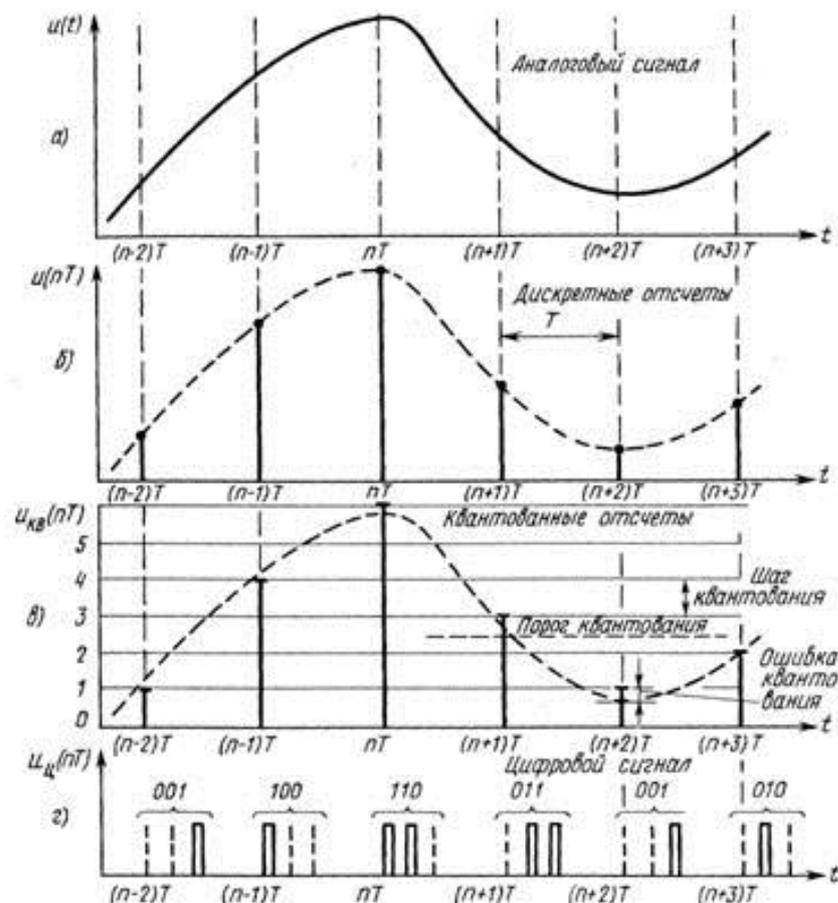
# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Импульсно-кодовая модуляция

Импульсно-кодовая модуляция (ИКМ, Pulse Code Modulation, PCM) используется для оцифровки аналоговых сигналов

Модуляция:

На передающем конце линии связи аналоговый сигнал цифруется (проводятся его дискретизация и квантование). Частота дискретизации выбирается не ниже 2-х кратной максимальной частоты в спектре исходного аналогового сигнала. Таким образом на выходе модулятора получается последовательный набор битов (0 и 1)

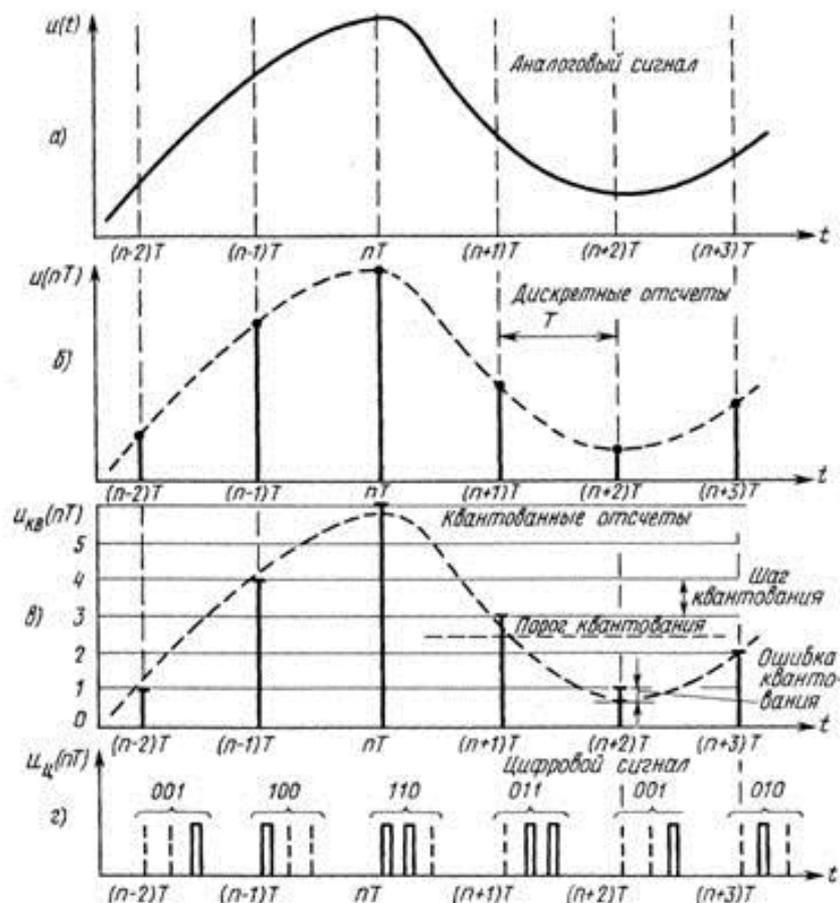


# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Импульсно-кодовая модуляция

Демодуляция:

На приемном конце линии связи демодулятор преобразует последовательность битов в импульсы собственным генератором с тем же уровнем квантования. Далее эти импульсы используются для восстановления аналогового сигнала в ЦАП



В дельта ИКМ кодируемый сигнал - разность между текущим и предыдущим значением. Это уменьшает требуемое число бит на отсчет на ~25%.

В адаптивной дельта ИКМ вдобавок меняется шаг квантования, что снижает требования к полосе пропускания при заданном отношении сигнал/шум

# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Модем



*Wi-Fi модем*

Модем - устройство, применяющееся в системах связи для физического сопряжения информационного сигнала со средой его распространения, где он не может существовать без адаптации (то есть переноса его на несущую частоты с модуляцией), и выполняющее функцию модуляции и демодуляции этого сигнала

Модулятор модема осуществляет модуляцию несущего сигнала, то есть меняет его характеристики в соответствии с изменениями входного информационного сигнала, демодулятор - обратный процесс.

Модем - оконечное оборудование линии связи. Формирование данных для передачи и обработки принимаемых данных осуществляет терминальное оборудование (его роль может выполнять ПК)



*Включение DSL модема*

# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Уравнения Максвелла

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 4\pi\rho$$

Законы Гаусса

для электрического и магнитного полей

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

Закон индукции Фарадея

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

Теорема о циркуляции магнитного поля

$\mathbf{E}$  - напряженность электрического поля

$\mathbf{H}$  - напряженность магнитного поля

$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$  - электрическая индукция

$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$  - магнитная индукция

$\rho$  - плотность свободных зарядов

$\mathbf{j}$  - плотность тока свободных зарядов

$c$  - скорость света



*James Clerk Maxwell.*

МАКСВЕЛЛ Джеймс  
Клерк

# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Волновое уравнение

В отсутствие свободных зарядов и токов от уравнений первого порядка (уравнений Максвелла) можно перейти к замкнутым (каждое уравнение зависит только от одного - электрического или магнитного – поля) уравнениям второго порядка:

$$\Delta \mathbf{E} - \frac{\varepsilon\mu}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0,$$

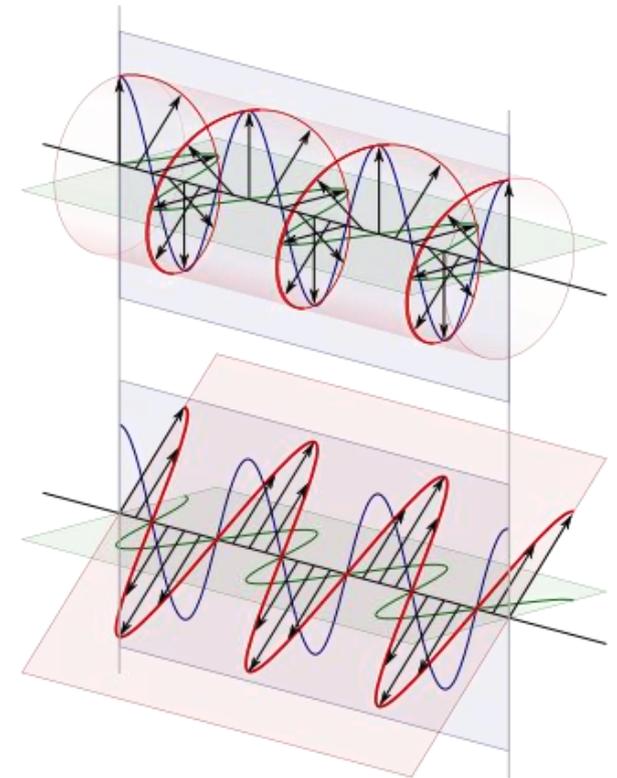
$$\Delta \mathbf{B} - \frac{\varepsilon\mu}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} = 0.$$

Одно из частных решений

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}\left(\mathbf{nr} - \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}t\right),$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{B}\left(\mathbf{nr} - \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}t\right),$$

- циркулярно и линейно поляризованная плоские волны



# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Гауссовский пучок

$$E(r, z) = E_0 \frac{w_0}{w(z)} \exp\left(\frac{-r^2}{w^2(z)}\right) \exp\left(-ikz - ik\frac{r^2}{2R(z)} + i\zeta(z)\right),$$

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2} \quad \text{- радиус пучка}$$

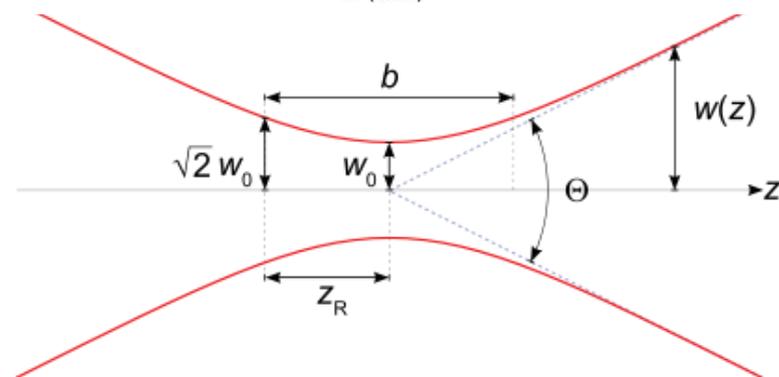
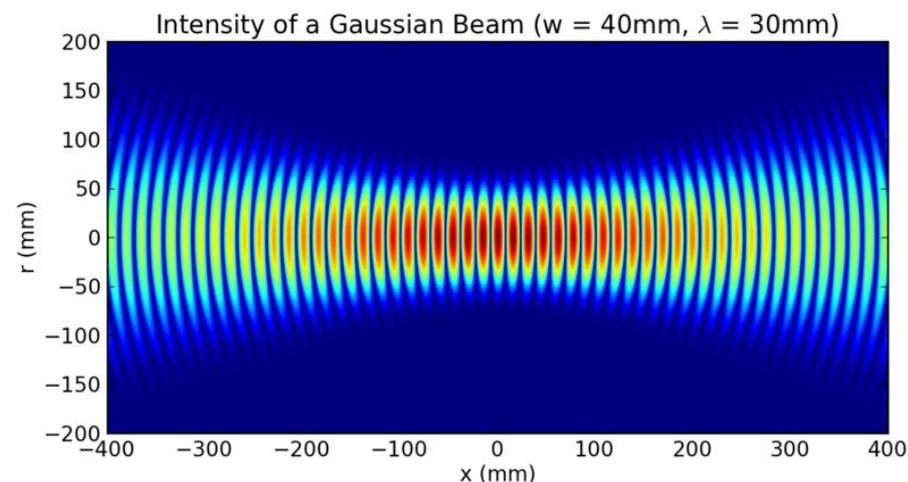
$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{z_R}{z}\right)^2\right] \quad \text{- кривизна фронта}$$

$$\zeta(z) = \arctan\left(\frac{z}{z_R}\right) \quad \text{- фазовый набег}$$

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \quad \text{- дифракционная длина}$$

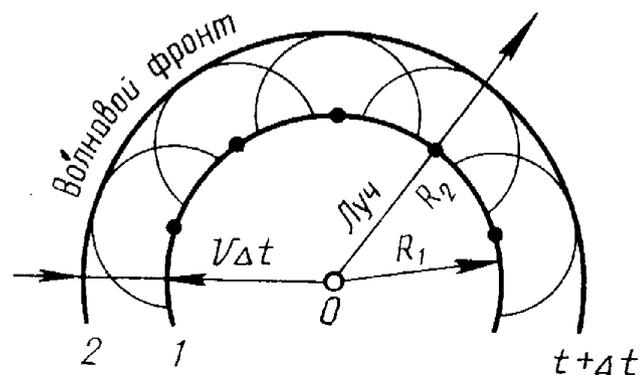
$$b = 2z_R = \frac{2\pi w_0^2}{\lambda} \quad \text{- конфокальный параметр}$$

$$\theta \simeq \frac{\lambda}{\pi w_0} \quad (\theta \text{ in radians.}) \quad \text{- угловая расходимость}$$



# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Проблема расходимости



*Сферический фронт*

На больших по сравнению с дифракционной длиной расстояниях  $L$  от источника излучения волновой фронт электромагнитной волны становится сферическим и вследствие закона сохранения энергии ее интенсивность меняется обратно пропорционально квадрату  $L$

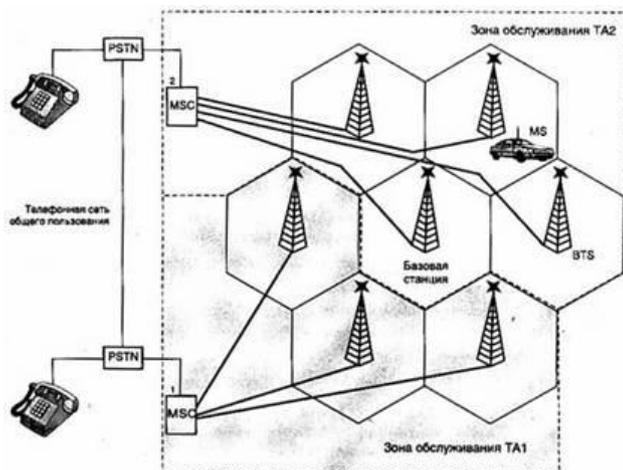
Решить эту проблему можно за счет использования специальных «направляющих» - линий связи, которые способны задать направление распространения электромагнитной волны и компенсировать ее угловую расходимость



*СВЧ волновод*

# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

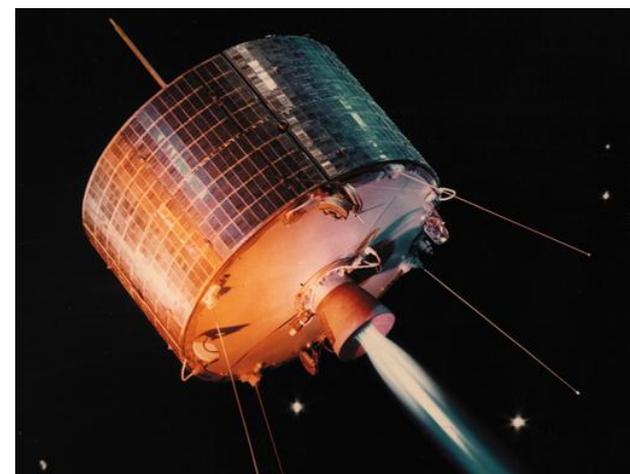
## Сотовая и спутниковая связь



*Сотовая сеть*

Сотовая связь - вид мобильной радиосвязи, основой которого является сотовая сеть. Общая зона покрытия делится на ячейки (соты), определяющиеся зонами покрытия базовых станций. Соты перекрываются и вместе образуют сеть

Спутниковая связь - вид радиосвязи, основанный на использовании спутников в качестве ретрансляторов, которые вынесены на высоту от сотен до десятков тысяч км. Так как зона видимости в этом случае - почти половина Земного шара, необходимость в цепочке ретрансляторов отпадает



*Спутник связи Syncom-1*

# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Радиоканал

Радиоканал - канал связи, в котором передача информации осуществляется с помощью радиоволн. Включает среду распространения радиоволн и устройства преобразования электрических сигналов в электромагнитное излучение (радиопередающее устройство) и электромагнитное излучение в электрические сигналы (радиоприемное устройство)



*Спектр электромагнитных волн*

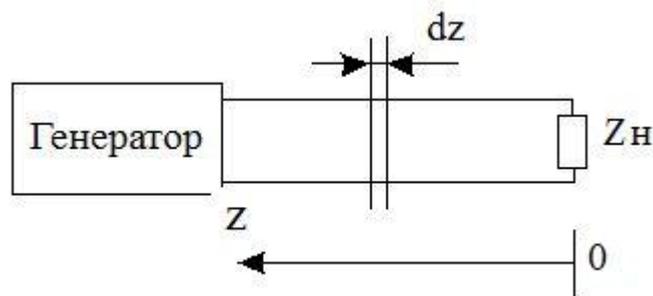
# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Радиоканал

Частоты	f	Волны	l	Использование
низкие	30 - 300 кГц	длинные	10 км - 1 км	радиовещание, радиосвязь
средние	0,3 - 3 МГц	средние	1 км - 100 м	радиовещание, радиосвязь
высокие	3 - 30 МГц	короткие	100 м - 10 м	радиовещание, радиосвязь
очень высокие	30 - 300 МГц	УКВ	10 м - 1 м	ТВ, радиовещание, радиосвязь
ультравысокие	0,3 - 3 ГГц	деци-метровые	1 м - 10 см	ТВ, радиосвязь, мобильная связь
сверхвысокие	3 - 30 ГГц	сантиметровые	10 см - 1 см	спутниковое ТВ, радиосвязь, беспроводные сети, навигация
крайне высокие	30 - 300 ГГц	миллиметровые	1 см - 1 мм	скоростная радиорелейная связь

# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Длинные линии

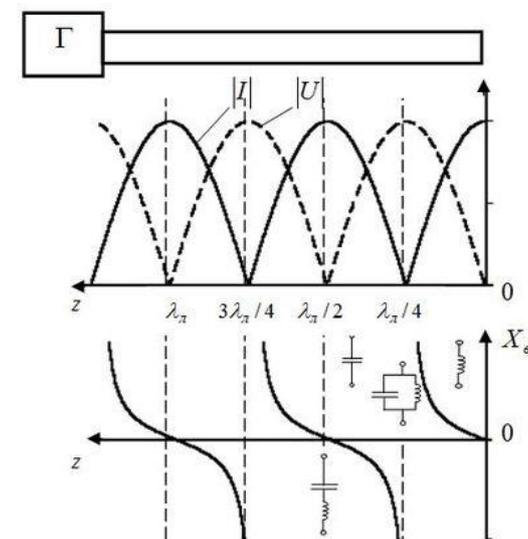


Длинная линия

Длинная линия - регулярная линия электропередачи, длина которой превышает длину волны колебаний, распространяющихся в ней, а расстояние между проводниками, из которых она состоит, значительно меньше этой длины волны

Три режима работы линии:

- режим бегущей волны - волна бежит от генератора к нагрузке, отраженная волна отсутствует;
- режим стоячей волны - амплитуда отраженной волны равна амплитуде падающей, энергия возвращается в генератор;
- режим смешанных волн - часть мощности падающей волны потребляется нагрузкой, а часть возвращается в генератор



Стоячие волны

# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Двухпроводные линии



*Двухпроводная линия*

Основной недостаток двухпроводной линии – ее открытость, т.е. допускается излучение электромагнитных волн в окружающее пространство и прием электромагнитных волн из окружающего пространства. Это приводит к потерям мощности и влиянию внешних помех на передачу сигнала

Излучение и прием электромагнитных волн происходят в местах нарушения прямолинейности двухпроводной линии (изломы в местах крепления проводов, изгибы из-за провисания проводов и др.)



*Полосковая линия*

# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Телеграфные уравнения

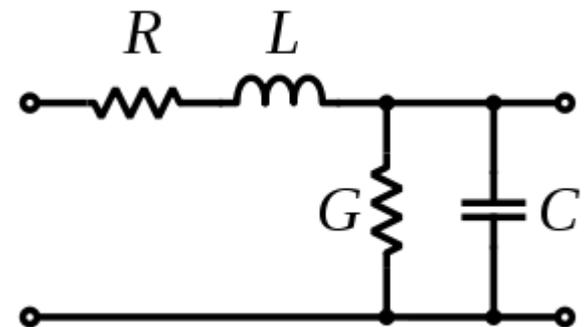


Телеграфные уравнения - линейные дифференциальных уравнения, описывающие распределение напряжения и тока в линии электропередачи и следующие из уравнений Максвелла. Уравнения получены Хевисайдом и применимы ко всем многопроводным линиям, включая телеграфные, радиочастотные, телефонные, силовые линии и линии постоянного тока

*Оливер Хевисайд*

Линия полагается состоящей из бесконечной цепи двухполюсников, каждый из которых эквивалентен ее бесконечно короткому участку. При этом:

- сопротивление участка описывается резистором  $R$
- магнитное поле вокруг проводов - индуктивностью  $L$
- электрическое поле между проводами - емкостью  $C$
- токи утечки - резистором с проводимостью  $G$



*Эквивалентная схема участка линии*

# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Телеграфные уравнения

Когда R и G малы, линия считается идеальной и:

$$\frac{\partial}{\partial x} I(x, t) = -C \frac{\partial}{\partial t} U(x, t)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} U(x, t) = -L \frac{\partial}{\partial t} I(x, t)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} I = \frac{1}{LC} \frac{\partial^2}{\partial x^2} I.$$

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} U = \frac{1}{LC} \frac{\partial^2}{\partial x^2} U$$

$$\frac{\partial^2 I(x)}{\partial x^2} + \omega^2 LC \cdot I(x) = 0$$

$$\frac{\partial^2 U(x)}{\partial x^2} + \omega^2 LC \cdot U(x) = 0$$

В стационарном случае для гармонической волны находим скорость распространения:

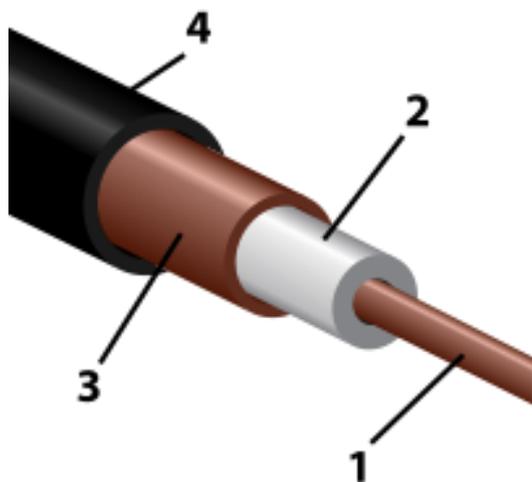
$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

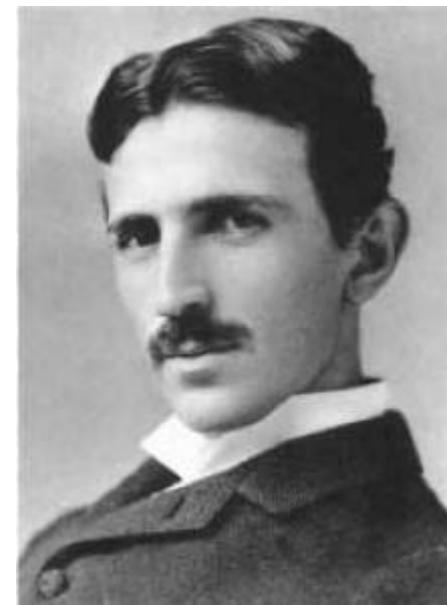
## Коаксиальный кабель

Устройство коаксиального кабеля

- 1 — внутренний проводник (провод),
- 2 — изоляция (полиэтилен),
- 3 — внешний проводник (оплетка),
- 4 — оболочка (полиэтилен)



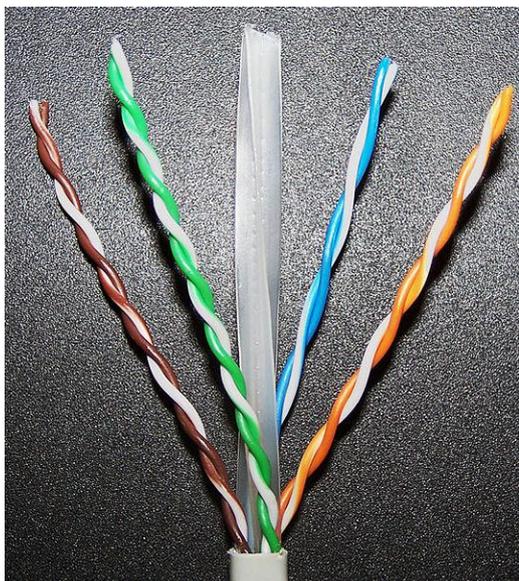
*Никола Тесла*



- 1894 - Никола Тесла, патент на электрический проводник для переменных токов
- 1929 - Эспеншид и Эффель, Bell, патент на современный коаксиальный кабель
- 1936 - Bell, телевизионная линия передачи (Филадельфия -Нью-Йорк)

# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Витая пара

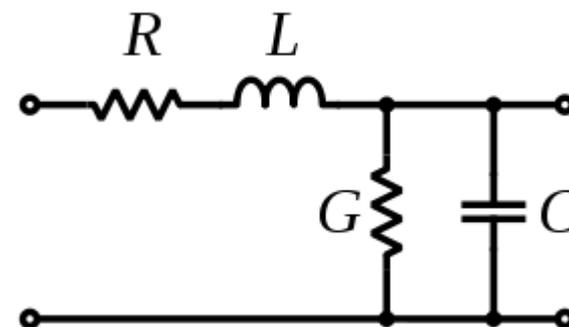


Витая пара - тип кабеля связи в форме одной или нескольких пар изолированных проводников, скрученных между собой (с небольшим числом витков на единицу длины) и покрытых пластиковой оболочкой.

Скручивание повышает степень связи проводников одной пары (помеха одинаково влияет на оба провода), что позволяет уменьшить помехи от внешних источников, а также наводок для дифференциальных сигналов

В зависимости от защиты - заземленной оплетки или фольги, определяют разновидности технологии:

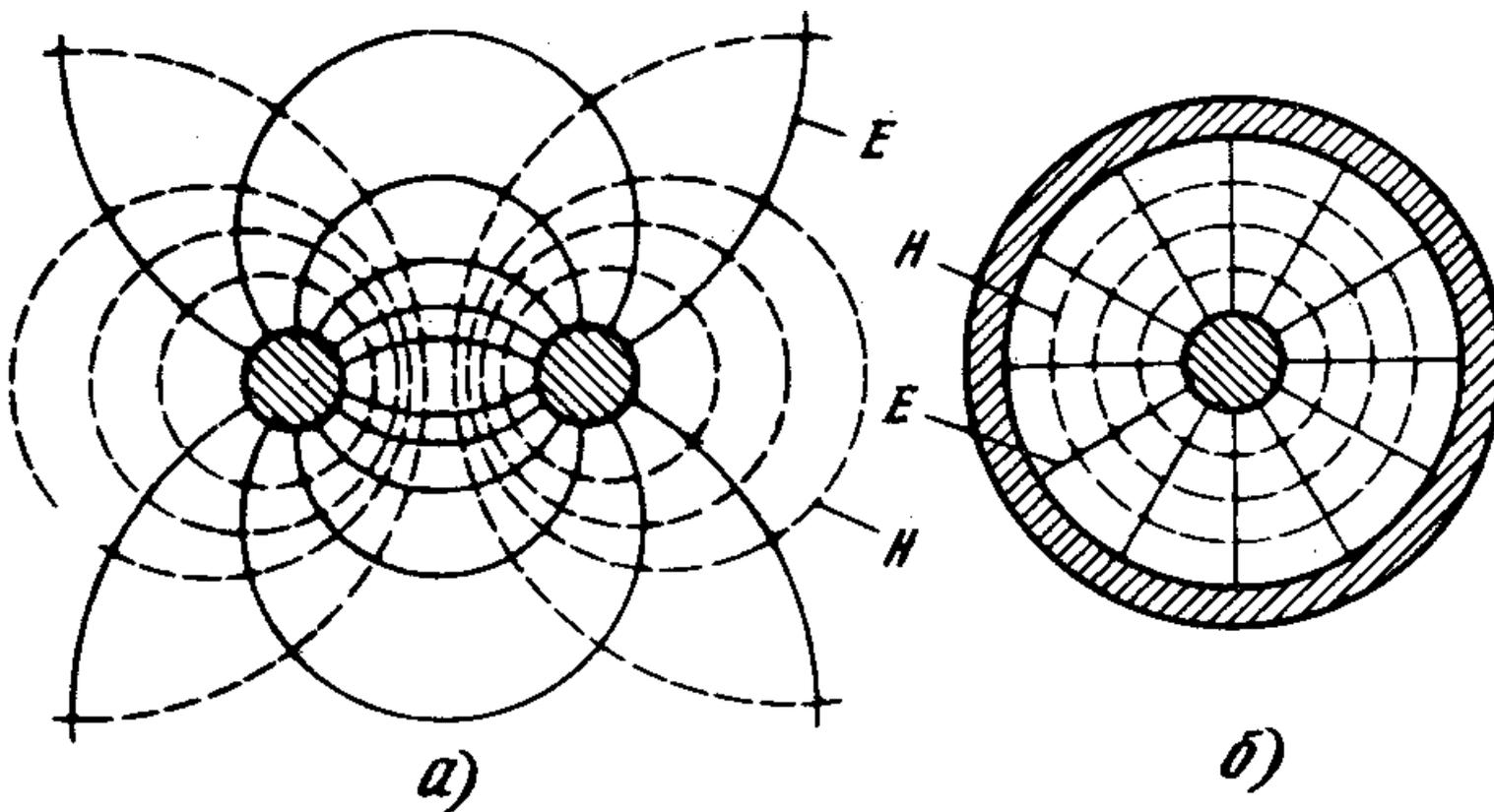
- неэкранированная пара (UTP, нет защитного экрана)
- фольгированная пара (FTP, общий экран из фольги)
- экранированная пара (STP, экран для каждой пары и общий внешний экран)
- фольгированная экранированная пара (S/FTP, экран из медной оплетки и каждая пара в фольге)



*Эквивалентная схема участка линии*

# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Распределение полей



*Распределение электрического и магнитного полей  
в витой паре (а) и коаксиальном кабеле (б)*

# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Проблема поглощения



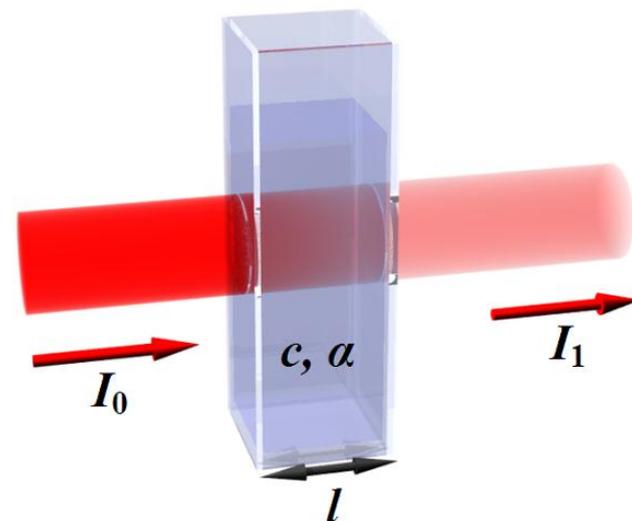
Пьер Бугер

Закон Бугера описывает экспоненциальное ослабление интенсивности  $I$  плоской электромагнитной волны при ее распространении в поглощающей среде

$$I(l) = I_0 e^{-k_\lambda l}$$

где  $I_0$  - входная интенсивность,  $l$  - толщина слоя,  $k_\lambda$  - коэффициент поглощения, зависящий от длины волны  $\lambda$

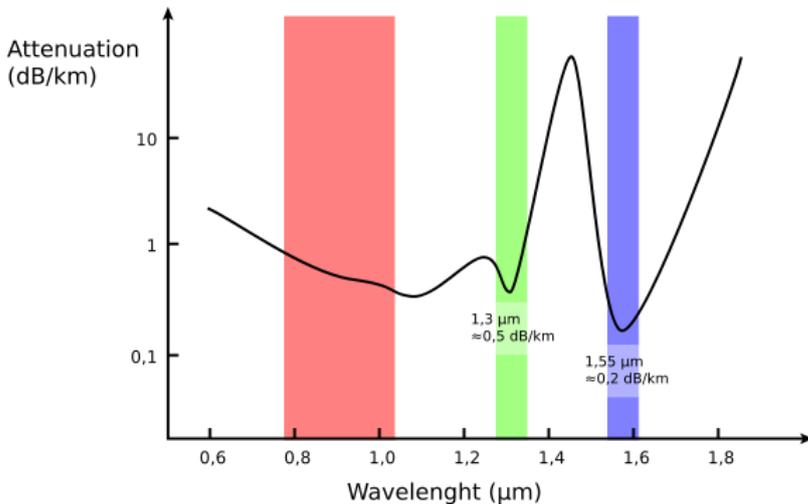
Поглощение электромагнитной волны - уменьшение ее энергии при распространении в веществе, протекающее вследствие преобразования ее энергии во внутреннюю энергию вещества (или какие-то другие формы энергии)



Оптический телеграф

# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

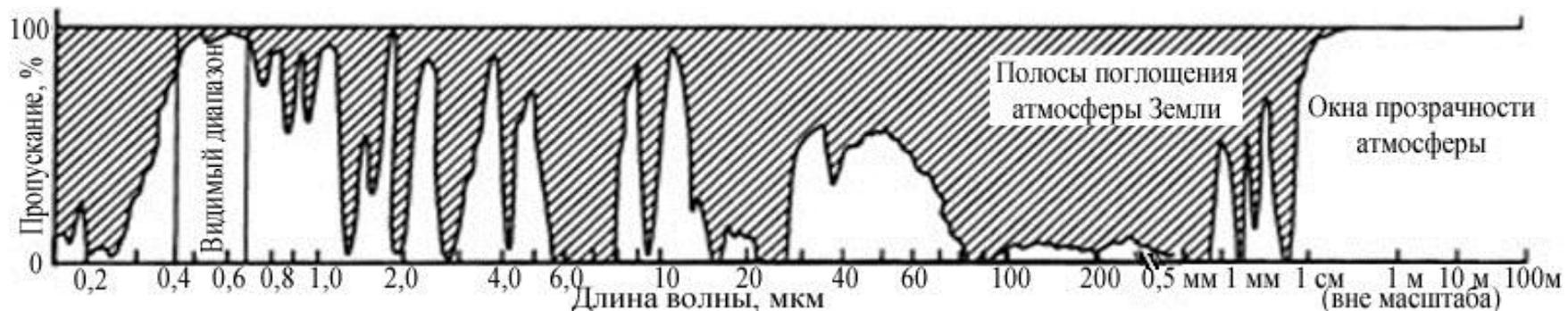
## Проблема поглощения



*Окна прозрачности  
волокна и атмосферы*

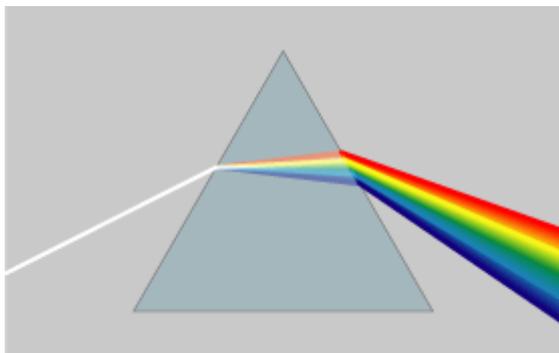
Окна прозрачности - диапазоны длин волн, в которых имеет место меньшее, по сравнению с другими диапазонами, затухание электромагнитных волн в среде, в частности - в оптическом волокне или атмосфере

Например, стандартное ступенчатое оптическое волокно (SMF) имеет три окна прозрачности: 850 нм, 1310 нм и 1550 нм



# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Проблема дисперсии

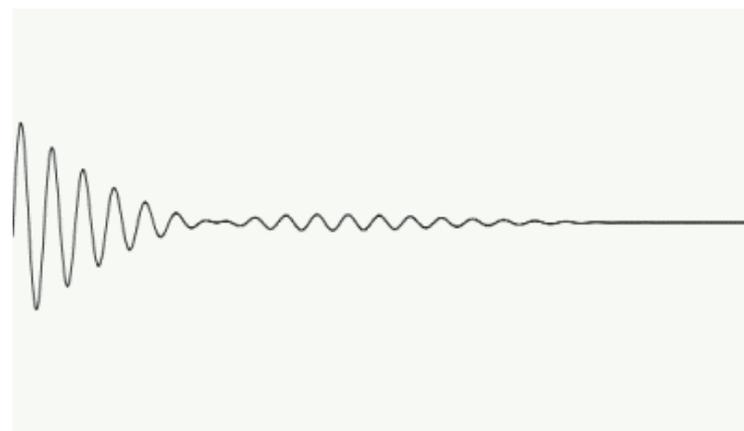


*Дисперсия*

Дисперсия - зависимость фазовой скорости электромагнитной волны в веществе от частоты (или длины волны). Явление дисперсии экспериментально открыто Ньютоном (~ 1672 год), хотя теоретически объяснено значительно позднее

Если фазовые скорости волн-составляющих волнового пакета за счет дисперсии будут разными, то первоначальная форма пакета не будет сохраняться и он будет «расплываться»

Решить проблему дисперсии можно пользуясь достаточно длинными импульсами на сравнительно коротких трассах либо в т.н. солитонных режимах распространения



*Волновой пакет без дисперсии*

# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Ретрансляция

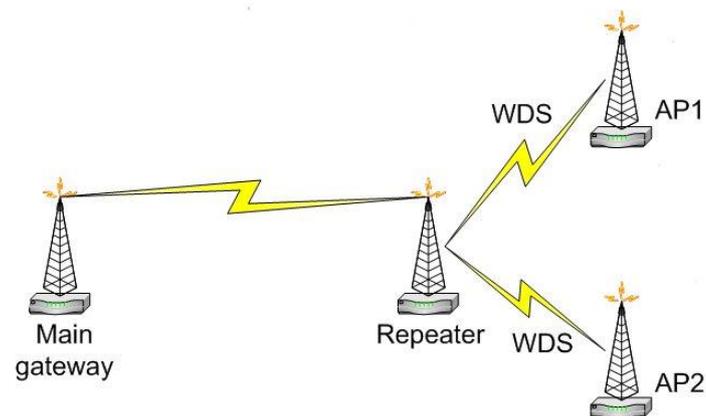


*Радиоретранслятор*

Активный ретранслятор - приемо-передающее устройство, располагающееся на промежуточных пунктах линий связи, усиливающее принимаемые сигналы и передающее их дальше.

В качестве промежуточного пункта может использоваться как неподвижный объект (башня радиорелейной линии, здание), так и подвижный объект (например, спутник связи)

Ретрансляция в цифровых линиях связи подразумевает полное восстановление исходного цифрового сигнала с последующим его усилением и дальнейшим кодированием. В этом случае возможна неограниченная длина линии передачи



*Идея ретрансляции*

# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Свет

Свет - поперечная волна электромагнитного поля

Одновременно свет можно описать и как поток фотонов

Зеленый свет

длина волны,  $l \approx 0.0005 \text{ мм} = 0.5 \text{ мкм}$

частота,  $f \approx 6 \times 10^{14} \text{ Гц}$

1 Ватт  $\approx 3 \times 10^{18}$  фотонов/секунду

На больших по сравнению с дифракционной длиной расстояниях  $L$  от источника излучения волновой фронт электромагнитной волны становится сферическим и вследствие закона сохранения энергии ее интенсивность меняется обратно пропорционально квадрату  $L$

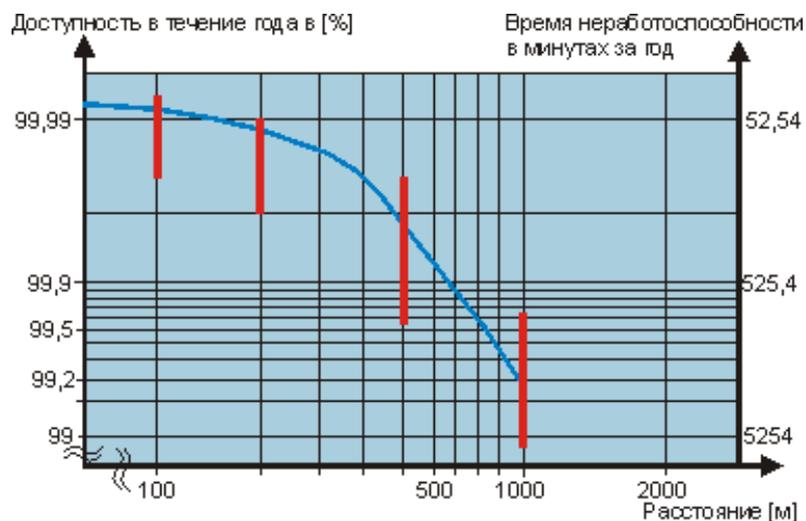
*Спектр электромагнитных волн*



# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Открытые линии связи

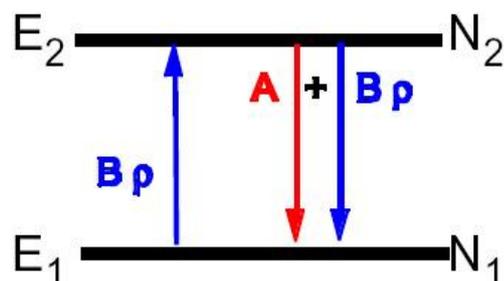
Беспроводные линии связи			
	Широкополосные системы	Оптические линии	Радиорелейные системы
Скорость передачи	несколько Мбит/с	> 150 Мбит/с	< 150 Мбит/с
Максимальная длина	несколько км	< 2 км	< 50 км
Угроза подключения	высокая	очень высокая	очень высокая
Интерференция	имеется	отсутствует	мала
Стоимость	> 5000 €	> 6000 €	> 20000 €



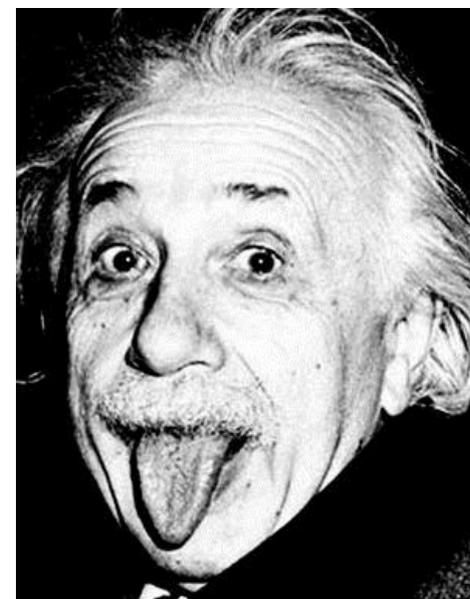
*Вероятность отказа при плохой погоде*

# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Чем может помочь лазер ?



1916 – Альберт Эйнштейн постулирует существование двух разных типов переходов в атоме: спонтанных и индуцированных



«Клонирование» фотонов открывает возможность создания лазеров – «фабрик» по производству идентичных квантов света

*ЭЙНШТЕЙТ Альберт*



*Клоны овечки Долли*

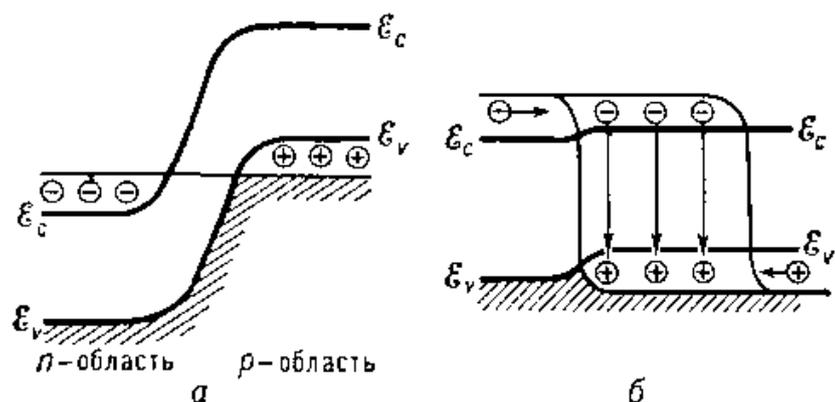
# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Чем может помочь лазер ?

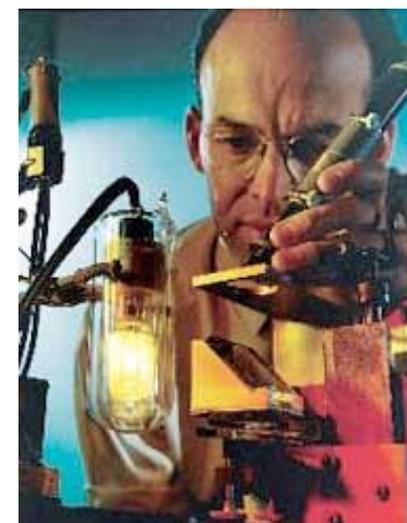
1962 - группы из General Electric, IBM и MIT Lincoln Laboratory разрабатывают лазер на GaAs с накачкой за счет инжекции носителей

При прямом смещении дырки из p-области и электроны из n-области инжектируются в p-n переход. При их рекомбинации в соответствии с законом сохранения энергии испускается фотон.

Процесс испускания может быть спонтанным (светодиод) либо вынужденным (действие фотона той же частоты, лазерный диод)



*Инжекция носителей*



*ХОЛЛ Роберт*

В случае индуцированного испускания рождается клон: направление распространения, поляризация и фаза второго фотона в точности совпадают с теми же характеристиками первого

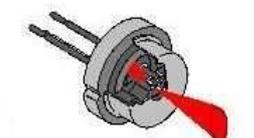
# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Чем может помочь лазер ?

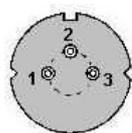
Больше всего распространены лазеры на гетероструктурах, лазеры с распределенной обратной связью (РОС-лазеры) и лазеры на квантоворазмерных структурах (КРС-лазеры)



*АЛФЕРОВ Жорес Иванович*



Головка лазерного диода



1: ЛД-лазерный диод  
2: Общ.  
3: ФД-фотодиод

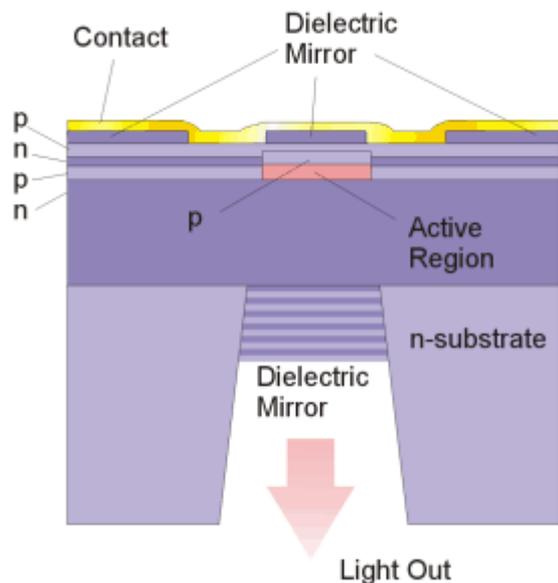
Применяемые лазеры обычно работают в областях прозрачности кварцевого волокна: 0.82 - 0.90 мкм, 1.30 - 1.33 мкм и ~ 1.55 мкм

Мощность излучения 1 - 5 мВт и ее увеличение нецелесообразно, т.к. срок службы лазеров резко падает. Ширина спектра излучения около 0.1 нм при уровне боковых частот ниже 20 дБ. В одночастотных лазерах, полуширина спектра генерации может быть 500 МГц и менее

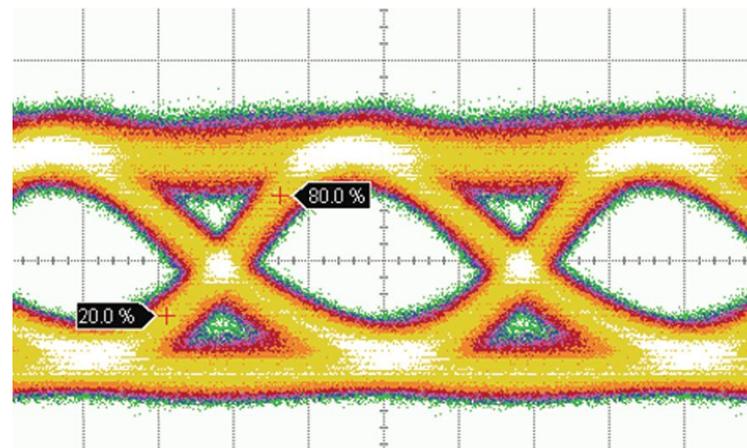
# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Чем может помочь лазер ?

Частота модуляции для современных коммерческих скоростных лазеров составляет от нескольких десятков - сотен МГц до 1.5 - 2.5 ГГц. Достигнута скорость передачи сигналов свыше 25 Гбит/с



*Лазер с вертикальным резонатором*

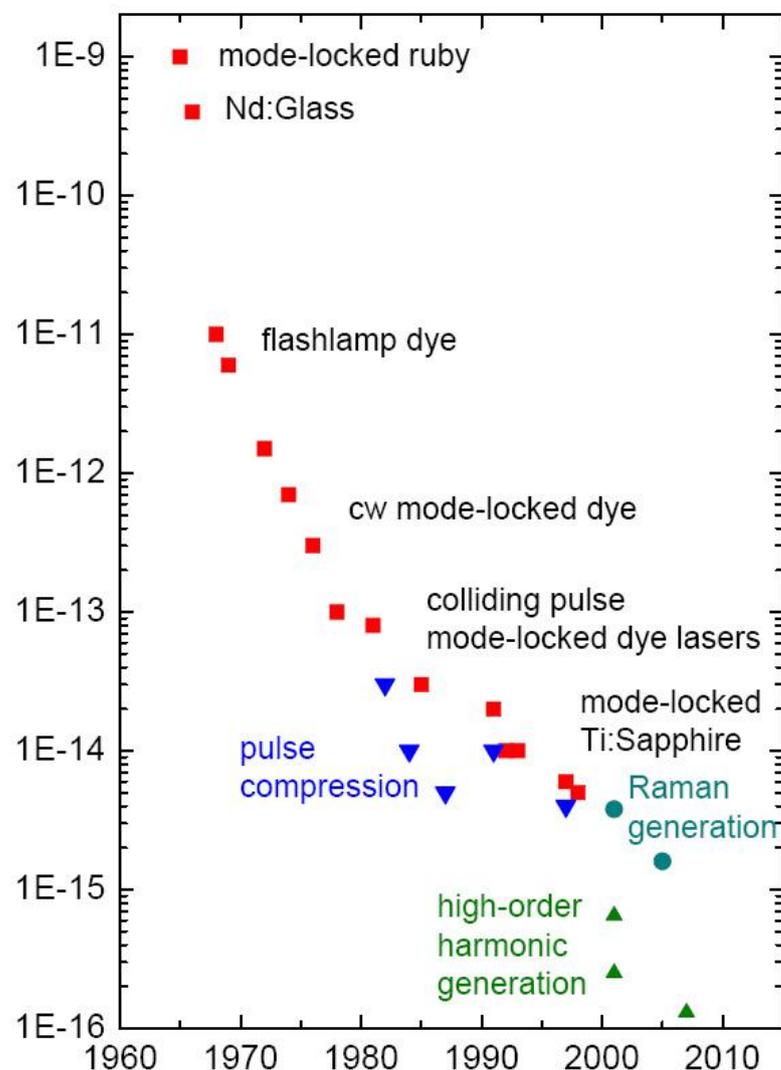


*«Глаз-диаграмма» на скорости 25 Гбит/с*

Большие надежды возлагаются на лазеры с вертикальным резонатором (VCSEL, vertical-cavity surface-emitting lasers). В таких лазерах генерируется одна продольная мода диаметром 20-30 мкм. Прикладывая электрическое поле удается осуществлять плавную перестройку длины волны генерации в полосе 1530-1560 нм для спектрального мультиплексирования

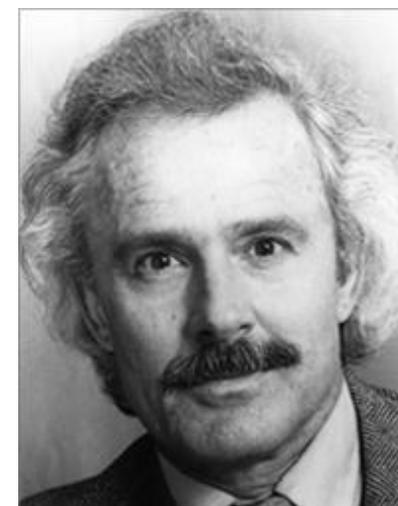
# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Чем может помочь лазер ?



1963 – Режим генерации «гигантских» импульсов - модуляция добротности

*ХЕЛВАРС Роберт*



1965 - Генерация коротких импульсов - синхронизация продольных мод

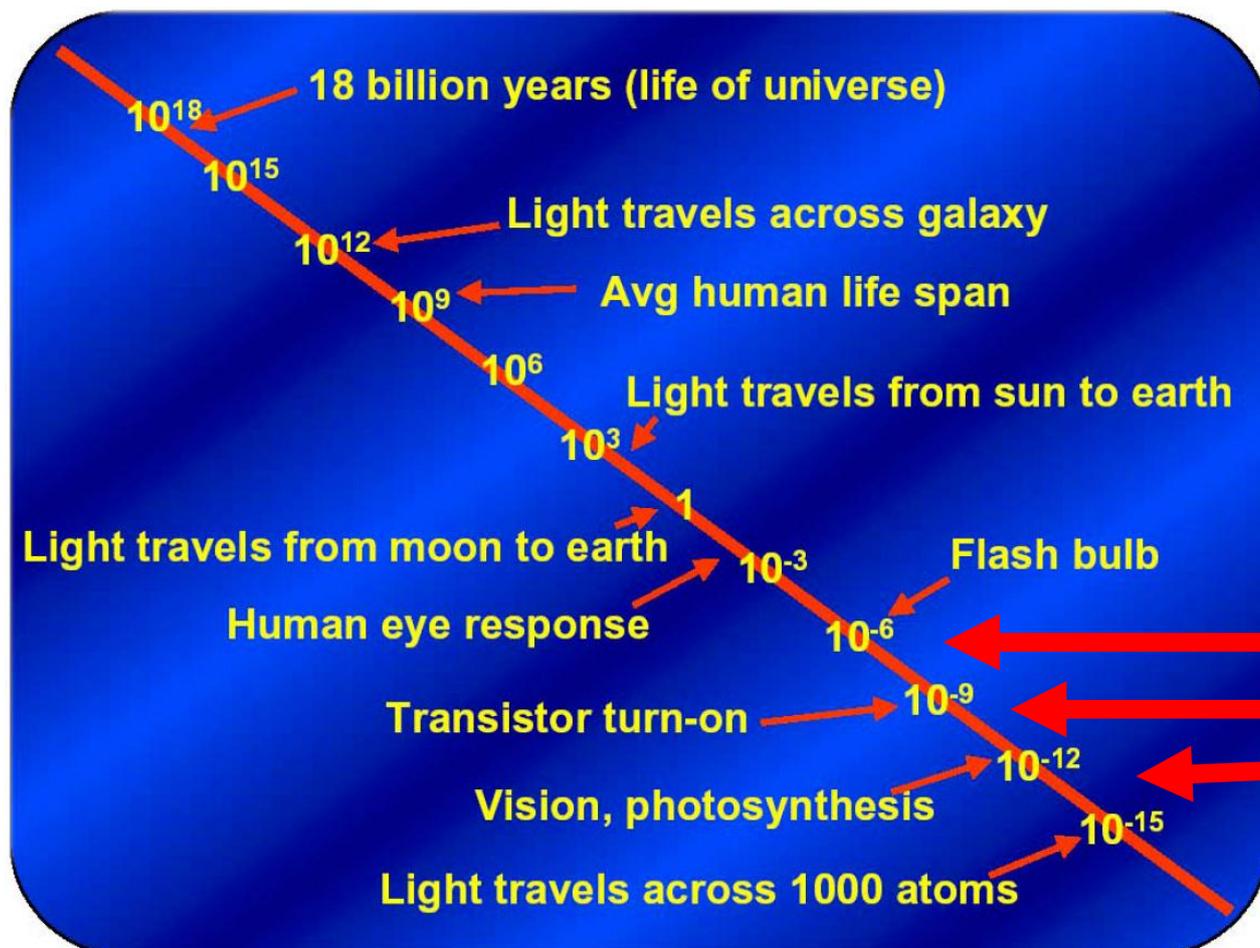
*ДеМАРИЯ Энтони*



# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Чем может помочь лазер ?

Шкала временных интервалов



Свойства излучения:

Монохроматичность (!),  
направленность (!),  
когерентность (!),  
генерация коротких  
импульсов (!)

Импульсные режимы:

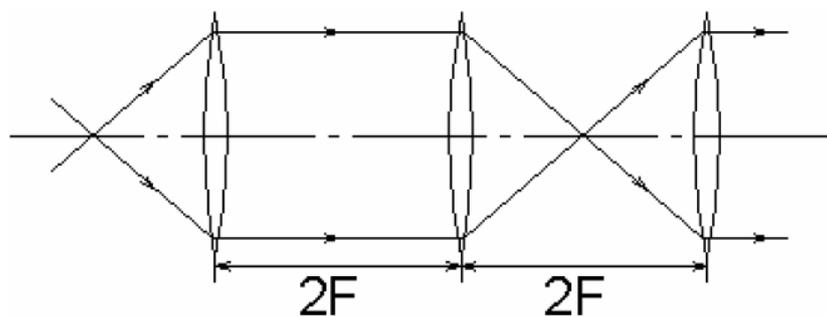
Свободная генерация  
Модуляция добротности  
Синхронизация мод

# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

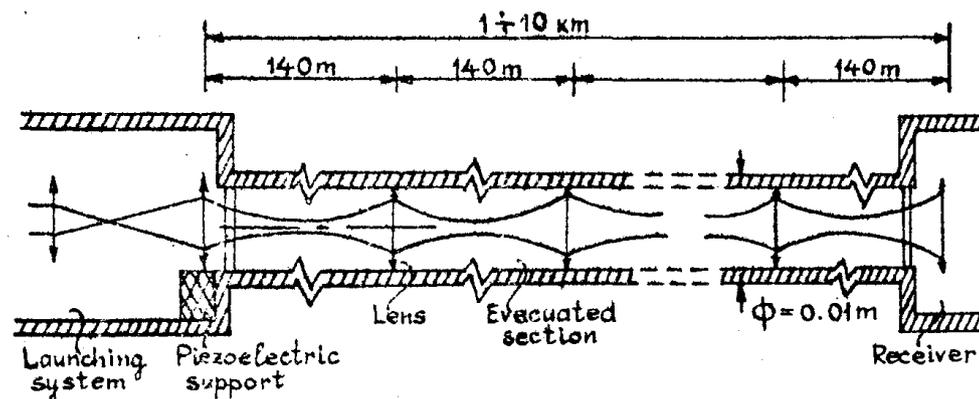
## Линзовый волновод

1961 - Губо и Шверинг, линия передачи базе конфокального линзового волновода.

Линзовый волновод - набор положительных линз, расположенных на двойном фокусном расстоянии друг от друга. Назначение линз - компенсировать дифракционную расходимость пучка оптического излучения в линии. Основные недостатки - необходимость четкой (с точностью около 20 мкм) установки расстояний, огромные (~100 дБ/км) потери и стоимость. Скорость передачи информации близка к радиорелейным линиям связи



Линзовый волновод



Проект линии связи

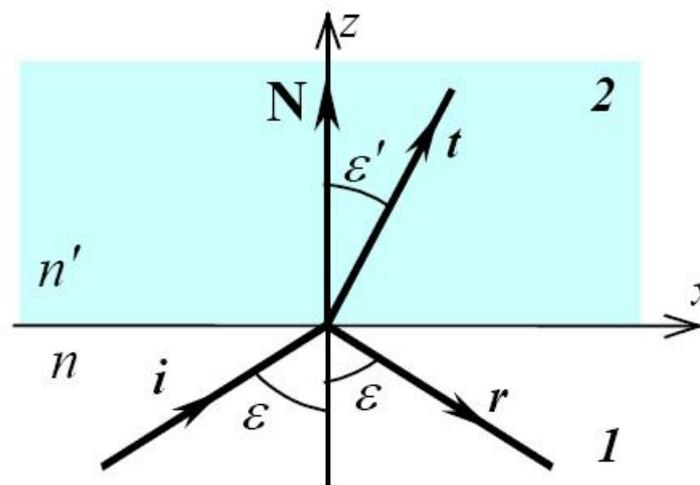
# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Взаимодействие со средой

В оптически однородной среде:

изменение скорости волны - показатель преломления  $n$   
изменение ее амплитуды - коэффициент поглощения  $\mu_a$

- На границах раздела двух сред (изменение  $n$  и  $\mu_a$ ) происходит отражение и преломление

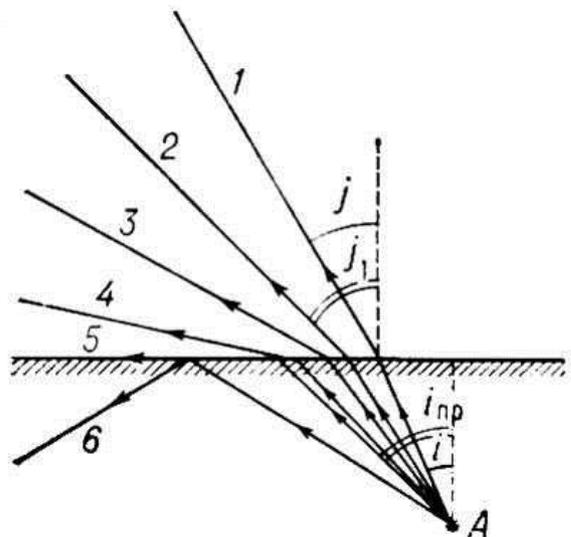


*Законы отражения и преломления*

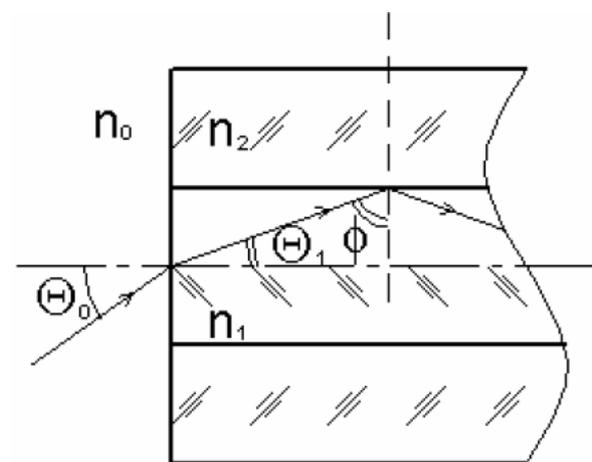
# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Полное внутреннее отражение

Полное внутреннее отражение - отражение электромагнитных волн от границы раздела двух сред при условии, что волна падает из среды, где скорость ее распространения меньше (показатель преломления больше), при угле падения, превосходящем критический угол. При этом падающая волна отражается полностью, а коэффициент отражения не зависит от длины волны



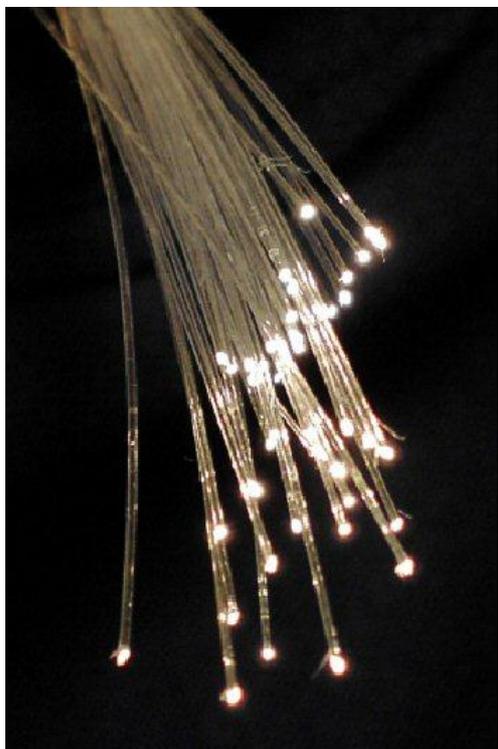
*Ход лучей при наклонном падении*



*Ход луча света в световоде*

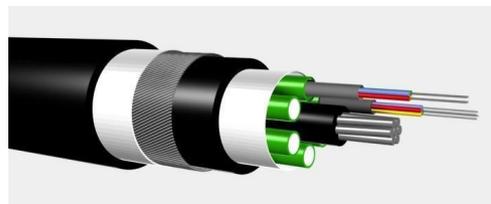
# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Оптические волокна и кабели



Оптическое волокно имеет круглое сечение и состоит из сердцевины и оболочки. Показатель преломления сердцевины выше, чем оболочки. Например, если показатель преломления оболочки равен 1,474, то сердцевины - 1,479. Поэтому свет, направленный в сердцевину, так по ней и распространяться.

Возможны более сложные конструкции: вместо ступенчатого изменения показателя преломления могут использоваться волокна с градиентным профилем показателя преломления, форма сердцевины может отличаться от цилиндрической. Такие конструкции обычно нужны для удержания поляризации, снижения потерь, изменения дисперсии и др.

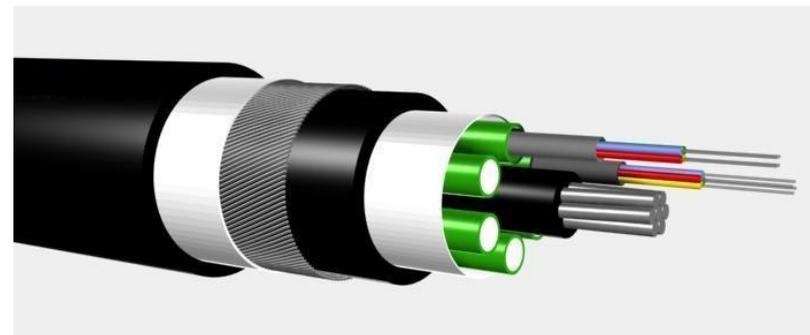


Волокна, используемые в телекоммуникациях, как правило, имеют диаметр  $125 \pm 1$  мкм. Диаметр сердцевины может меняться в зависимости от типа волокна и стандартов

# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Оптические волокна и кабели

Диаметр сердцевины в одномодовом волокне от 7 до 9 мкм. Благодаря этому по нему может распространяться единственная мода и исключаются дисперсионные искажения



Существует три основных типа одномодовых волокон:

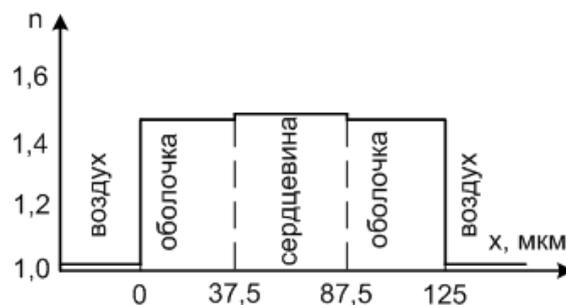
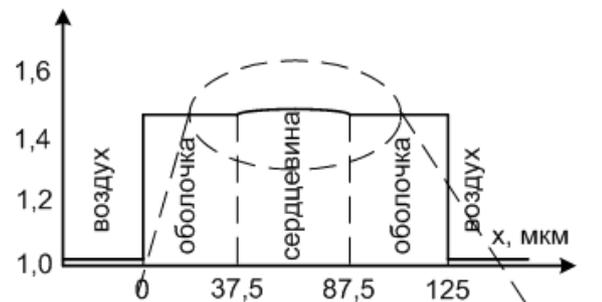
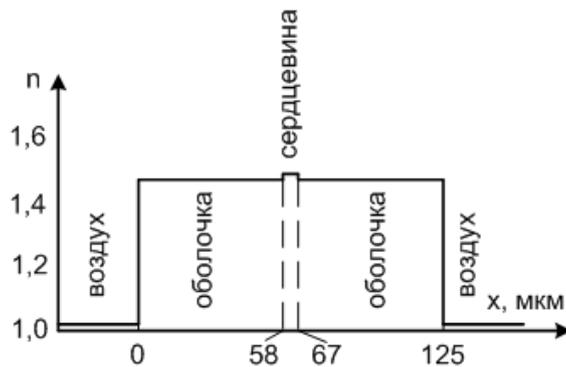
- ступенчатое волокно с несмещенной дисперсией (SMF, применяется в большинстве оптических систем связи);
- волокно со смещенной дисперсией (DSF), в котором за счет использования примесей область нулевой дисперсии смещена в 3-е окно прозрачности (минимум затухания);
- волокно с ненулевой смещенной дисперсией (NZDSF)

Многомодовые волокна отличаются диаметром сердцевины (50 мкм в европейском стандарте и 62,5 мкм в североамериканском и японском стандартах). Из-за этого по такому волокну распространяются несколько мод и световой импульс испытывает дисперсионные искажения.

# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Профиль показателя преломления

Волокна делят на ступенчатые и градиентные. В ступенчатых - показатель преломления от оболочки к сердцевине меняется скачком. В градиентных - показатель преломления сердцевины плавно растет от края к центру. Благодаря этому снижается роль дисперсии. Профиль показателя преломления градиентного волокна может быть параболическим, треугольным, ломаным и т.д.

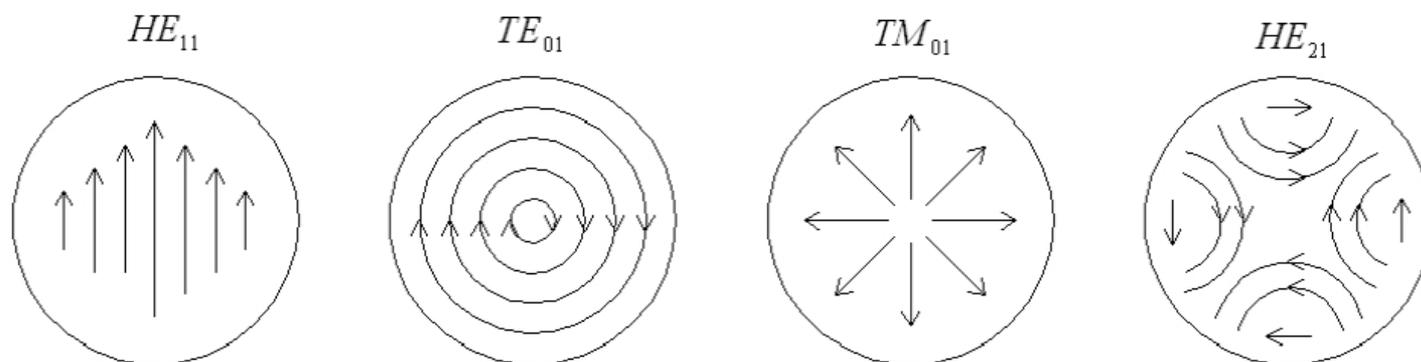


Полимерные (пластиковые) волокна производят диаметром 50, 62.5, 120 и 980 мкм с оболочкой диаметром 490 и 1000 мкм

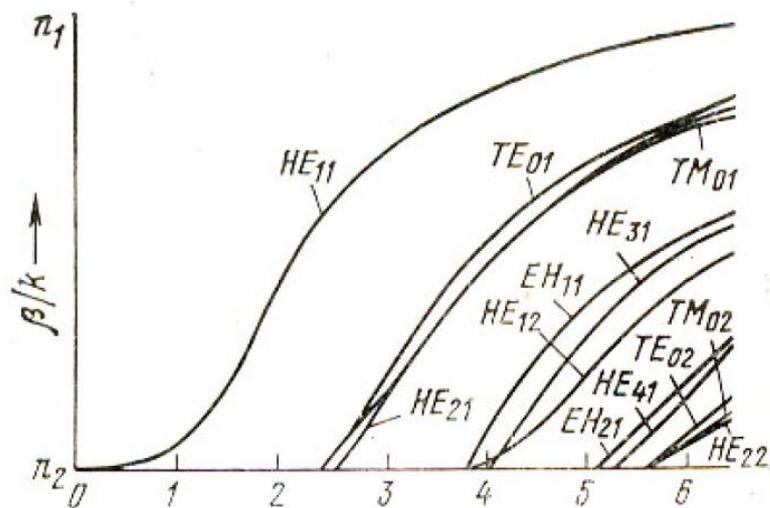
*Ступенчатые и градиентные волокна*

# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Моды и их дисперсия



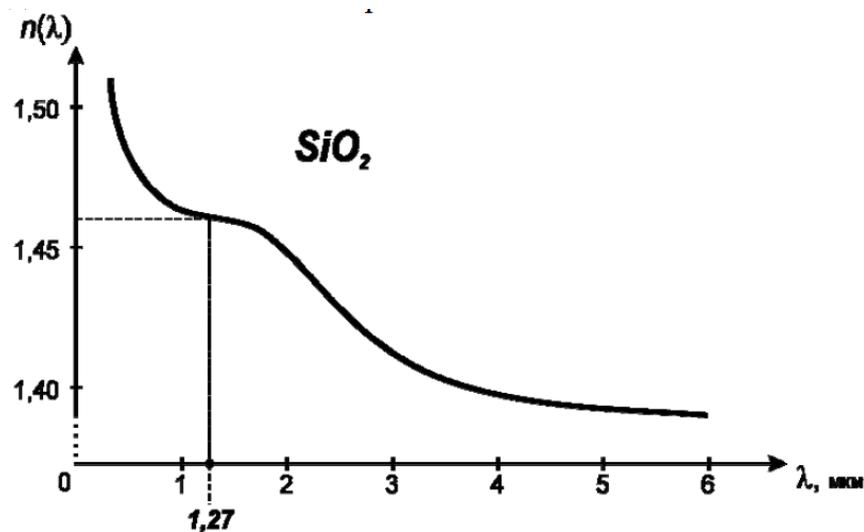
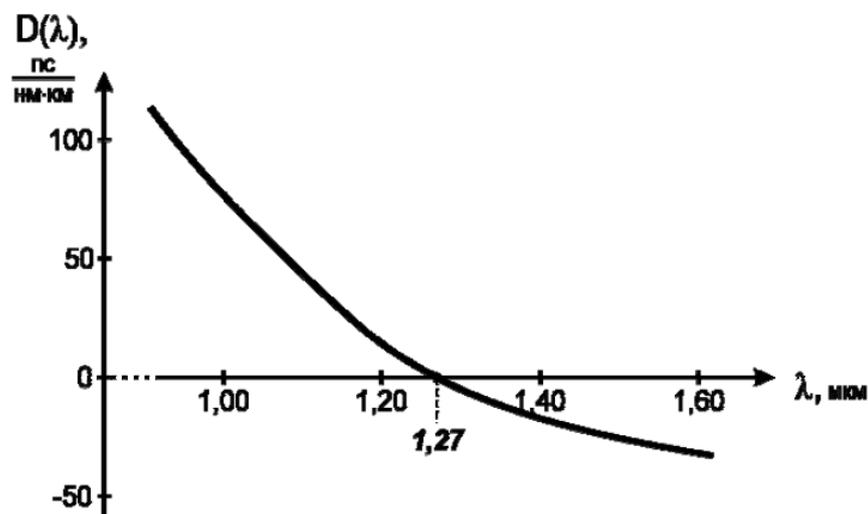
*Распределение электрического поля в поперечном сечении сердцевины*



*Постоянные распространения разных мод*

# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Моды и их дисперсия



Показатель преломления кварцевого стекла

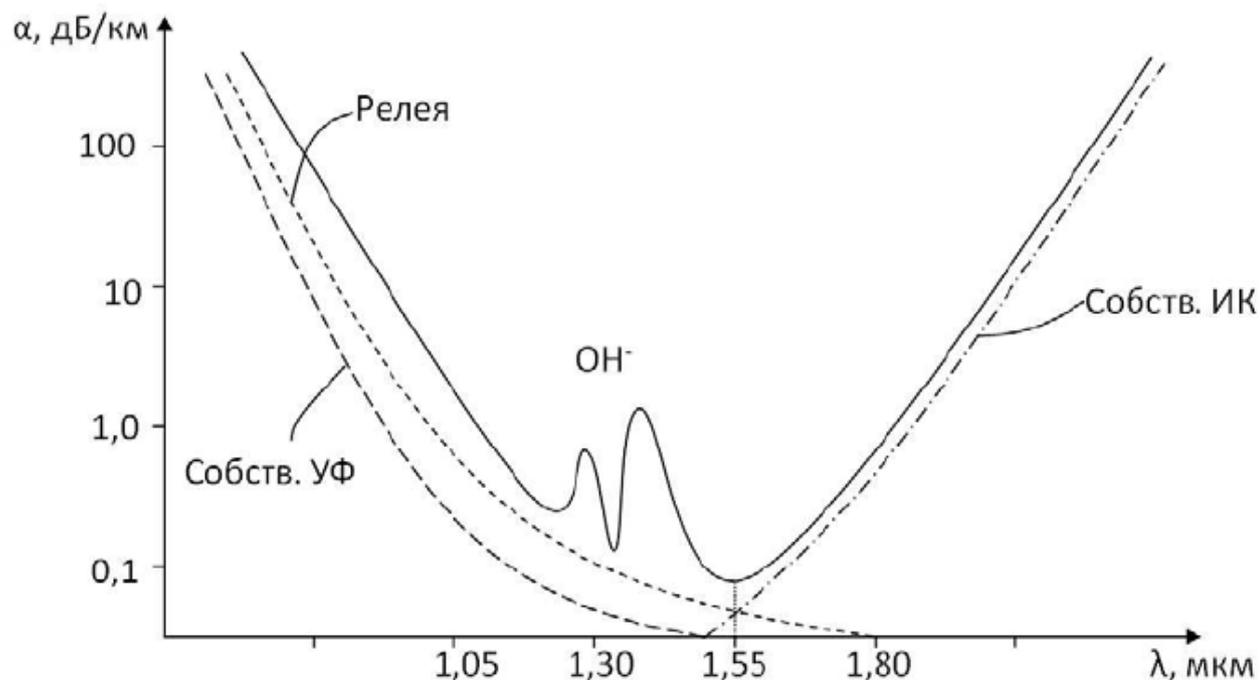
и его материальная дисперсия  $D_m = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2}$

# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Моды и их дисперсия

Абсолютный минимум оптических потерь в одномодовом кварцевом волокне составляет примерно 0.125 дБ/км на длине волны 1.55 мкм.

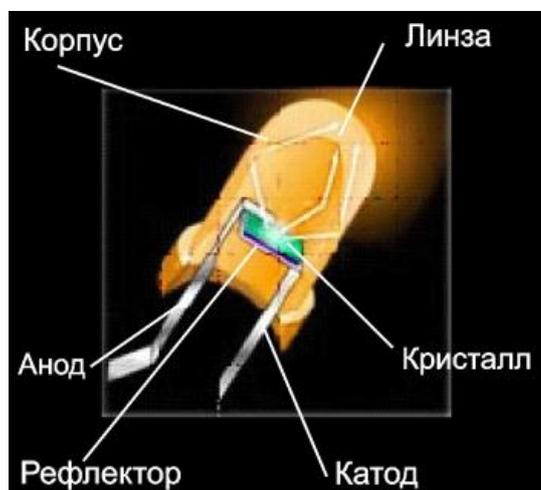
Минимальное затухание в двух других окнах прозрачности (длины волн 0.85 и 1.3 мкм) около 2.5 и 0.35 дБ/км соответственно



*Вклады различных процессов в коэффициент затухания одномодового кварцевого волокна*

# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Светодиод и полупроводниковый лазер



Светодиод

Параметр	Светодиод (LED)	Инжекционный лазер
Выходная мощность	0,5 - 10 мВт	3 - 10 мВт
Время нарастания	1 - 20 нс	1 - 2 нс
Диапазон тока смещения	5 - 150 мА	100 - 500 мА

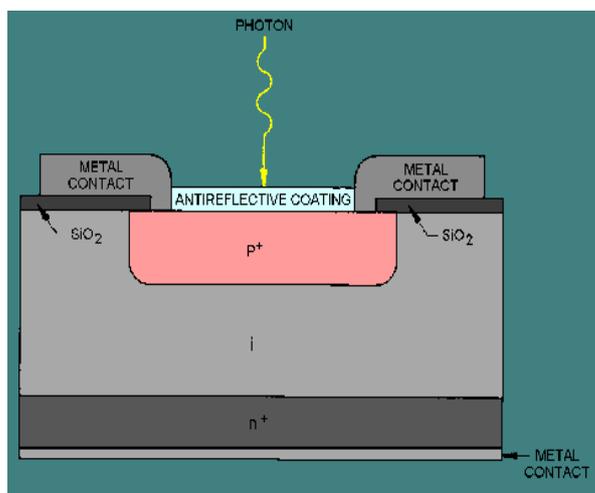
В низкоскоростных ( $< 10$  Мбит/с) линиях связи небольшой (0.1-1.0 км) длины источниками света часто являются светодиоды сравнительно малой мощности (до 0.5 мВт) с большой (около 20-30 нм) шириной спектра излучения.

Принцип действия светодиодов основан на спонтанной рекомбинации электронно-дырочных пар в активной области гетеро- либо квантоворазмерной структуры. Диапазон рабочих длин волн от 0.4 до 1.6 мкм

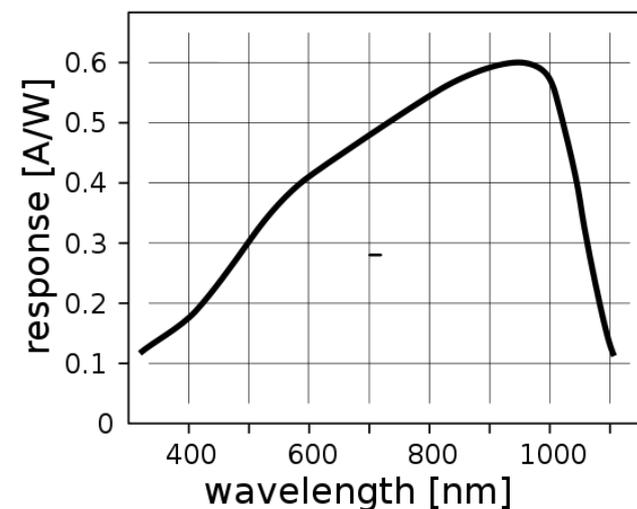
# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## pin фотодиод

pin-фотодиод - структура из p- и n-полупроводников, разделенная сравнительно протяженной i-областью. При поглощении кванта в i-области образуется электрон и дырка. Во внешнем поле они дрейфуют, создавая электрический ток в замкнутой цепи фотоприемника. Спектральная чувствительность определяется типом структуры, при этом красная граница фотоэффекта составляет ~0.9 мкм для GaAs, 1.1 мкм для Si и 1.7 мкм для Ge. Временные характеристики определяются толщиной i-слоя, скоростью дрейфа и собственной емкостью. Время нарастания может достигать 10-100 пс

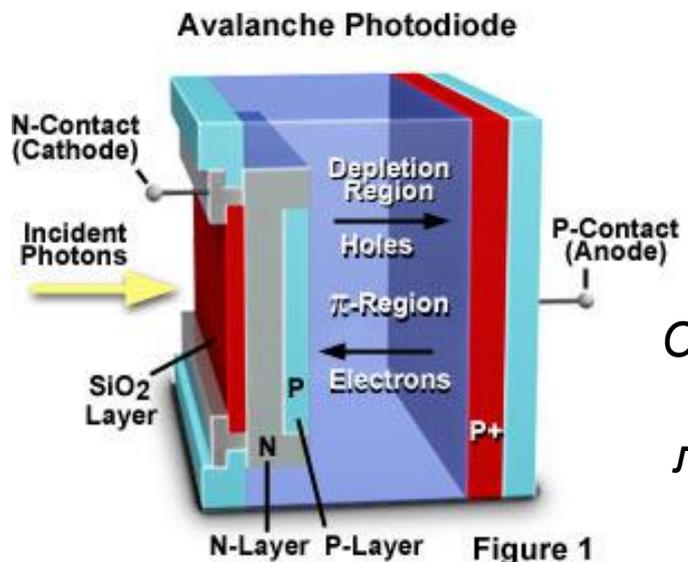


*Si pin-фотодиод и его  
спектральная  
чувствительность*

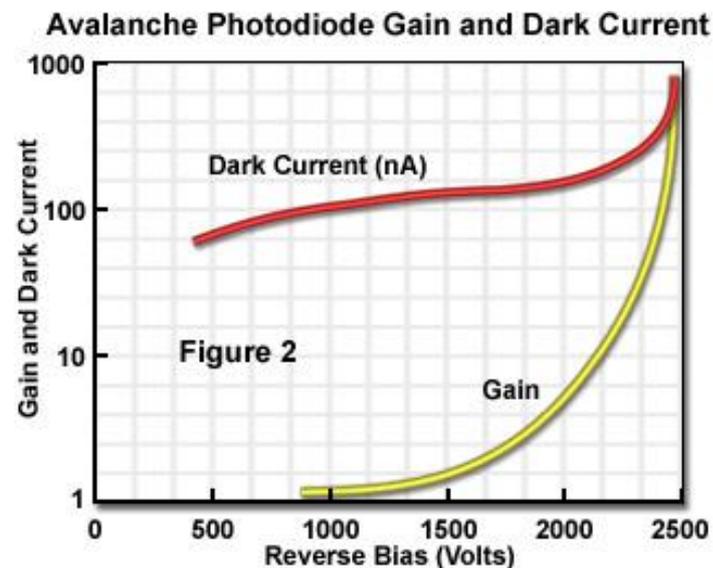


# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Лавинный фотодиод



*Структура, усиление и темновой ток (шум) лавинного фотодиода*



Лавинный фотодиод - полупроводниковый фотоприемник с внутренним усилением фототока. Между областью поглощения света (р-областью) и n-областью полупроводниковой р-п структуры расположен дополнительный р-слой. При высоком напряжении обратного смещения носители в р-области приобретают кинетическую энергию, достаточную для ударной ионизации атомов кристаллической решетки. Благодаря большой ( $\sim 10^5$  В/см) напряженности электрического поля первичная электронно-дырочная пара создает сотни вторичных пар, что увеличивает фототок. Полоса рабочих частот достигает 80 ГГц, а основной недостаток - большие шумы

# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Фотоприемники

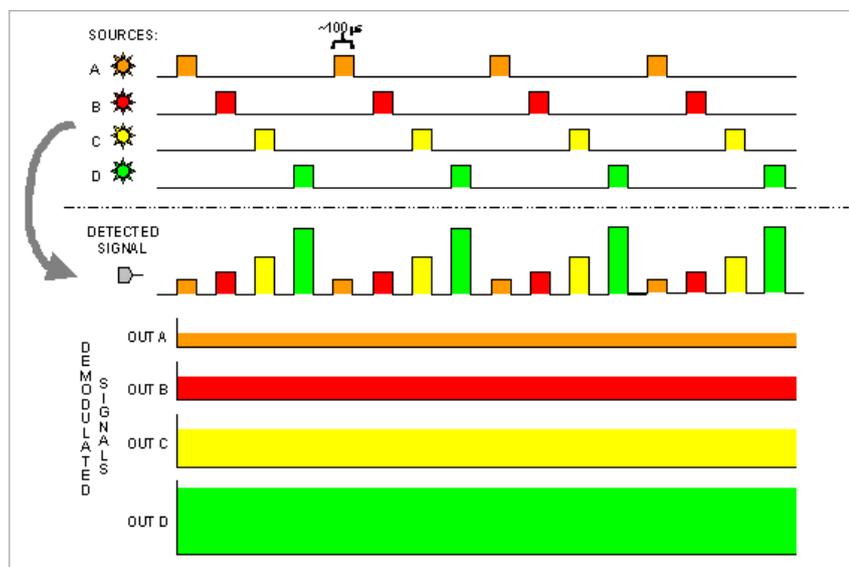
Параметр	pin диод	Лавинный диод	Транзистор	Приемник Дарлингтона
Чувствительность (мкА/мкВт)	0,5	15	35	180
Время нарастания (нс)	1	2	2000	40000
U смещения (В)	10	100	10	10



*Кремниевые фотодиоды и фототранзисторы*

# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Методы уплотнения информации



Основными методами увеличения скорости передачи информации в оптоволоконных линиях связи являются:

- временное уплотнение,
- пространственное уплотнение,
- спектральное уплотнение,
- модовое уплотнение

Временное уплотнение (TDM) - увеличение частоты передачи сигналов, т.е. использование при передаче (в цифровом режиме кодирования) импульсных сигналов минимальной длительности и скважности. На сегодня в режиме модуляции тока накачки полупроводниковых излучателей достигнута скорость передачи информации около 30 Гбит/с. При использовании внешних модуляторов максимальная частота модуляции достигает нескольких сотен Гбит/с.

# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

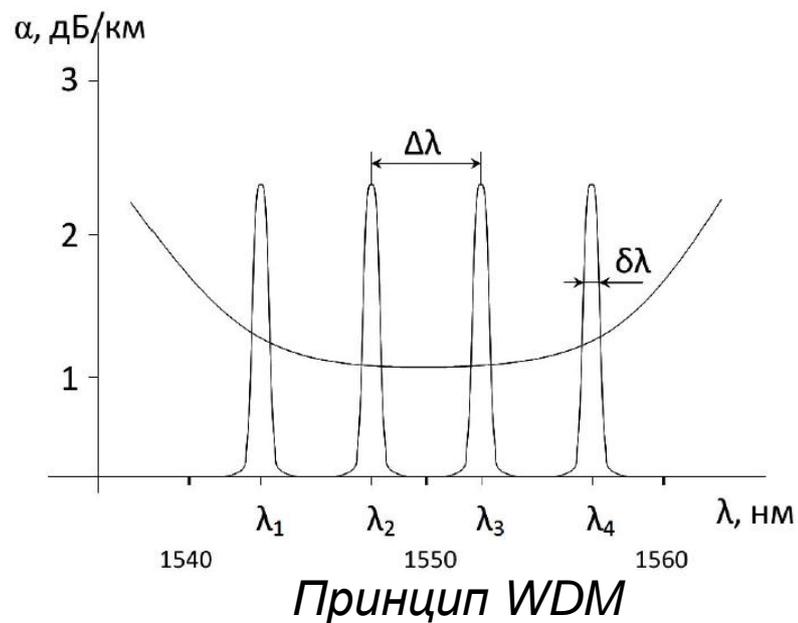
## Методы уплотнения информации



*Многожильный кабель*

Спектральное уплотнение (WDM) - одновременная передача по одножильному кабелю нескольких сигналов с разными длинами волн несущих. В пределах полосы прозрачности волокна можно разместить несколько информационных сигналов и тем самым увеличить пропускную способность линии связи

Пространственное уплотнение - увеличение числа волокон в многожильном кабеле (144 волокна и более). Увеличение числа волокон многократно увеличивает пропускную способность, но резко осложняет проблему соединения таких кабелей.



# Лекция 13. Связь ЭВМ с внешней средой

## Оптический солитон



Один из способов реализации принципа TDM - использование сверхкоротких (длительность  $\sim 1-10$  пс) световых импульсов - солитонов. Считается, что именно в этом случае будут достигнуты предельные ( $\sim$ Тбит/с) скорости передачи данных по одномодовому волокну

Сущность солитонного режима в том, что при достаточно больших интенсивностях свет за счет нелинейного эффекта (эффект Керра) меняет показатель преломления, что должно укорачивать импульс по мере его распространения. При определенных условиях этот эффект в точности компенсируется дисперсионным расплыванием и формируется импульс неизменной длительности - солитон



# Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

## Перспективы развития ЭВМ и квантовые компьютеры

Проблемы развития ЭВМ, нанотехнологии и новые материалы:

«напряженный» кремний и «high-k» диэлектрики,  
GaAs, InP и другие перспективные полупроводники,  
углеродные нанотрубки, графен и наноструктуры,  
молекулярные кристаллы.

Реализация устойчивых одно- и многоэлектронных состояний в различных системах.  
Когерентность состояний. Предельные размеры, быстродействие и энергозатраты.

Вычисления в классической и квантовой физике:

биты и кубиты,  
квантовые алгоритмы,  
области применения.

Как построить квантовый компьютер:

ионные ловушки, ЯМР, поверхностные наноструктуры  
разрушение когерентности как источник ошибок при квантовых вычислениях и их  
коррекция.

Перспективы реализации квантовых компьютеров