



光缆分类

根据应用场合不同，光缆可分为：

中继光缆

低损耗，宽带宽；市内，城市间，长途

海底光缆

低损耗，宽带宽，高机械性能，高可靠性；海底

用户光缆

高密度，宽带宽，中低损耗；计算机网，光纤到户

局内光缆

体积小，重量轻，柔软；局内

无金属光缆

低损耗，抗电磁干扰；电力，石化，交通

复合光缆

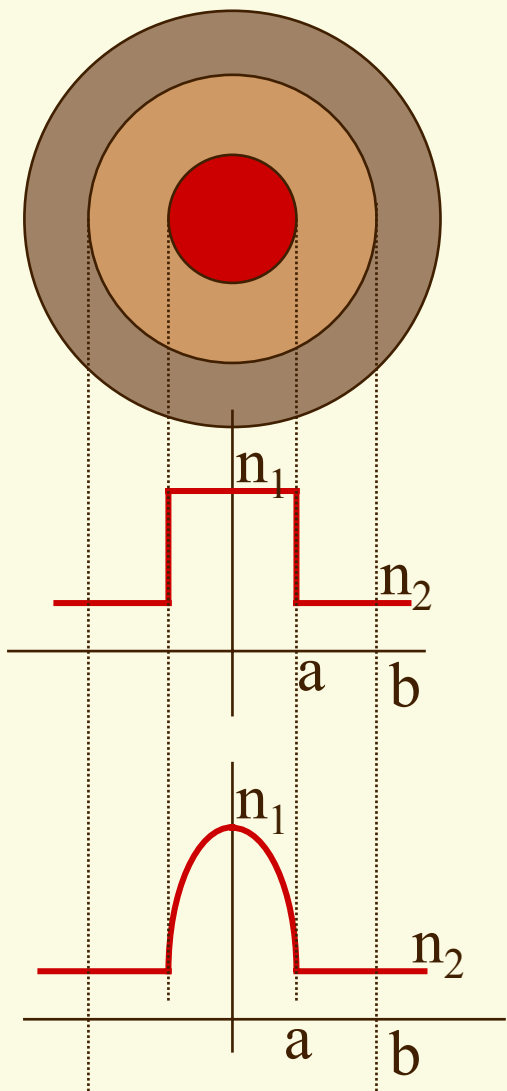
低损耗；电力



三、光纤的基本特性

- ☞ 光纤的基本结构与参数
- ☞ 多模光纤与单模光纤
- ☞ 光纤损耗
- ☞ 光纤色散
- ☞ 光纤中的非线性效应
- ☞ 光纤的物理化学特性
- ☞ 光纤操作过程中的安全问题

光纤的基本结构



折射率剖面形状

阶跃型 step index

$$n = \begin{cases} n_1, & r \leq a \\ n_2, & a < r < b \end{cases} \quad (n_1 > n_2)$$

渐变型 grading index

$$n = \begin{cases} n_1 [1 - 2\Delta \cdot f(r/a)]^{1/2}, & r \leq a \\ n_2, & a < r < b \end{cases} \quad (n_1 > n_2)$$

$$f(r/a) \leq f(1) = 1$$

光纤的基本参数

➤ 相对折射率差:

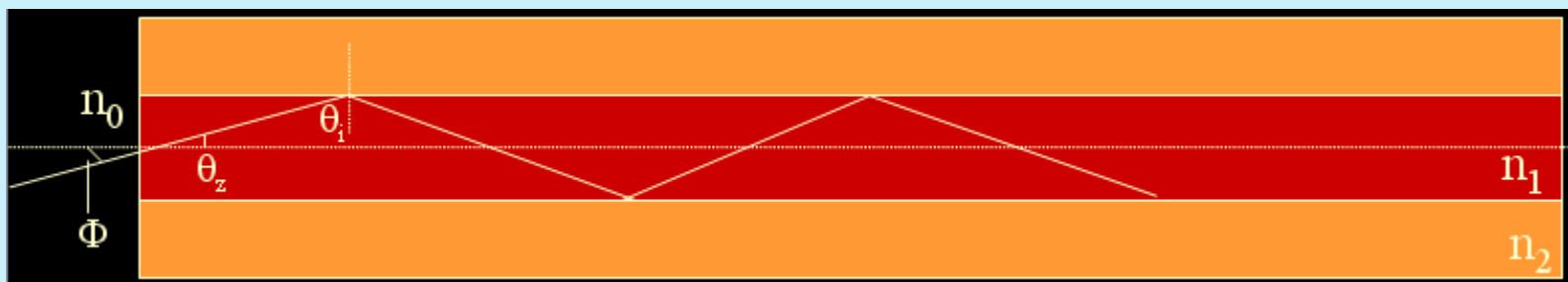
$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}$$

光纤对光场的约束能力
及光纤端面的受光能力

➤ 数值孔径NA (Numerical Aperture)

$$NA = \sin \Phi_{\max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{2\Delta}$$

为光纤端面最大接收角的正弦，对渐变型光纤可定义本地数值孔径



$$\sin \Phi = n_1 \sin \theta_z = n_1 \cos \theta_i = n_1 \sqrt{1 - \sin^2 \theta_i} \quad \sin \theta_i \geq \frac{n_2}{n_1}, \quad \sin \Phi_{\max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

光纤中的电磁场模式

能够在光纤中传导的电磁波不仅需要满足芯/包界面上的**全反射条件**，而且需要满足传输过程中的**相干加强条件**，只有一系列特定的基本电磁波形态才能在光纤中存在并传输，这种基本的电磁波形态称为模式，简称模。

光纤中所支持的电磁波模式数量由光纤的具体结构和折射率分布决定

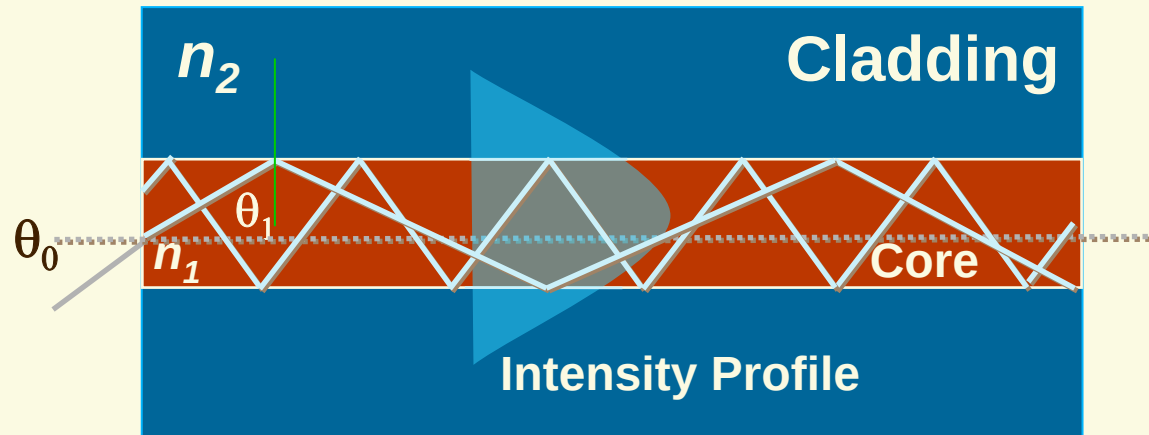
光纤的归一化工作频率：
$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi}{\lambda} a n_1 \sqrt{2\Delta}$$

是光纤的一个重要综合性参数

光纤中所支持的模式数约为 $V^2/2$ （偏振简并度2）

电磁理论分析表明，对于阶跃型光纤，当 $V < 2.4048$ 时，光纤中将只存在一个模式（两个偏振态）

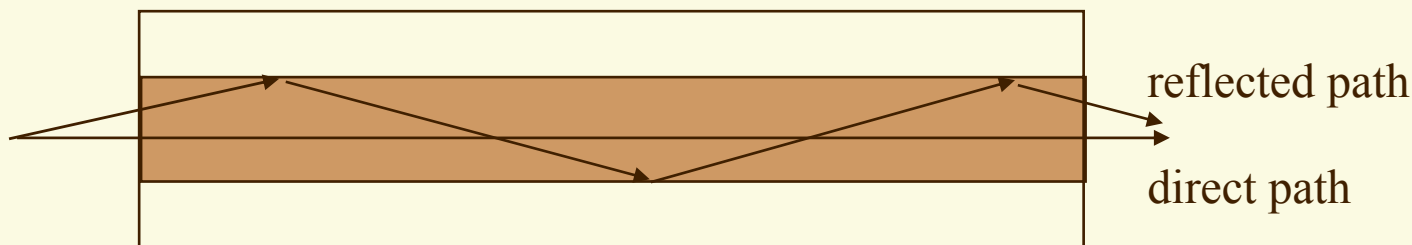
Optical Modes in Fiber



- ❏ Light propagates by total internal reflections at the core-cladding interface
- ❏ A light ray traveling in fiber must interfere constructively with itself to propagate successfully
- ❏ Each allowed ray is a mode

多模光纤与单模光纤

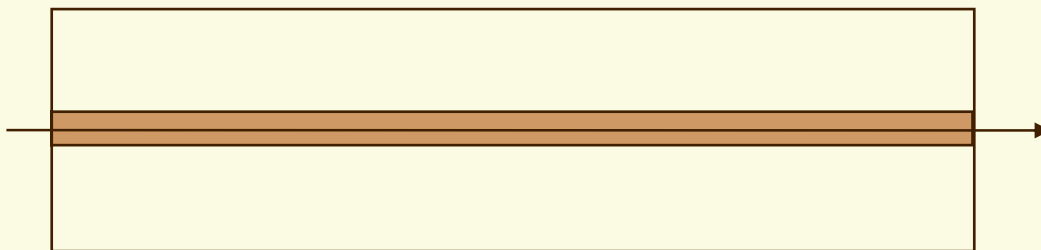
- **Multimode fiber:** multiple rays follow different paths



优点：芯径大，易于光耦合。缺点：模间色散。

BL~500 MHz-km，适用于低速短距离系统

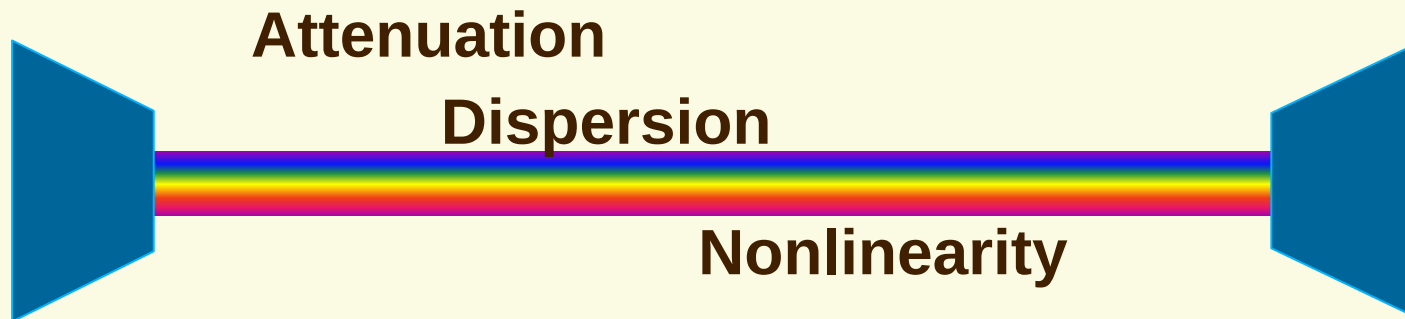
- **Single mode fiber:** only direct path propagates in fiber



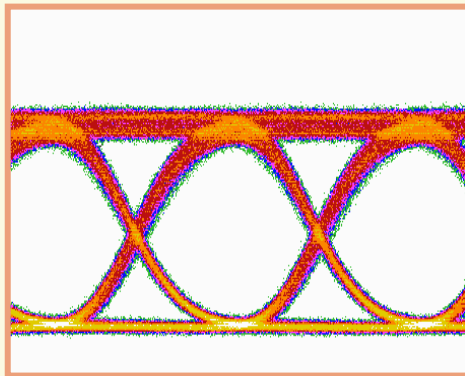
优点：无模间色散。缺点：不易于光耦合。

BL~100 THz-km，适用于高速信号的长距离传输

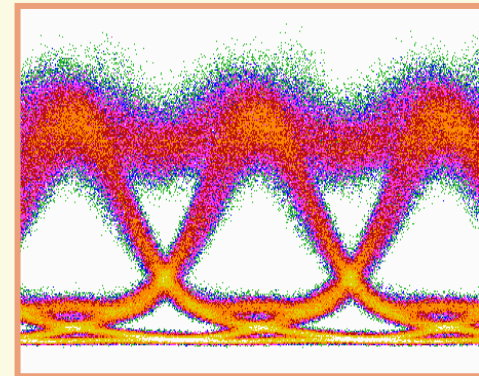
Fiber Fundamentals



Distortion



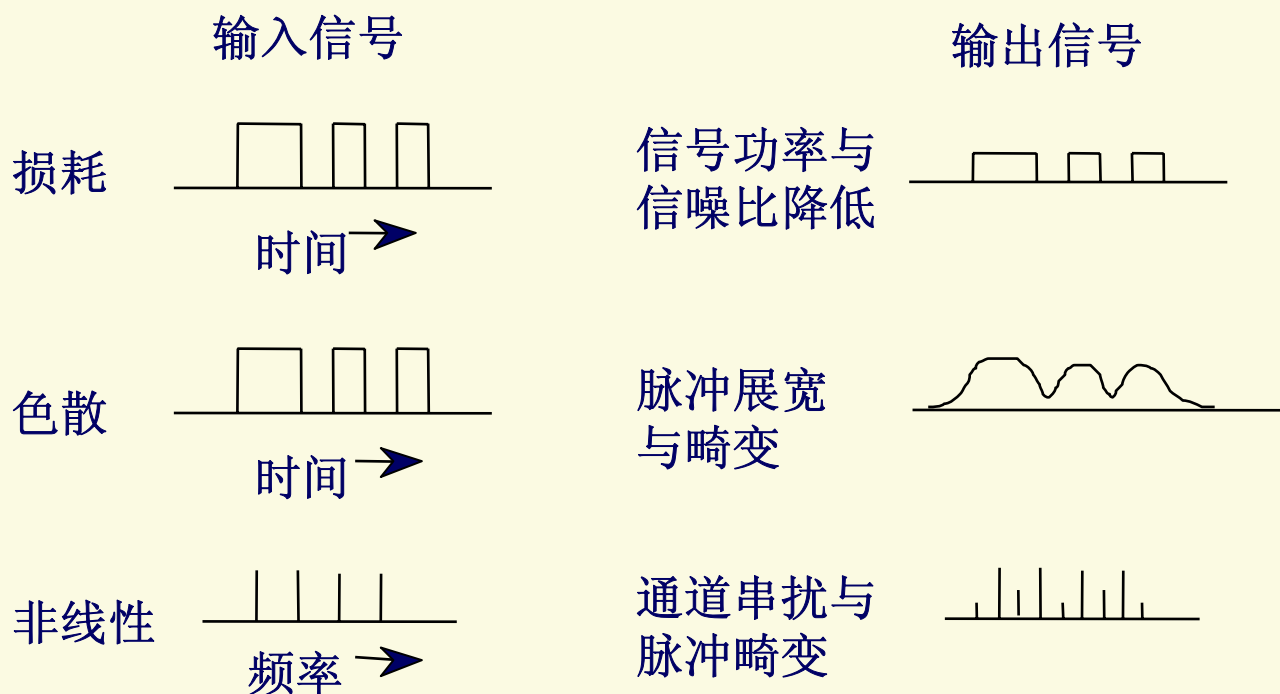
Transmitted Data Waveform



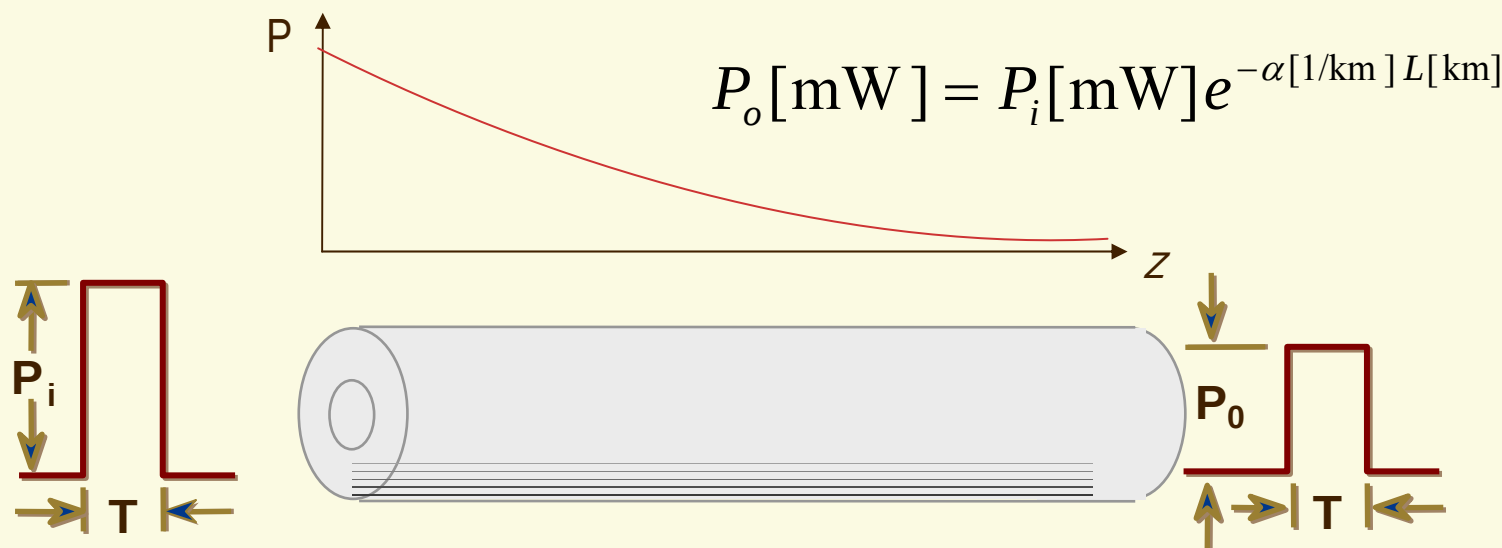
Waveform After 1000 Km



损耗、色散和非线性对光信号的影响



光纤损耗



以1mW为参考值的光功率分贝表示: $P[\text{dBm}] = 10 \lg P[\text{mW}]$

$$\begin{aligned} P_o[\text{dBm}] &= P_i[\text{dBm}] - (10 \lg e) \alpha[1/\text{km}] L[\text{km}] \\ &= P_i[\text{dBm}] - \alpha[\text{dB/km}] L[\text{km}] \end{aligned}$$

光纤损耗的分贝表示:

$$\alpha[\text{dB/km}] = (10 \lg e) \alpha[1/\text{km}] = 4.343 \alpha[1/\text{km}]$$



Example

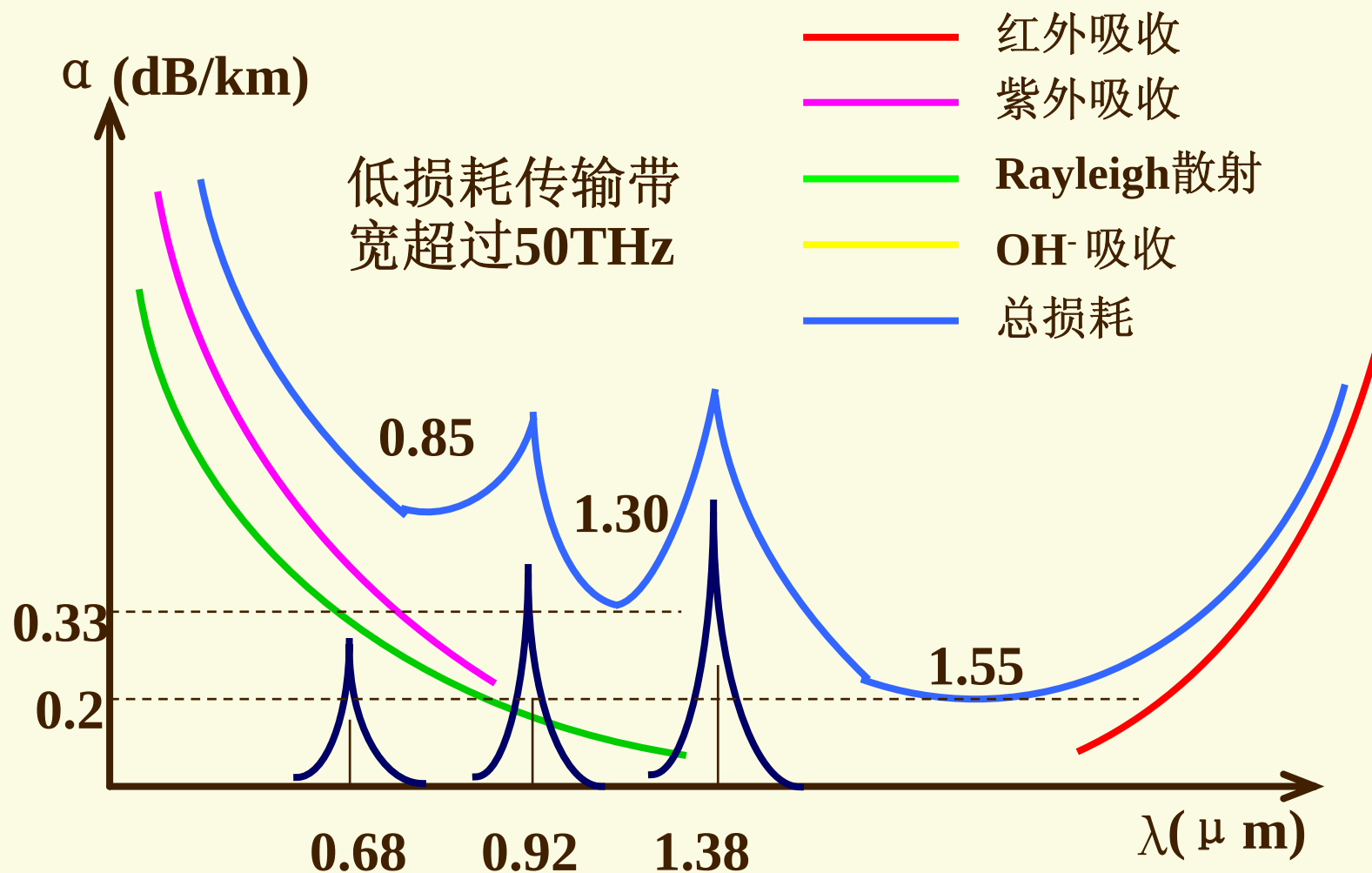
10dBm	10 mW
3dBm	5 mW
0 dBm	1 mW
-3 dBm	500 μ W
-10 dBm	100 μ W
-30 dBm	1 μ W

光纤损耗的来源

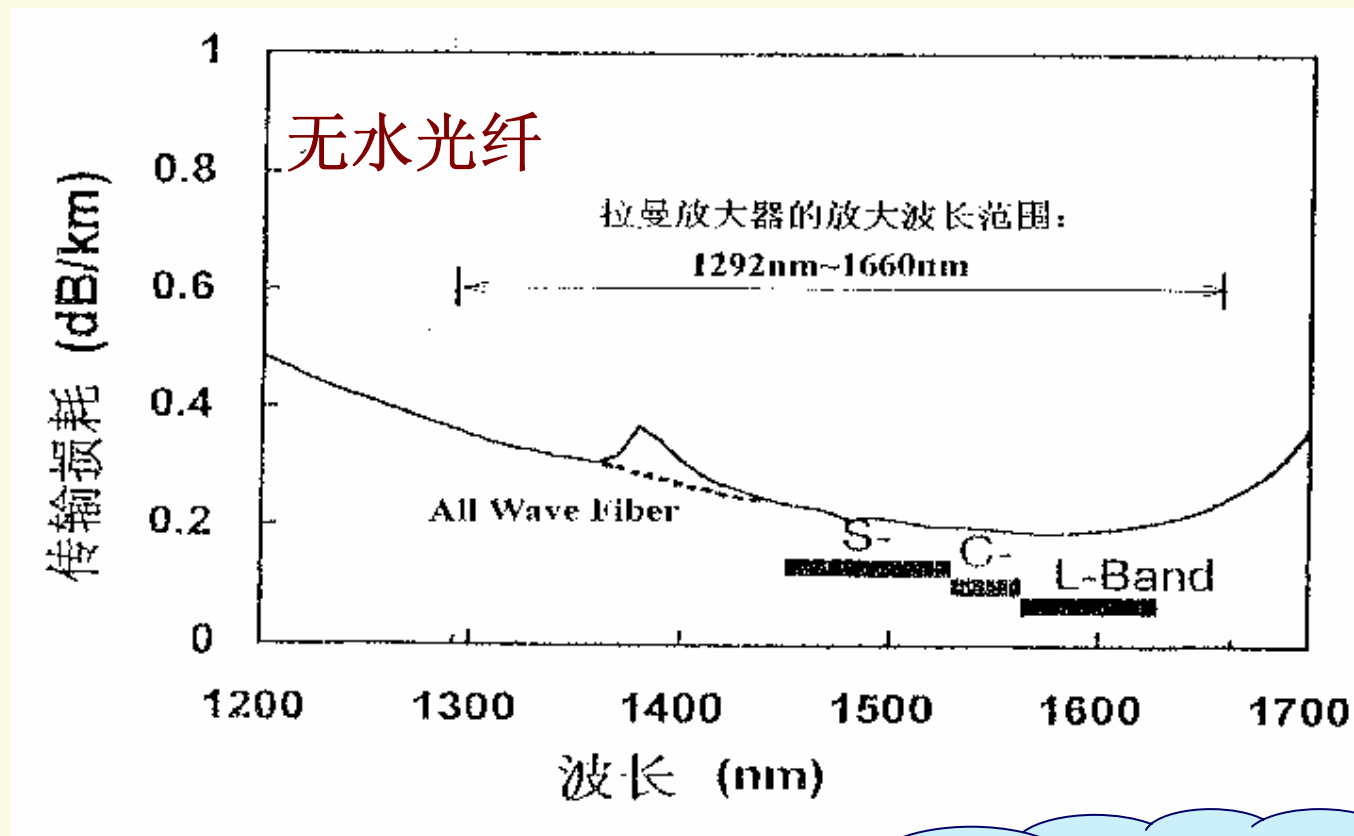
- 材料对光的本征吸收 $\left\{ \begin{array}{l} \text{分子振动态的改变对光子的吸收(红外吸收)} \\ \text{电子跃迁对光子的吸收(紫外吸收)} \end{array} \right.$
- 杂质离子吸收 $\left\{ \begin{array}{l} \text{过渡金属离子} \\ \text{OH}^- \text{ (2.73}\mu\text{m, 1.38}\mu\text{m)} \end{array} \right.$
- 散射损耗 $\left\{ \begin{array}{l} \text{Rayleigh散射} (\propto \lambda^{-4}, \text{ 由不可避免的随机密度波动引起}) \\ \text{芯/包界面不规则} \end{array} \right.$
- 弯曲损耗, 接续损耗
- 非线性散射损耗 (SBS, SRS)

极限损耗
0.11dB/km

光纤损耗谱的构成



光纤技术的新进展

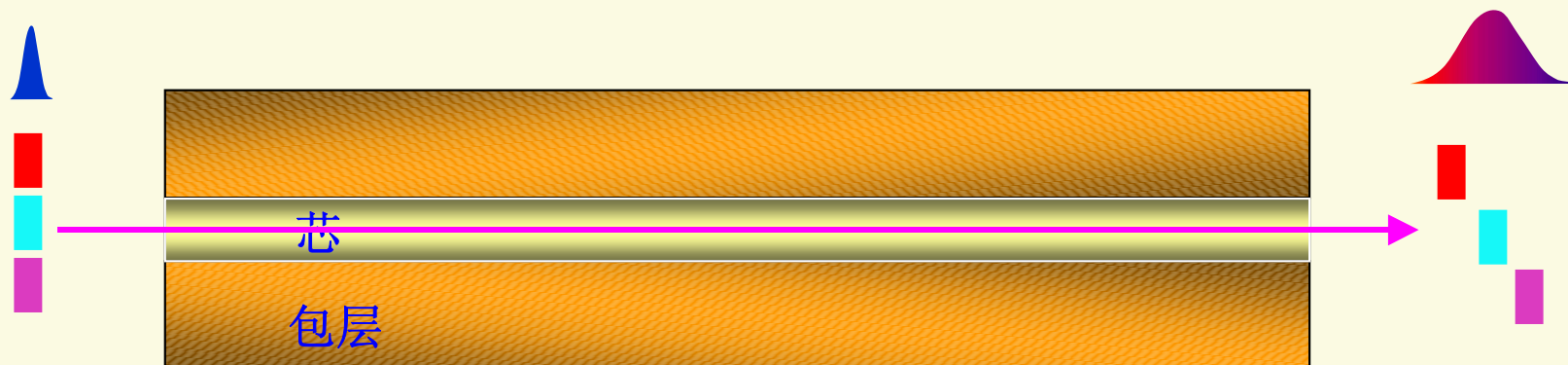


新型的无水光纤和O同位素光纤带宽可达数百~上千THz

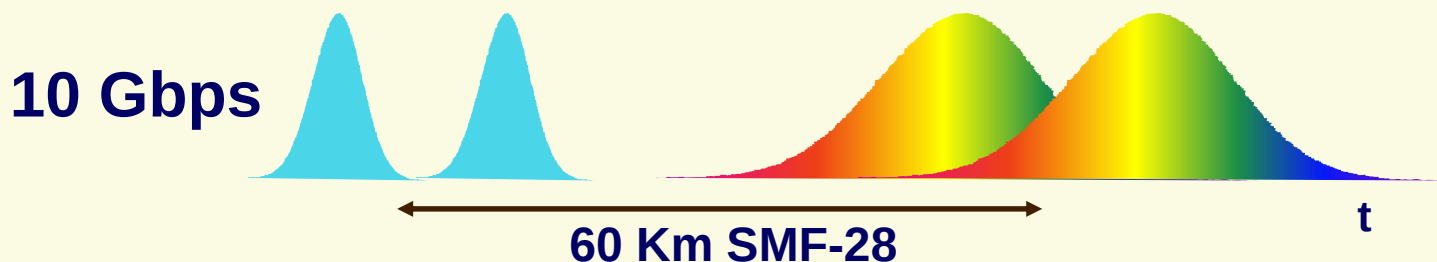
$$f = \frac{c}{\lambda}; \quad \Delta f = -\frac{c}{\lambda^2} \Delta \lambda$$

光纤色散

光纤色散是指构成光信号的电磁波各成份在光纤中具有不同传输速度的现象，是限制单一波长上传输容量的主要因素



色散导致信号畸变、码间干扰，对系统比特率和传输距离造成限制



光纤色散的来源

- **模间色散**: 不同模式不同传输速度 ← 多模光纤色散
 - **材料色散**: 不同频率不同折射率
 - **波导色散**: 不同频率不同模场分布
 - **偏振模色散**: 不同偏振态不同传输速度
- 群速色散 } 单模光纤色散

Comments:

- 对多模光纤，模间色散占绝对优势，其它色散可忽略
- 单模光纤无模间色散，适合大容量、长距离传输系统
- 材料色散与波导色散通称色度色散或群速色散，是单模光纤中的主要色散，在群速色散起作用的场合，偏振模色散可忽略
- 单模光纤中群速色散对信号传输的影响可通过对光纤结构进行设计或采用适当的色散管理机制加以消除。
- 偏振模色散起源于工艺所致的光纤非圆对称性、沿光纤轴向的随机应力与温度分布，具有随机性与突发性。其影响虽小但难于消除。在群速色散被克服的情况下，是单模光纤中的主要色散。

群速色散的定义

光纤中波的群速度

$$v_g = \frac{d\omega}{d\beta} \quad \text{单位: [km/s]}$$

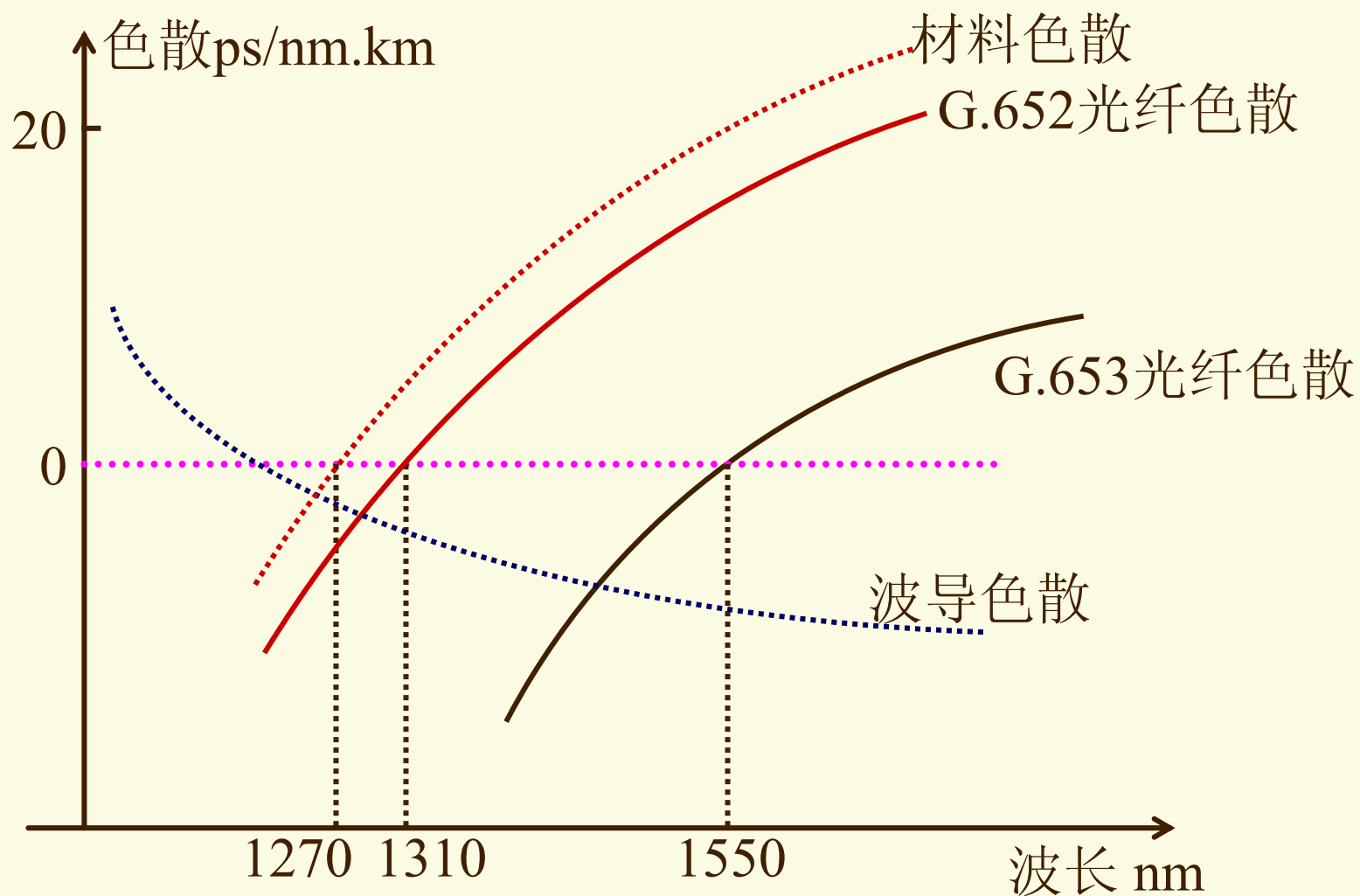
单位长度光纤上的群时延

$$\tau(\lambda)[\text{ps/km}] = \frac{1}{v_g} = \frac{d\beta}{d\omega} = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d\beta(\lambda)}{d\lambda}$$

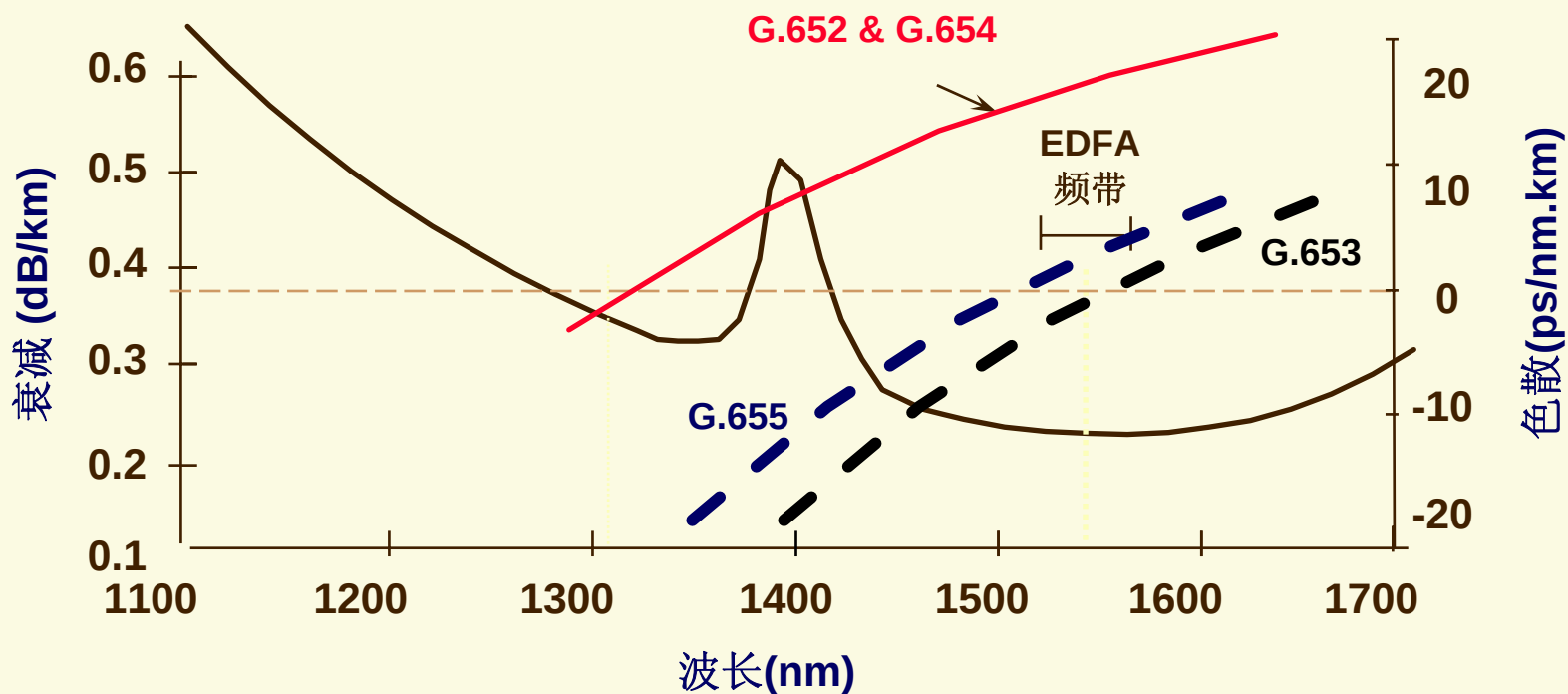
光纤的群速色散**D**定义为群时延随波长的变化率

$$D[\text{ps/km} \cdot \text{nm}] = \frac{d\tau(\lambda)}{d\lambda}$$

单模光纤的色散曲线

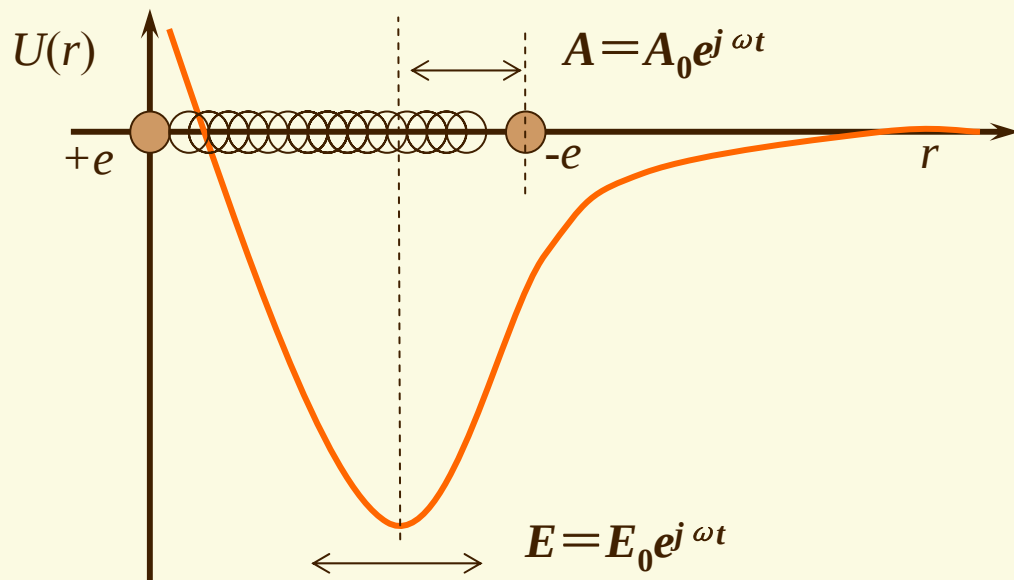


单模光纤的损耗与色散谱



光纤中的光学非线性效应

分子在外场作用下的振动与介质极化:



在其平衡态附近, 原子之间的相互作用近似为抛物势。当 E_0 较小时, 分子在外场驱动和抛物势作用下的电偶极矩为:

$$p = -eA = \varepsilon_0 \hat{\chi} E = \varepsilon_0 \hat{\chi} E_0 e^{j\omega t}$$

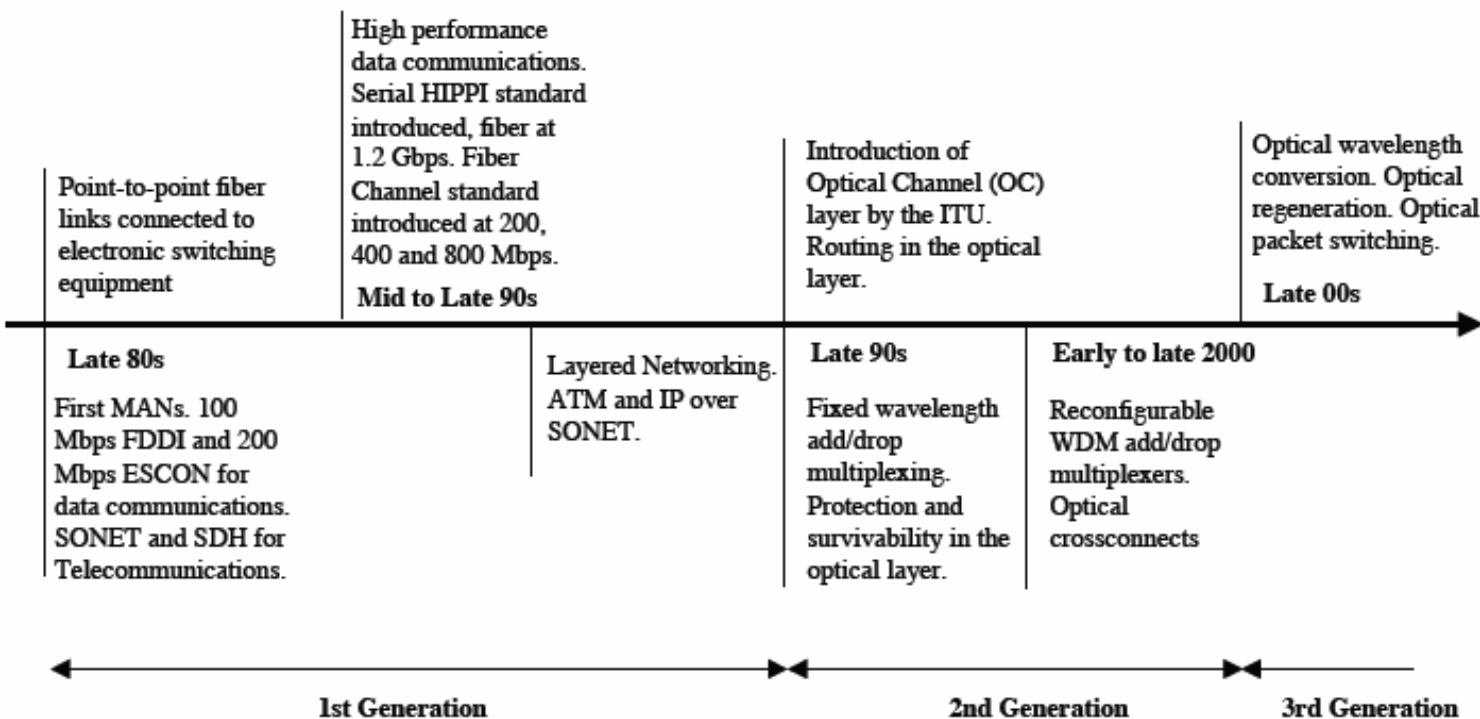
当分子密度为 N 时, 介质的宏观感应电偶极矩为:

$$P = Np = -eNA = \varepsilon_0 \chi E, \quad \chi = N\hat{\chi}$$



Summary

Evolution of Fiber-Optic Networks



Summary

On the Definition of Optical Networks

- ⇒ The term “Optical Networks” is used in different ways
 - ⇒ In some scenario, a network is said to be “optical” provided that fiber is used “somewhere” along the network links
- ⇒ Some authors uses the following convention:
 - ⇒ Optical networks (= *first generation optical networks*)
 - ⇒ Fiber is used for transmission, the rest is electronic
 - ⇒ All-Optical networks (= *second generation optical networks*)
 - ⇒ Fiber is used for both transmission and some form of routing functions
- ⇒ More ambiguity in the terminology arises in those solutions where a mix of optical and electrical routing is performed
- ⇒ Mostly, even when talking about all-optical networking, the typical functions implemented in optics are circuit-switching functions
 - ⇒ Usually, if packet-switching is performed (like in some advanced research testbeds), the used term is “all-optical packet switching”



Comments

- ❏ Optical networks offers extremely high transfer rates.
- ❏ Still need for a lot of research.
- ❏ Often complicated and expensive hardware.
- ❏ Header processing is one of the greater bottlenecks.