

光纤通信网络简介

主讲：张荣君

电话：65643559

E-mail: rjzhang@fudan.edu.cn

复旦大学信息学院

光科学与工程系

2008,9,10

提 纲

- 光纤通信简史
- 光纤通信网络

第一部分 光纤通信简史

1.1 光纤通信的基本含义和发展历程

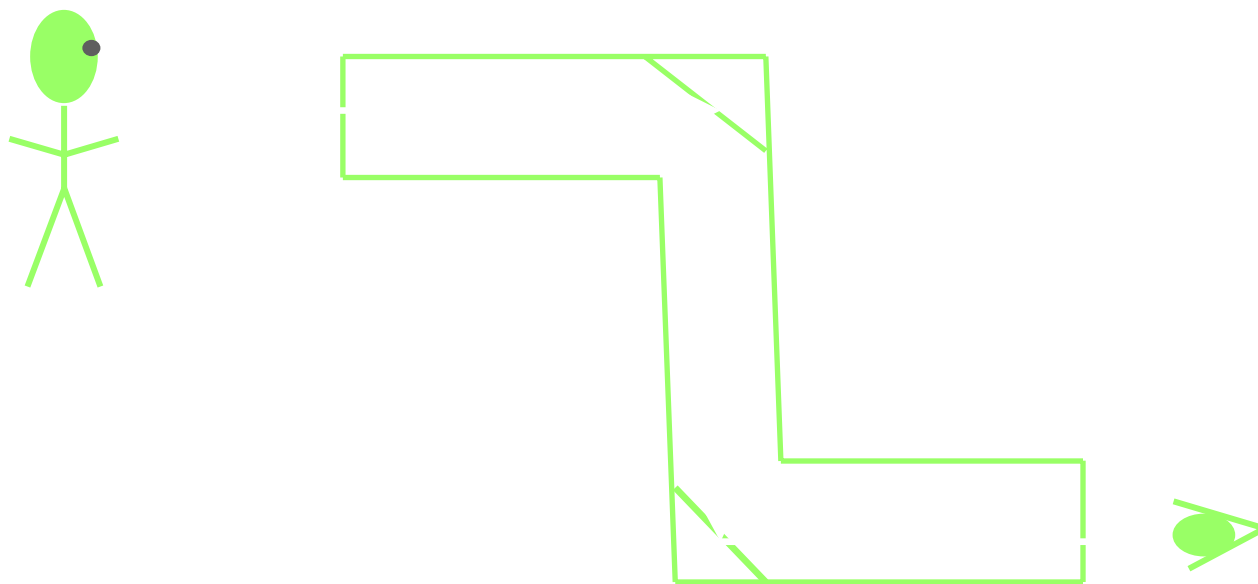
- 光纤通信——利用激光作为信息的载波信号并通过光导纤维来传递信息的通信系统。

光通信（自由空间光通信、光纤通信）

- 发展历程 ——

1. 我国周朝 ——烽火台

雏形：古代烽火、手旗、灯光



潜望镜原理——光波导之雏形

2. **1880年** ——贝尔发明光电话（利用光载波信号来传送语音）
3. **1960年** ——世界上第一台激光器研制成功
4. **1970年代** ——高锟提出光纤可作为光信号的通道；第一根低损耗光纤 (**20dB/Km**) 研制成功 (康宁公司)；贝尔实验室成功研制能在室温条件下连续工作的半导体激光器
5. **1974年** ——贝尔实验室成功研制出损耗为 **1dB/Km** 的光纤（化学气相沉积法 (**CVD**))

6. **1976年**——日本电话电报公司研制出损耗更低的光纤（0.5dB/Km）
7. **20世纪70年代末期**——光纤通信系统实现第一次业务运营
8. **20世纪80年代后期** ——光纤损耗已经降低到0.16dB/Km
9. **1988年** ——第一条跨大西洋光缆投入运营
10. **90年代起**：一系列光子器件（波分复用器件、光纤光栅等等）

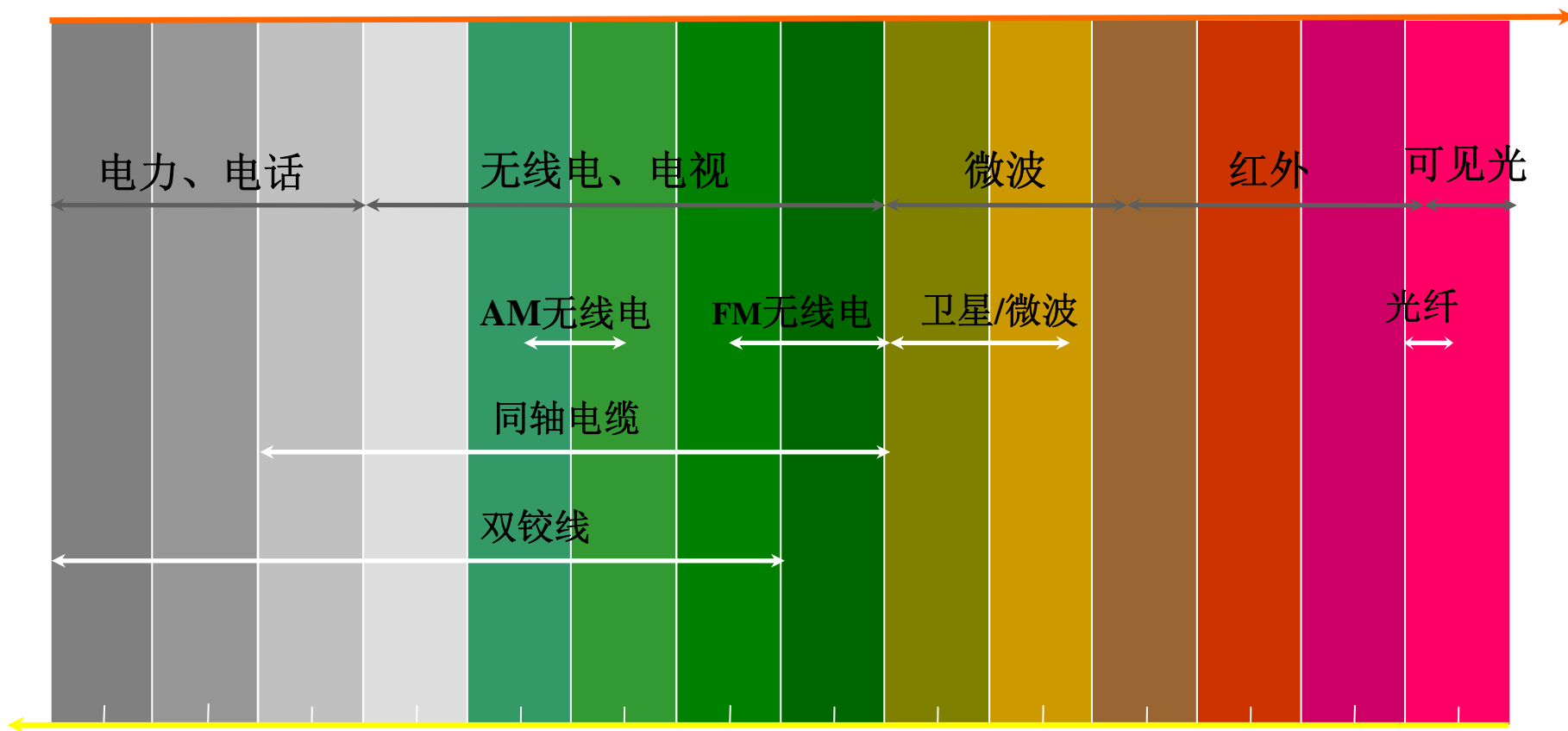
1.2 光纤通信的主要优点

1. 通信容量大 —— 光纤的可用带宽较大，一般在**10GHz**以上；而金属电缆存在的分布电容和分布电感实际上起到了低通滤波器的作用，限制了电缆的传输频率、带宽以及信息承载能力。
2. 传输距离长 —— 光缆的传输损耗比电缆低，因而可传输更长的距离。

3. 抗电磁干扰——光纤通信系统避免了电缆由于相互靠近而引起的电磁干扰。光纤的材料是玻璃或塑料，都不导电，因而不会产生磁场，也就不存在相互间的电磁干扰。
4. 抗噪声干扰——光纤不导电的特性还避免了光缆受到闪电、电机、荧光灯及其他电器源的电磁干扰（EMI），外部的电噪声也不影响光频的传输能力。此外，光缆不辐射射频（RF）能量的特性也使它不会干扰其他通信系统。（故现已广泛应用于军事上）
5. 适应环境——光纤对恶劣环境有较强抵抗能力。它比金属电缆更能适应温度的变化，腐蚀性的液体或气体对其影响也较小。

6. 保密性好——光纤不向外辐射能量，很难用金属感应器对光缆进行窃听。
7. 重量轻、安全、易敷设
8. 寿命长

通信波段划分及相应传输媒介



第二部分 光纤通信网络

光纤通信网络系统的基本组成 与发展概况

•发展概况——

- 第1代光纤通信系统——20世纪70年代末大量投入运营，由 $0.85\ \mu\text{m}$ 的光源和多模光纤构成。
- 第2代光纤通信系统——20世纪80年代初，采用 $1.3\ \mu\text{m}$ 的半导体发光二极管或激光二极管作光源，采用多模光纤。
- 第3代光纤通信系统——自20世纪80年代后期以来，采用 $1.55\ \mu\text{m}$ 作为工作波长，以色散位移光纤作为传输媒介。
- 第4代光纤通信系统——采用波分复用（WDM）技术，现已开始投入运营。

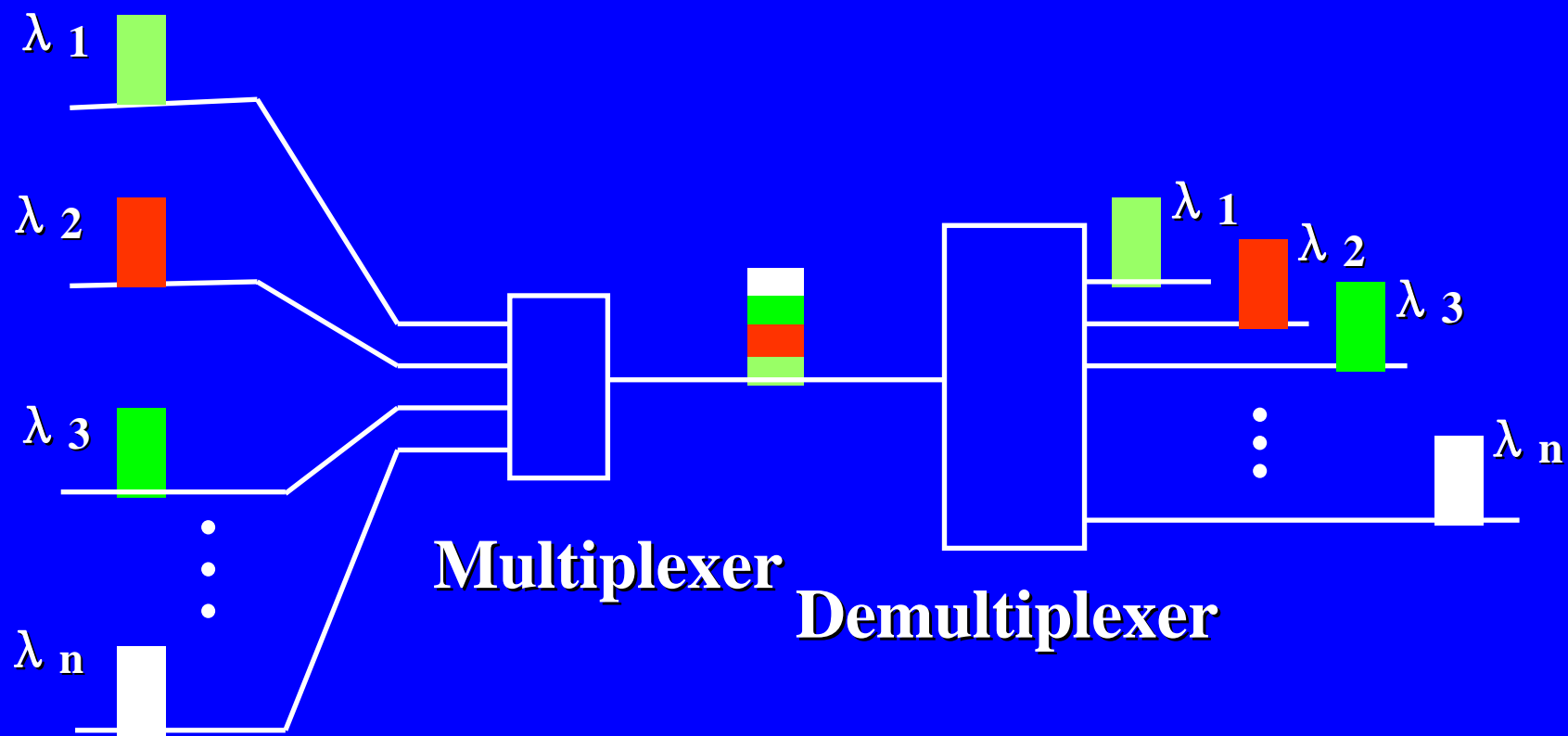
- **第5代光纤通信系统——基于光纤非线性压缩抵消光纤色散展宽的新概念产生的光孤子研究，经过20多年的研究发展，有了突破性进展。**

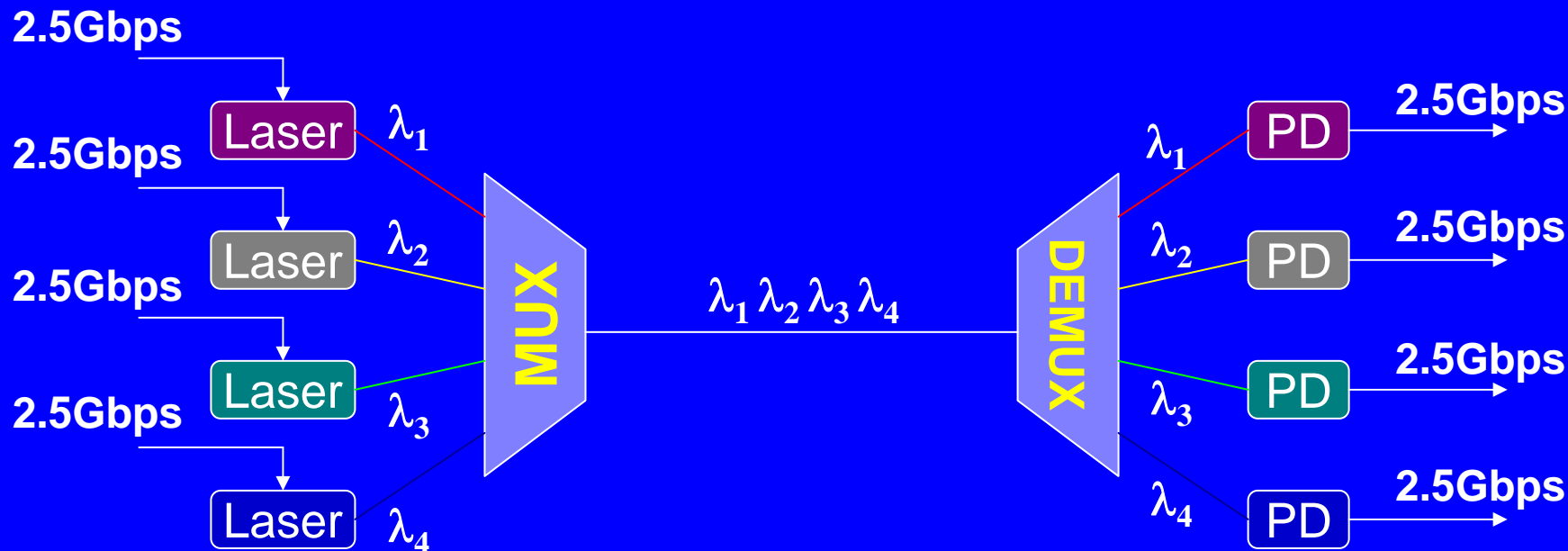
光纤通信系统虽然经历了5代的发展，但目前应用最为广泛的不外乎两种系统结构：

- 1. 点到点的直接强度调制/直接检测（IM/DD）系统（根据传输信号的性质不同，又可分为数字光纤通信系统和模拟光纤通信系统两种）；**
- 2. 波分复用（WDM）光纤通信系统。接入网在发展无源光网络（xPON）系统：FTTx。**

波分复用

WDM—Wavelength Division Multiplexing





单个数据源不可能提供如此高的数据流量。要充分利用光纤的带宽，必须将多路信号进行复用。我们把光纤通信窗口按照一定波长间隔划分成若干通道，每个波长通道加载一路信号，多路信号送入一根光纤进行传输，称为“波分复用”

(WDM: Wavelength Division Multiplexing)

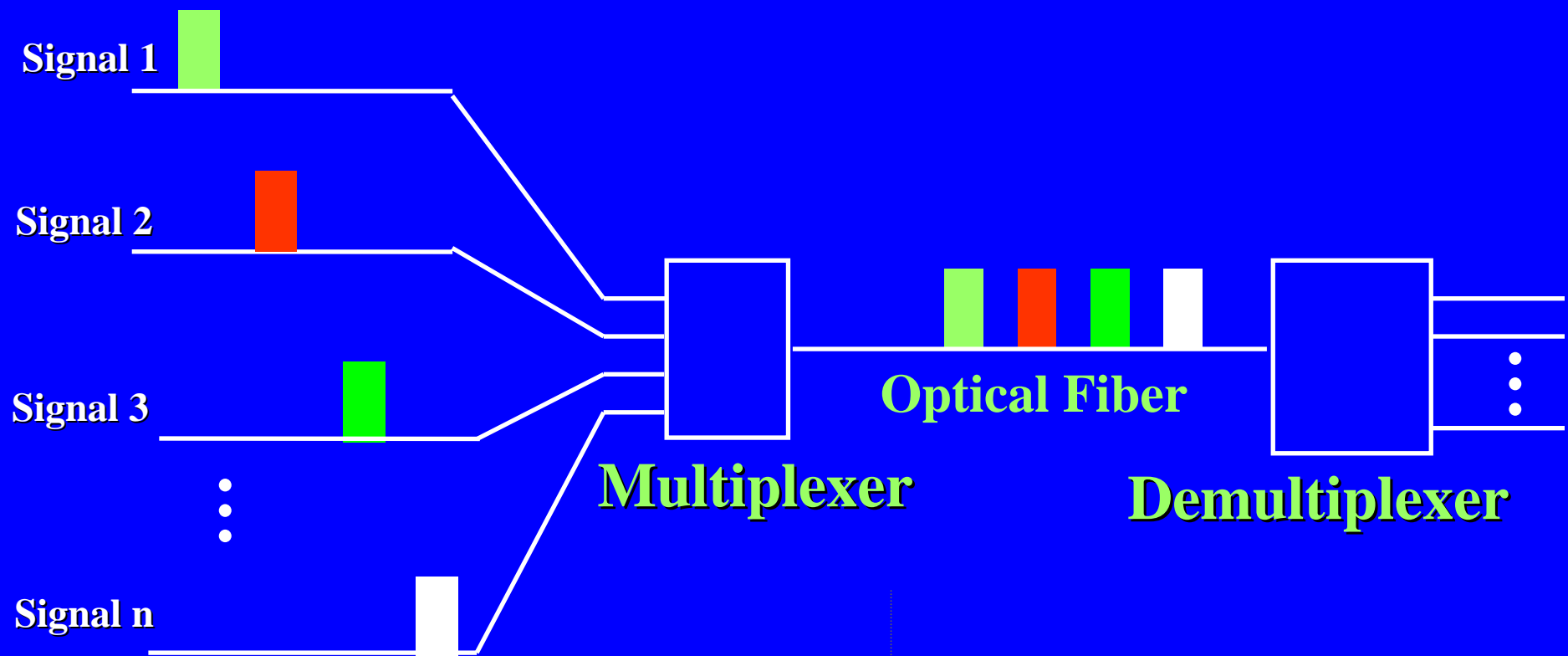
密集波分复用(DWDM, Dense Wavelength Division Multiplexing)当波分复用的峰波长之间的间隔为**1.6nm, 0.8nm**或更低时(对应的约为**200G, 100GHz**或更窄的带宽)。

频分复用(FDM, Frequency Division Multiplexing)更为密集的波分复用。

波分复用系统的主要缺点是由于**WDM**的插入损耗减小了系统的可用功率，信道间的串扰也会恶化接收机的灵敏度，最关键的是波分复用器件的价格仍太高。

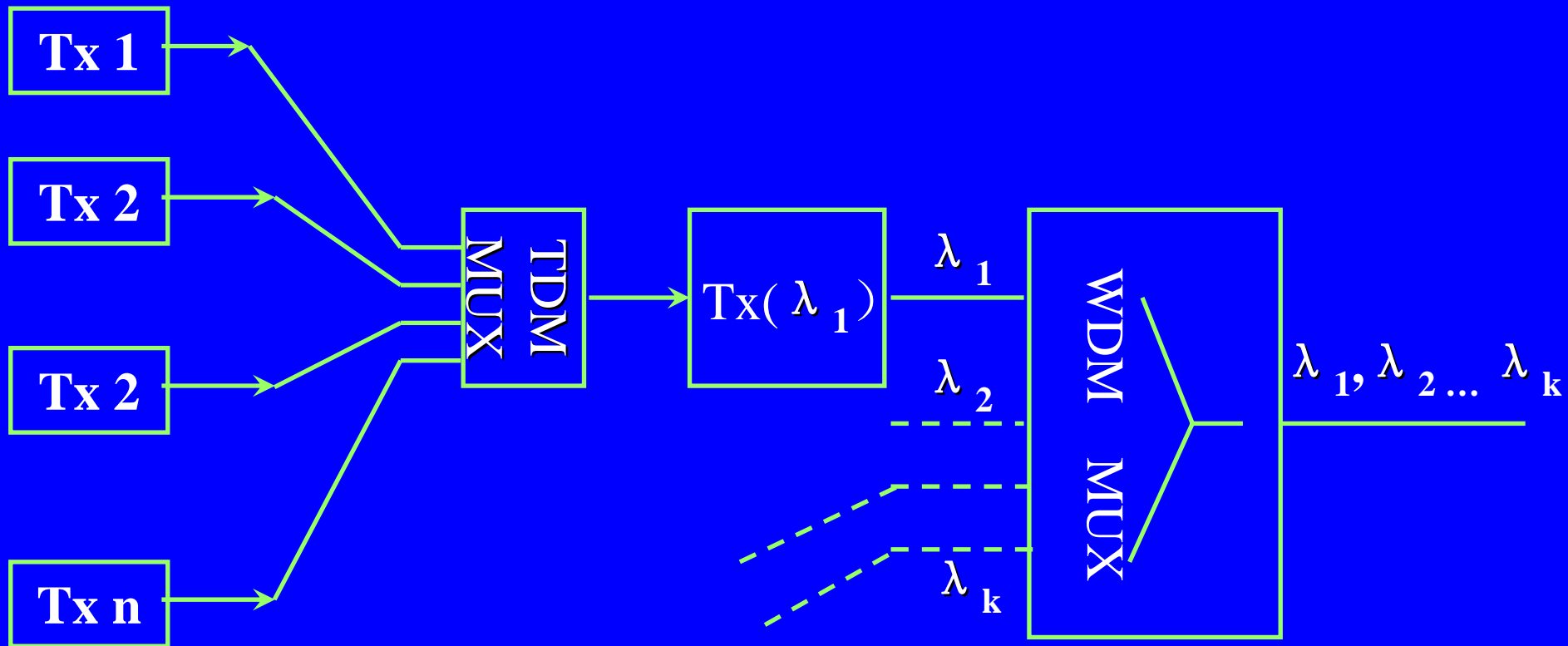
时分复用

TDM—Time Division Multiplexing



时分一波分复用

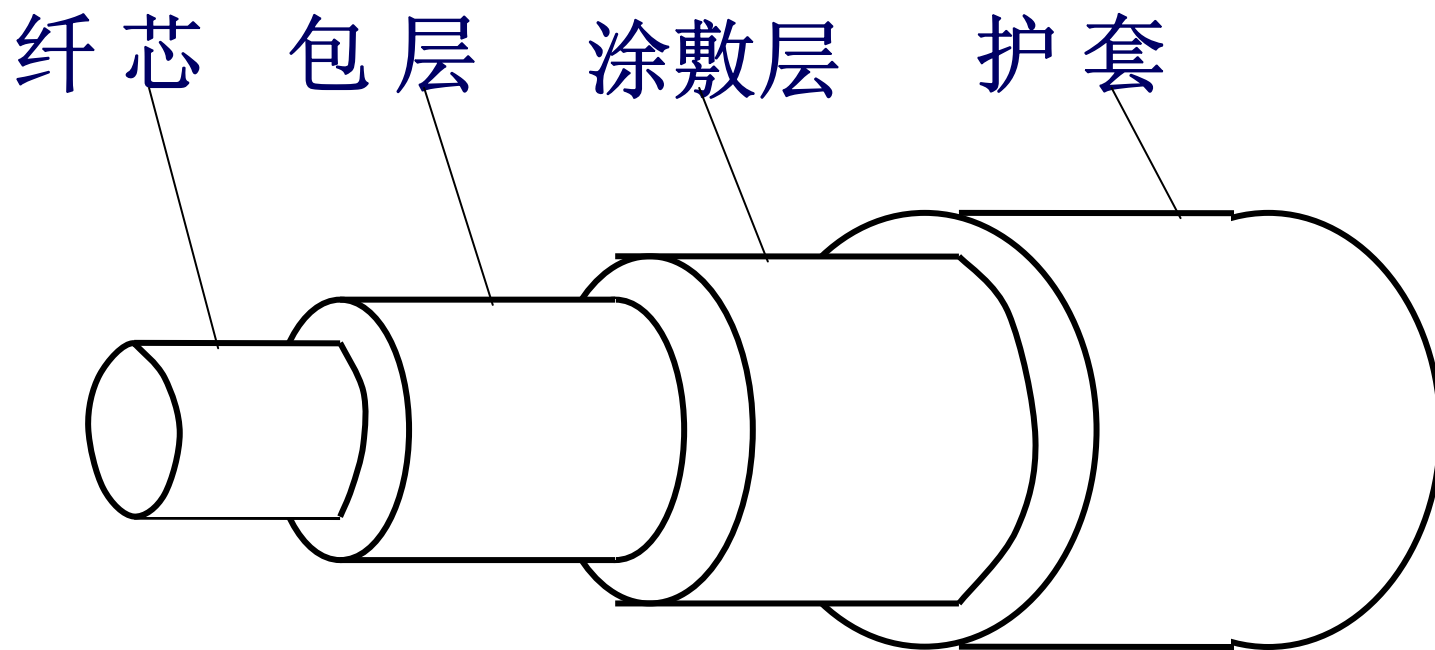
Time-Frequency Division Multiplexing



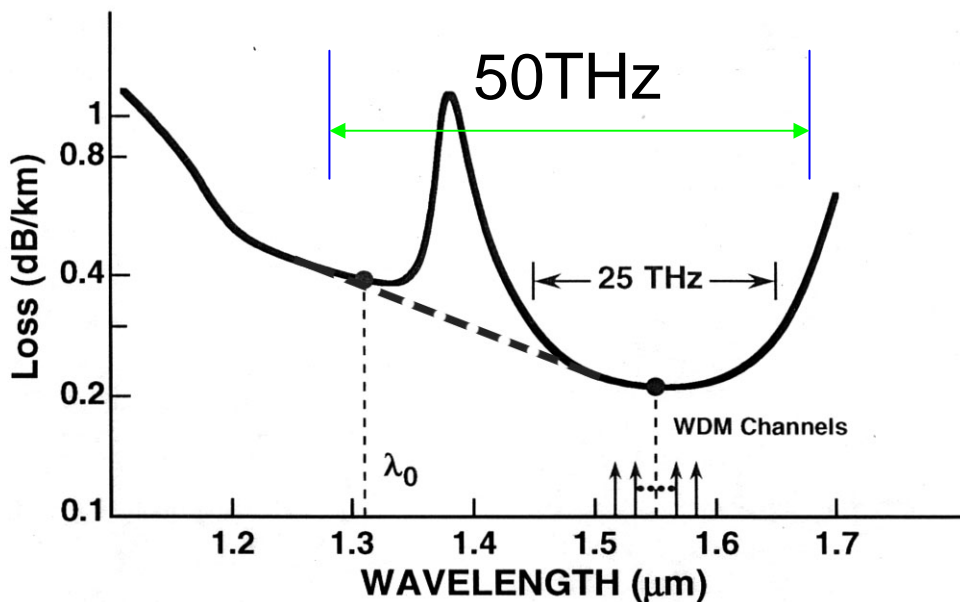
光网络传输介质：光纤和光缆

光 纤

光纤结构



尺寸规格：
单模光纤内径：**9 μ m**
多模光纤内径：**50/62.5 μ m** 外径：**125 μ m**



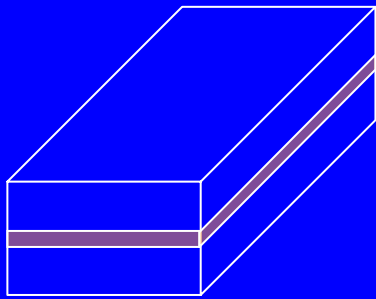
石英在1.3 和1.5 微米处存在两个低损耗窗口可用于光通信。如果用先进的工艺将1.4 微米 OH^- 吸收峰去除，则可利用的通信窗口宽度达**50THz**

石英光纤低损耗窗口

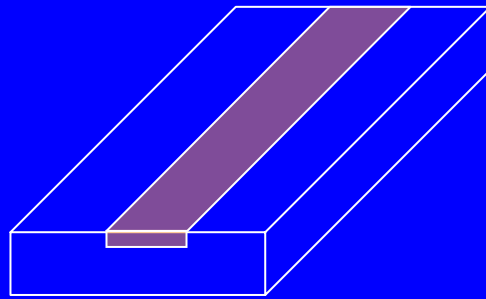
根据**Bell**实验室科学家的研究，充分利用**50THz**的窗口，一根光纤可以传送大约**20亿路电话(150Tbps)**。

(*Nature* , vol.411, p.1027-1030, 2001)

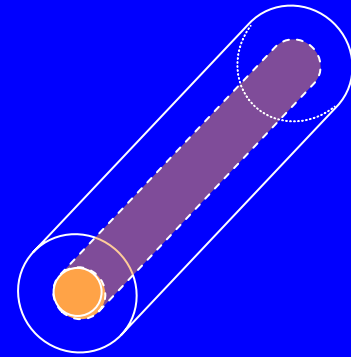
光波导：光信号的信道



平面波导



条形波导



柱状波导（光纤）

几种不同的光波导构形：

在高折射率材料外包裹低折射率材料，
利用全反射原理，将光信号局限在高折射率区域内传播

光波导的一般理论

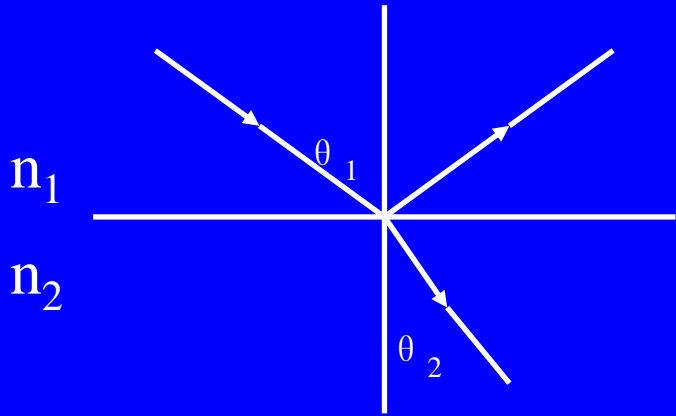
- 简单处理：几何光学+波动光学
- 严格求解：波导中光的传播

麦克斯韦方程组 + 边界条件

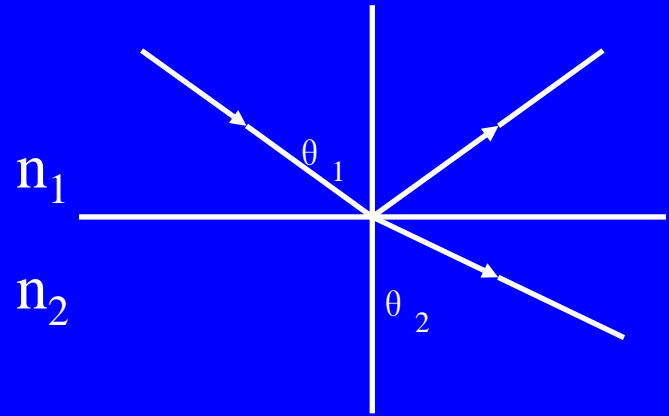
- 本征值问题
 - 光传导模式
 - 模式数目
 - 色散关系

光纤基本理论

菲涅耳定律： $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$



$n_1 < n_2$

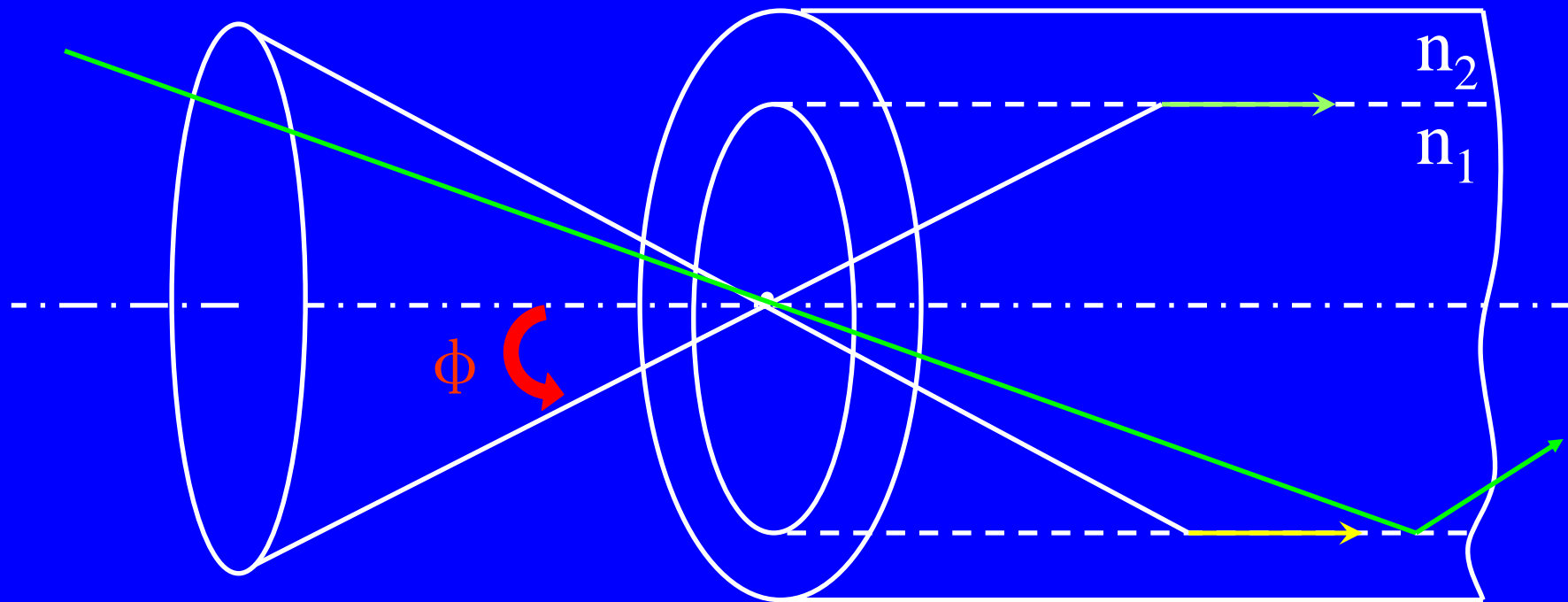


$n_1 > n_2$

结论：若要实现全反射，则必须有

$n_1 > n_2$

数值孔径 (NA)：表征光纤聚光能力的大小以及与光源耦合的难易程度



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

$$\Phi_{max} = \arcsin(NA)$$

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

可见，光纤的数值孔径（ NA ）仅取决于纤芯的折射率的大小及包层相对折射率差，而与光纤的直径无关。

标准多模光纤的 NA 公称值一般为0.2，对应的孔径角约为 11.5° 。

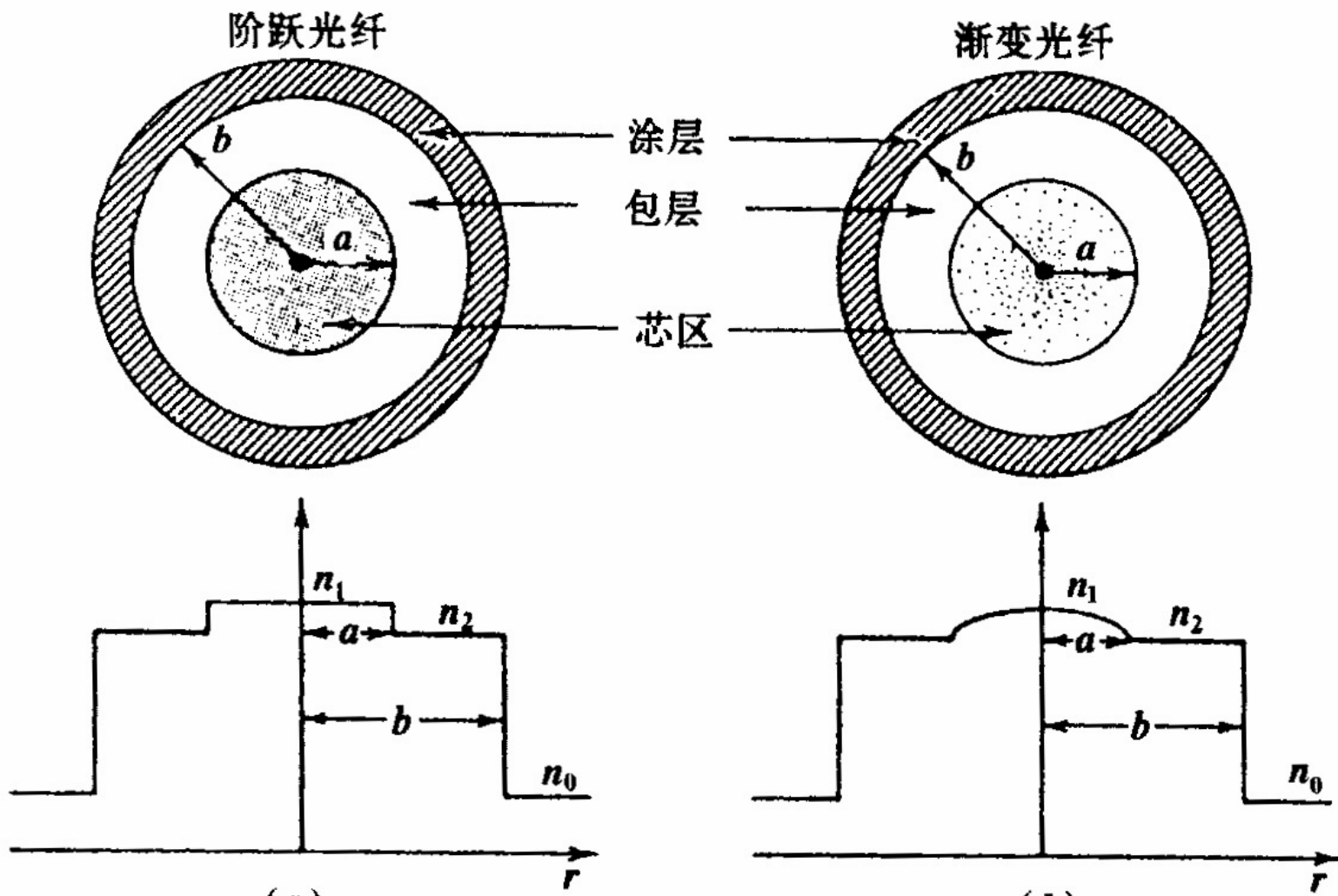
标准单模光纤的 NA 公称值一般为0.1~0.15，对应的孔径角约为 $5.7^\circ\sim 8.6^\circ$ 。

光纤种类

- 多模光纤MMF
 - 50/125 μm 850nm 500MHz •Km, 1310波段 500MHz •Km
 - 62.5/125 μm 160MHz •Km, 500MHz •Km
- 单模光纤SMF(9/125 μm)
 - 普通单模光纤 (SMF, ITU G.652):
色散零点位于1310波段
 - 色散位移光纤 (DSF, ITU G.653):
色散零点位于1550波段
 - 非零色散位移光纤 (NZ-DSF, ITU G.655):
色散零点大于1550波段,

特殊光纤

- Dispersion-compensation fibers 色散补偿光纤
- Large-effective-area fibers 大孔径光纤
- Dry fiber 无水光纤，全波光纤
- Plastic fibers 塑料光纤
- Liquid-core fibers 液芯光纤
- Mid-infrared fibers 中红外光纤



两种常用光纤的结构及其折射率分布

阶跃折射率光纤（多模、单模）

渐变（梯度）折射率光纤

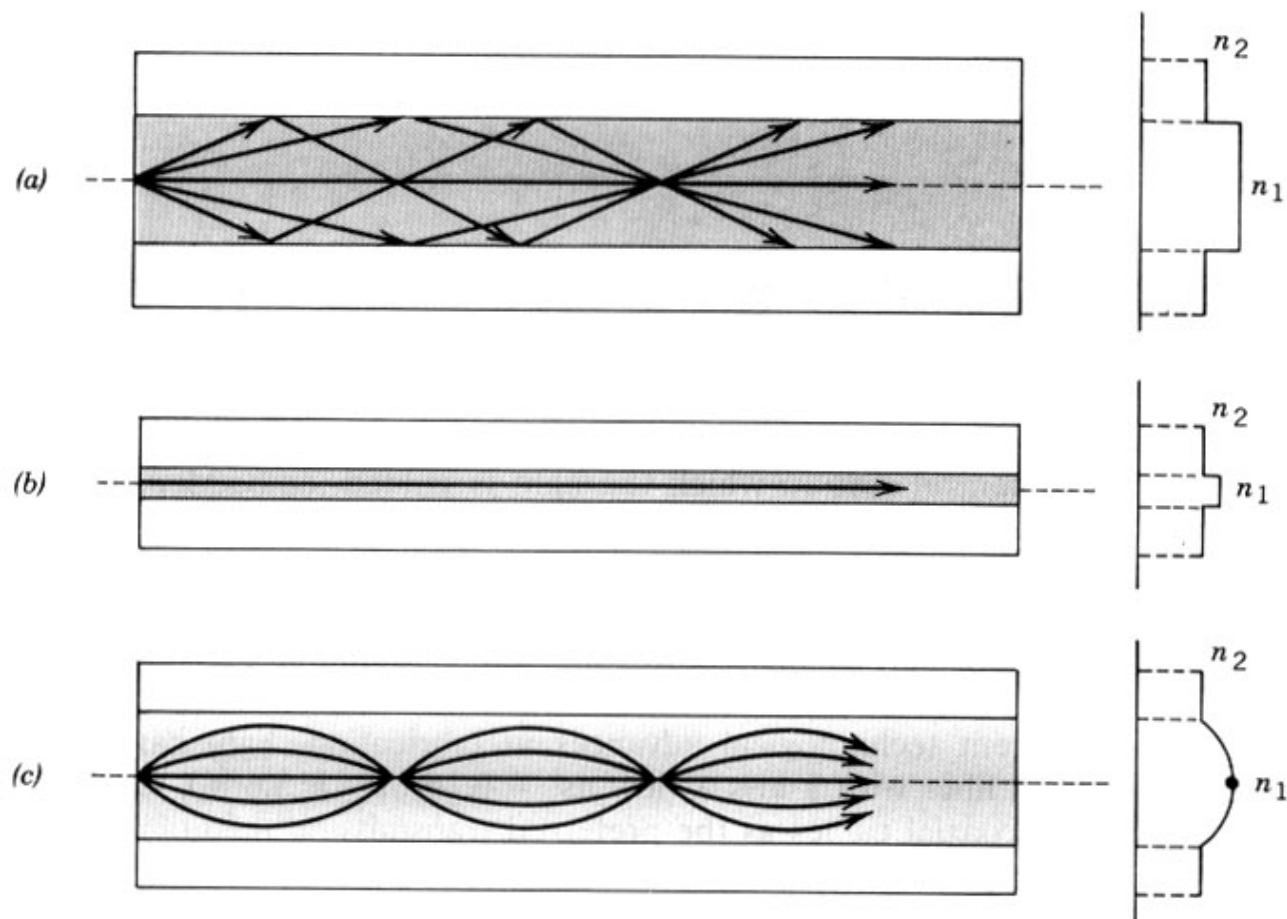


Figure 8.0-2 Geometry, refractive-index profile, and typical rays in: (a) a multimode step-index fiber, (b) a single-mode step-index fiber, and (c) a multimode graded-index fiber.

光纤特性的测量

- 包括：特性参数、机械性能、环境性能等测试
- 特性参数包括：
 - 光学特性参数（折射率分布、数值孔径、模场直径、截止波长）
 - 几何尺寸（包层直径、包层中心、纤芯中心、涂覆层直径等）
 - 传输特性参数（衰减、色散、带宽等）

光纤的两个重要传输特性参数

衰减（损耗）和色散

光纤中的衰减

$$\text{dbloss} = -10 \times \log_{10} \left(\frac{\text{power out}}{\text{power in}} \right)$$

Absorption 吸收

Scattering 散射

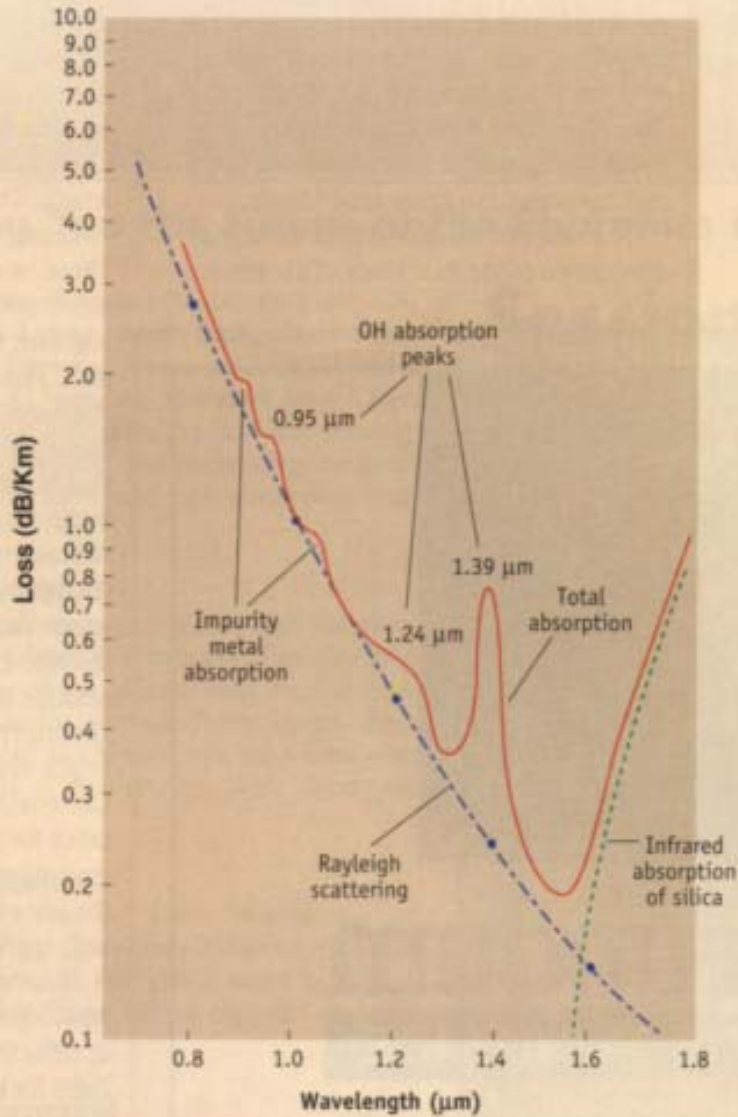
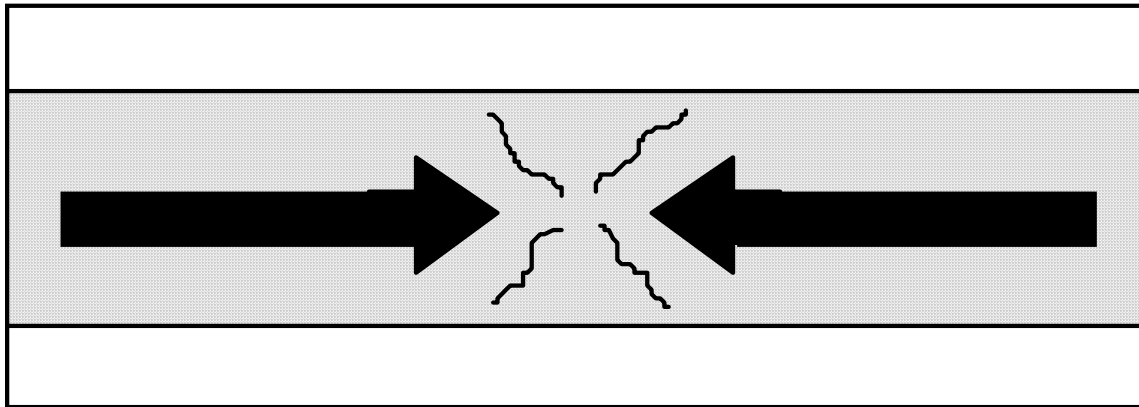


FIGURE 4. Impurities such as OH-TK, Rayleigh scattering, and infrared absorption by silica all contribute to loss in silica fibers. This is an illustrative curve; the loss of individual products will differ.

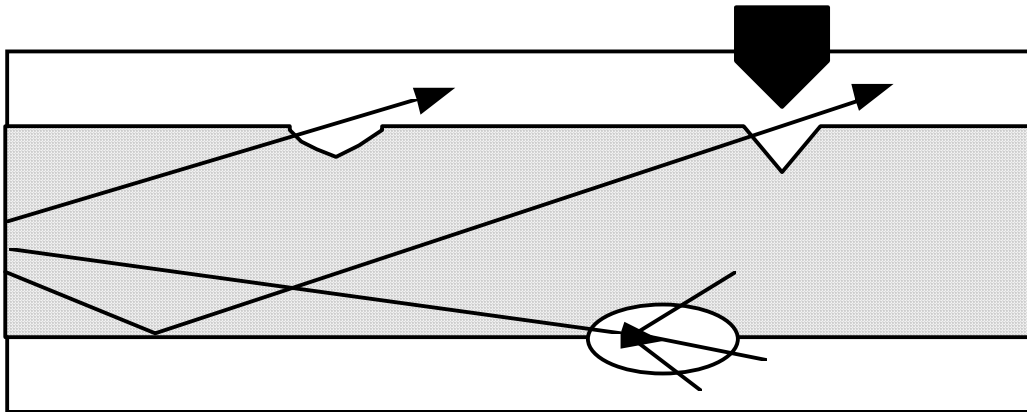
散射损耗

- 由于下列原因，光信号会损耗：
 - 光纤中的分子不均匀
 - 光纤的光学纯度不高



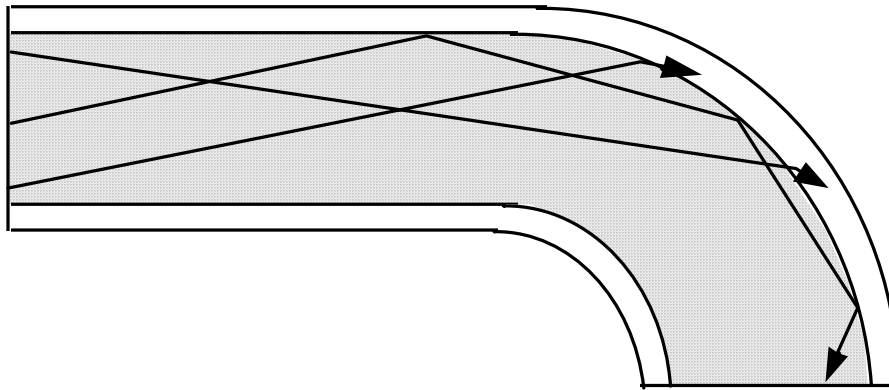
制备缺陷损耗

- 光纤内核与覆层之间的不均匀会引起如图所示的损耗

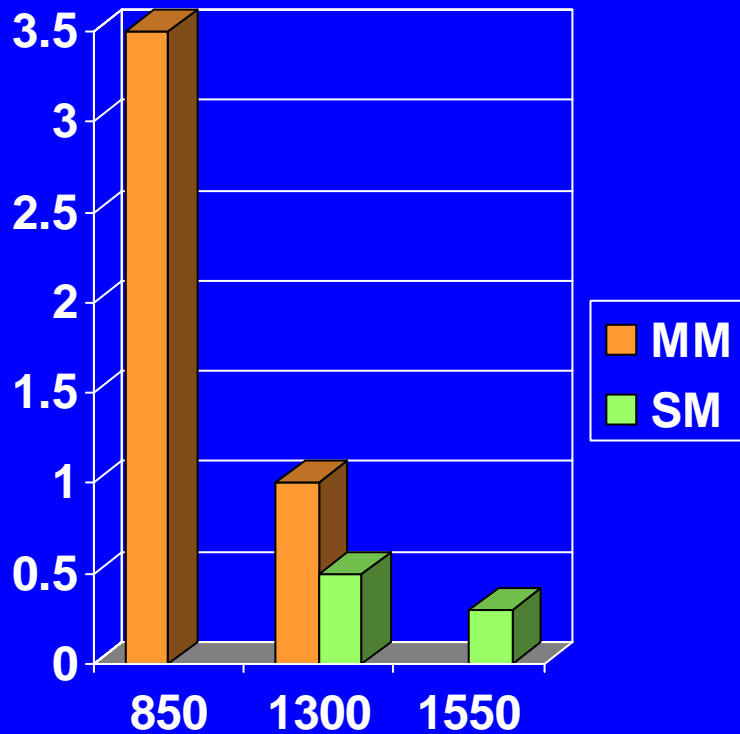


弯曲损耗

- 光纤的弯曲会造成损耗
- 光穿越叠层

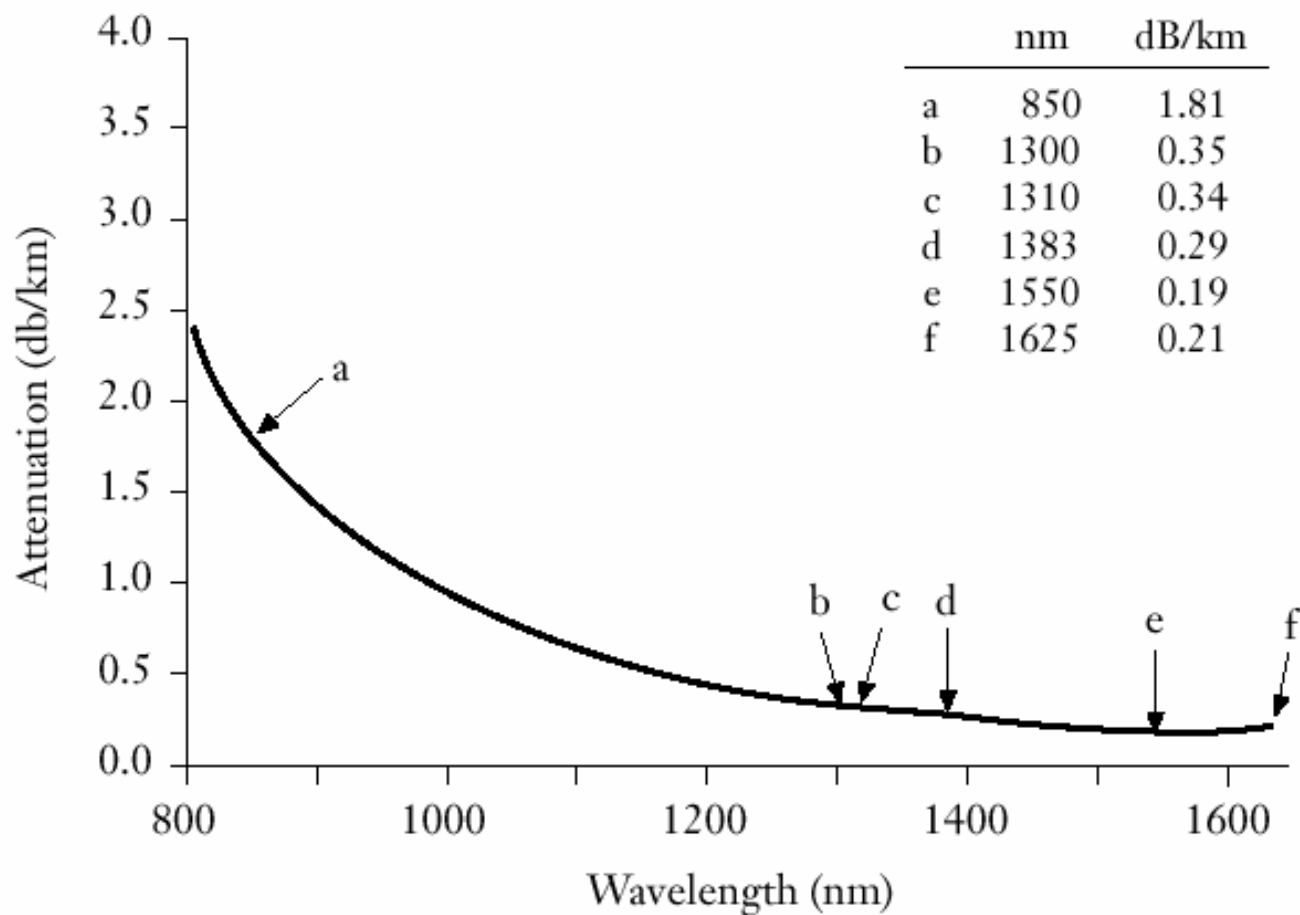


光损耗与波长



- 损耗计量：分贝/公里
- 与波长有关
- 单模损失较小
- 波长常被称作窗口
- 光谱中红外部分的影响

Spectral Attenuation (typical fiber)



Corning SMF-28E 光纤吸收谱

光纤中的色散

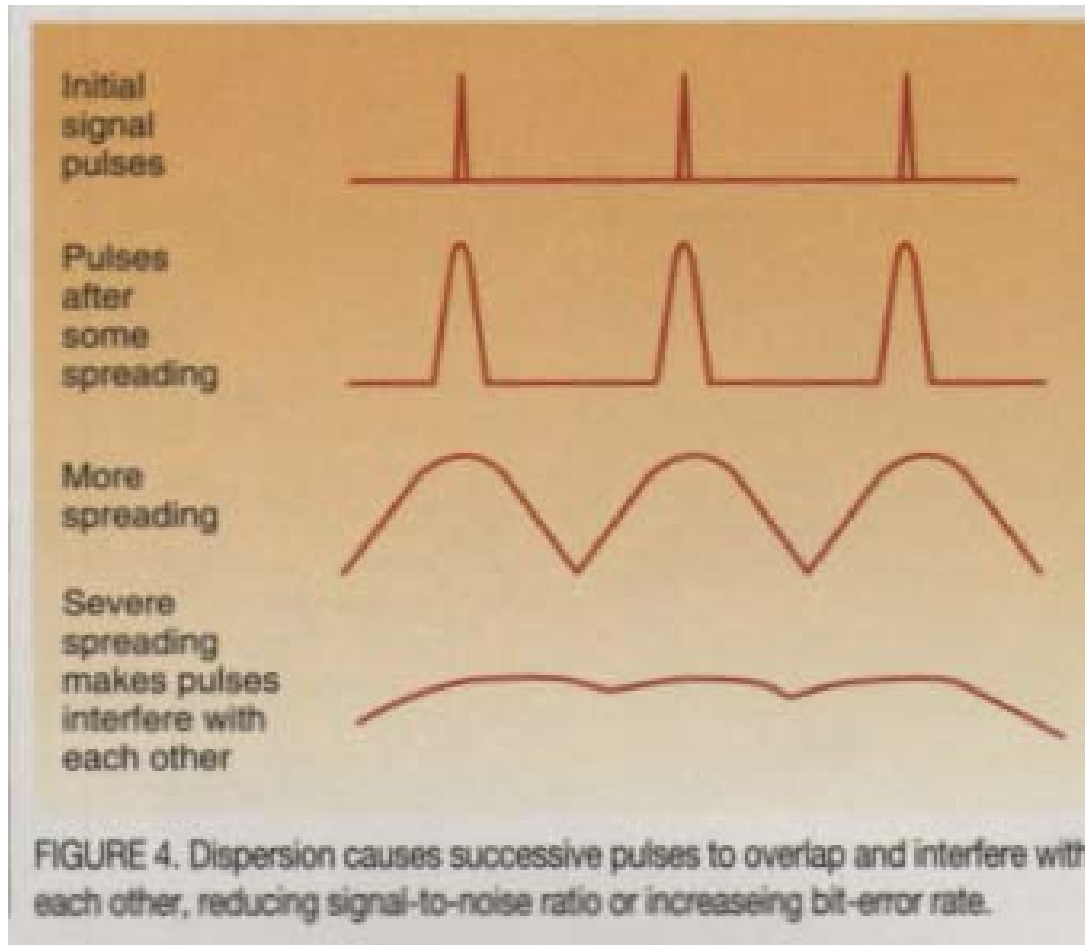
- 光纤中的色散原因：输入光纤中的光不是单色光；光纤对光信号的色散作用。
- 色散导致光脉冲发生展宽。当色散严重时，会导致光脉冲前后重叠，造成码间干扰。所以光纤色散不仅影响光纤的传输容量，也限制了光纤通信系统的中继距离。
- 光纤色散常用色散系数 $D(\lambda)$ 等表示：

$$D(\lambda) = \Delta \tau(\lambda) / \Delta \lambda \quad (\text{ps/km}\cdot\text{nm})$$

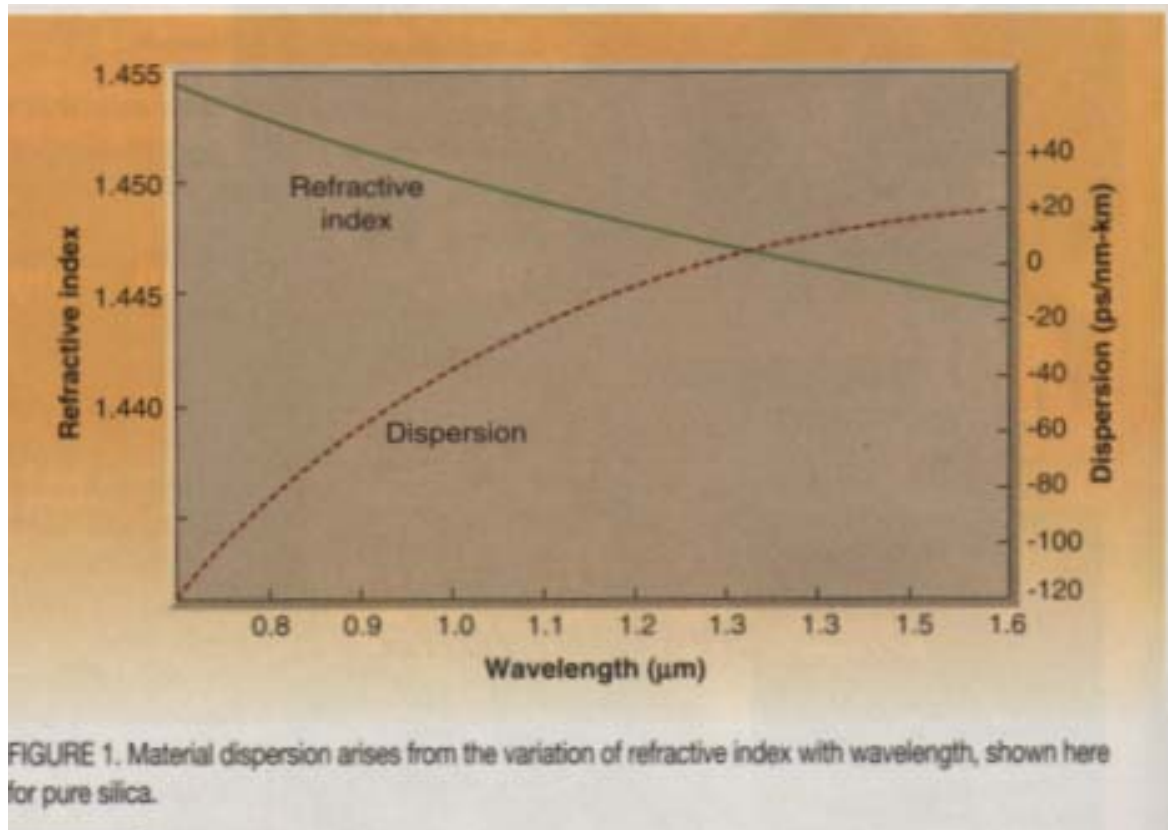
式中 $\Delta \tau(\lambda)$ 为单位长度光纤上的时延差 (ps/km)， $\Delta \lambda$ 为光源的线宽 (nm)。

Bandwidth and dispersion

带宽与色散



- Modal dispersion
- Material dispersion
- Waveguide dispersion
- Polarization-mode dispersion



— 多模光纤，模式色散为主，与频率无关

光纤中有多种传输模式，即使在同一波长，不同模式沿光纤轴向的传输速度不同，到达接收端所用的时间不同，而产生模式色散。

— 单模光纤：材料色散 + 波导色散，与 $\Delta\lambda$ 有关

材料色散： $n=n(\omega)$ ，与光纤材料有关

偏振模色散：实际光纤中存在不完善性所引起，使得沿着两个不同方向偏振的同一模式的相位常数不同，从而导致这两个模式传输不同步，形成色散。

色散位移与色散平坦光纤的折射率分布

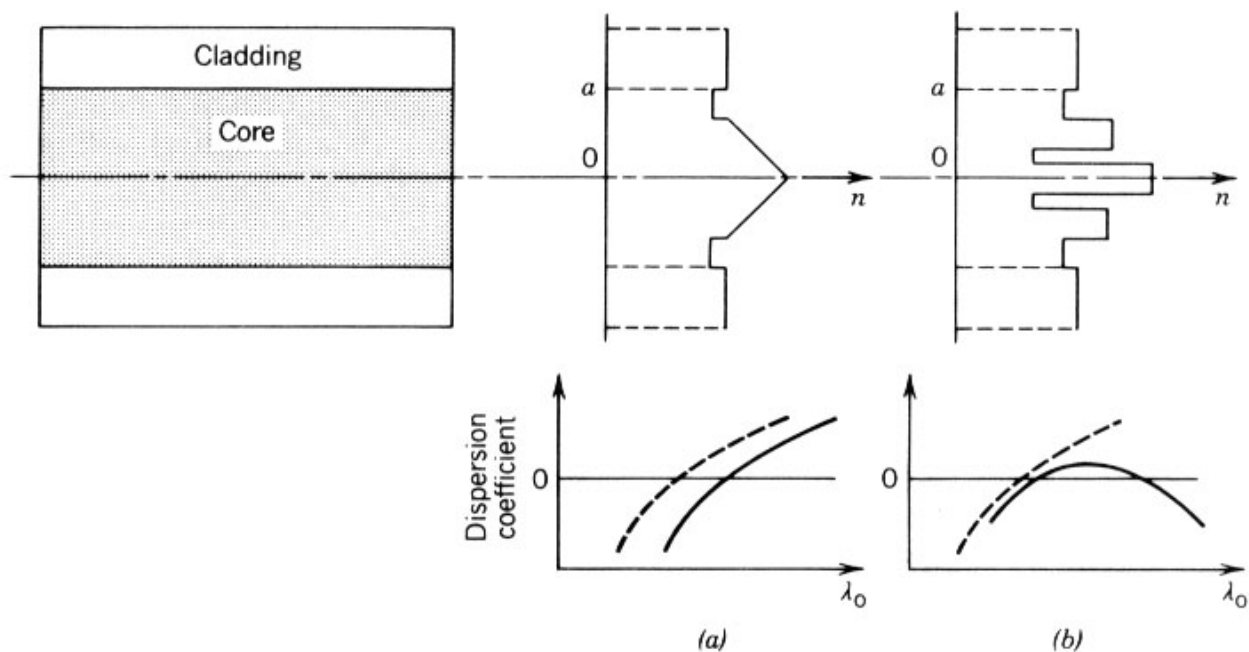
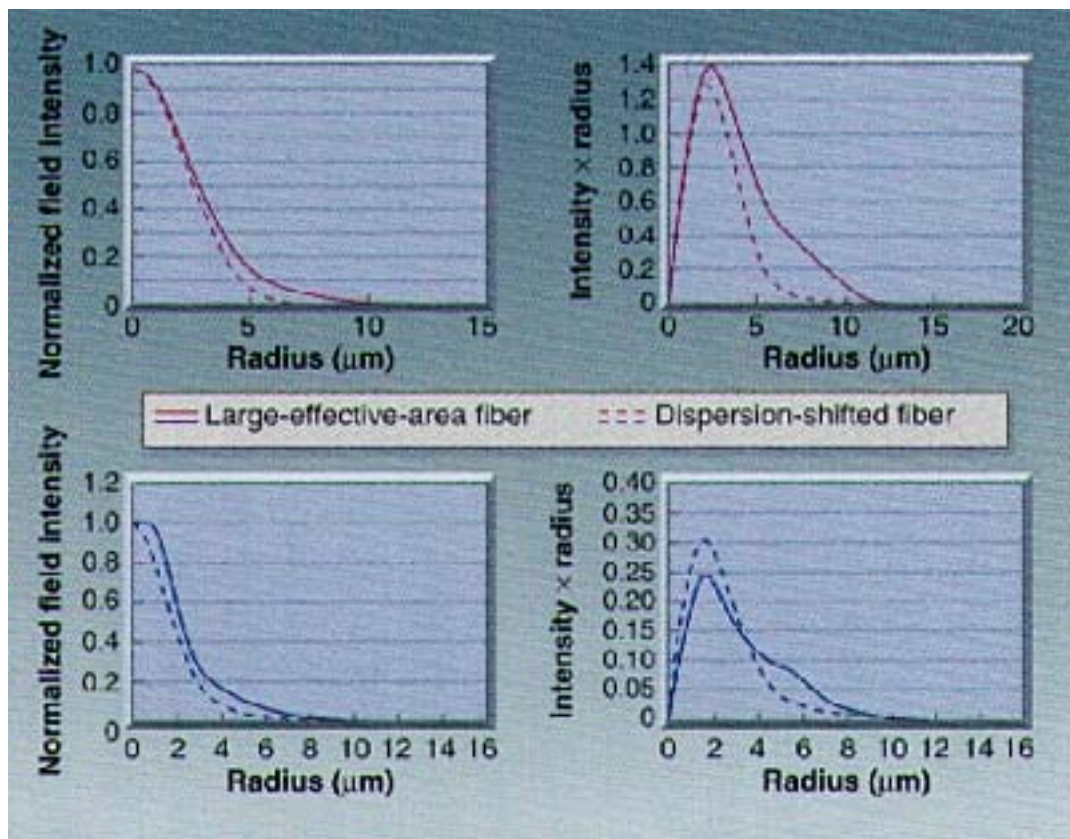
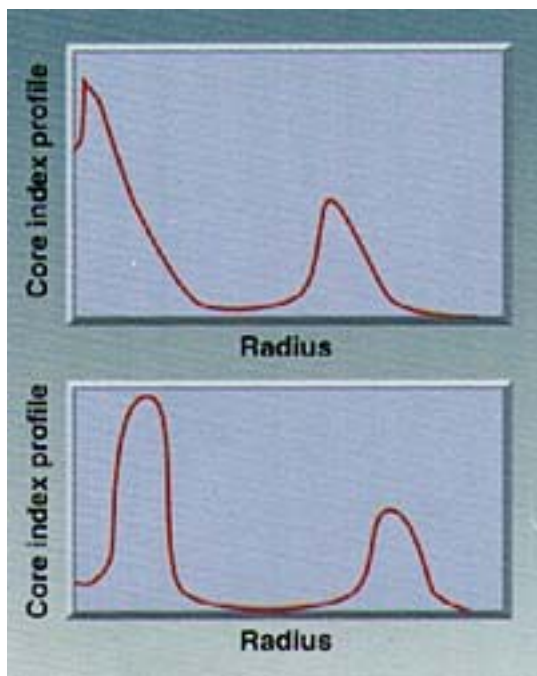


Figure 8.3-6 Refractive-index profiles and schematic wavelength dependences of the material dispersion coefficient (dashed curves) and the combined material and waveguide dispersion coefficients (solid curves) for (a) dispersion-shifted and (b) dispersion-flattened fibers.

光纤中的非线性效应

与 非零色散位移光纤、色散补偿光纤
及 大有效面积光纤

- **WDM + EDFA** : 光纤负载功率过大, 引起非线性效应
- 四波混频 (**Four Wave Mixing**)
- 交叉相位调制 (**Cross Phase Modulation**)
- 自相位调制 (**Self-Phase Modulation**)
- 调制失稳 (**Modulation Instability**)



- 大有效面积光纤（LEAF）

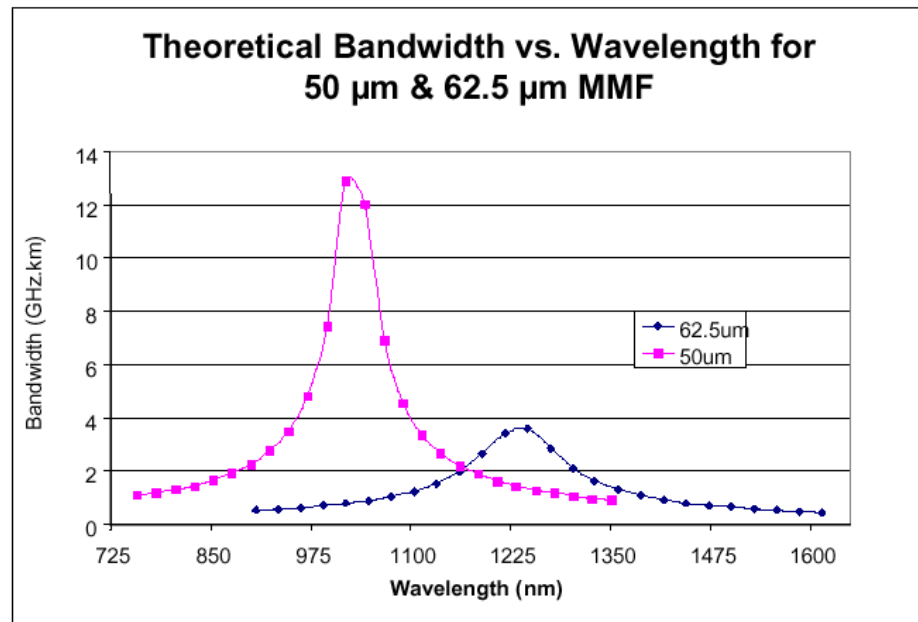
解决非线性效应的最新方案，通过改变纤芯的折射率分布，使传导模式的能量分布在更大的面积上，降低光强，从而降低非线性效应。

多模光纤

- 62.5微米最为常用
- 典型距离为8公里
- 用于:
 - 闭路电视
 - 广播
 - 数据传输
- 带宽为50-500 MHz-km

多模光纤的应用

- 局域网 (~ 500 m)
低速率
 - 十兆、百兆以太网
光纤收发器
 - 千兆以太网 (GBE)
 - 光纤通道:
(Fiber Channel)
100 M: 500 m
50 M: 1000 m
25 M: 2000 m



- 50 μm vs. 62.5 μm :
 - 数值孔径 (0.20:0.275) 62.5更适合LED注入
 - 模式数目 50 μm 模间色散更小
 - 带宽 850nm波段50 μm 更具优势

单模光纤

- 无限带宽
- 8 至 10 微米
- 典型距离超过8公里
- 用于：
 - 长途通讯
 - 长途电视信号传输
 - 长途多路广播
 - 长途数据传输
- 比电传输更便宜

光纤的制备工艺

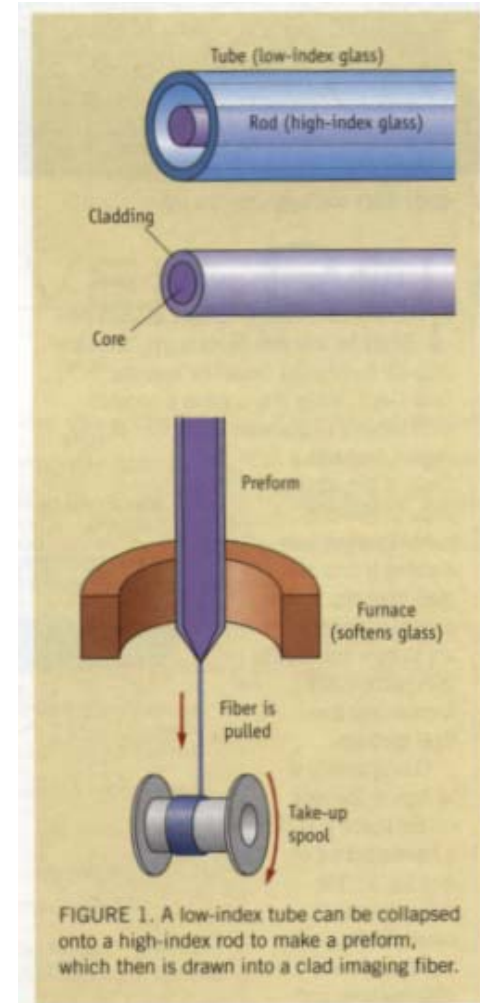
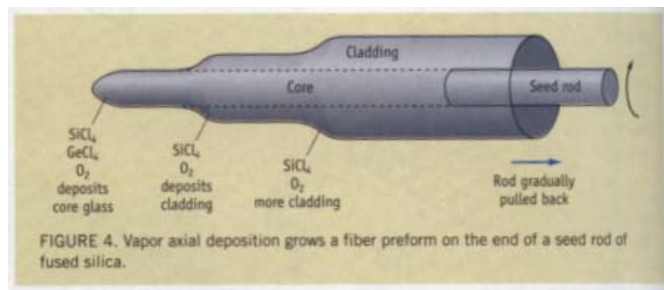
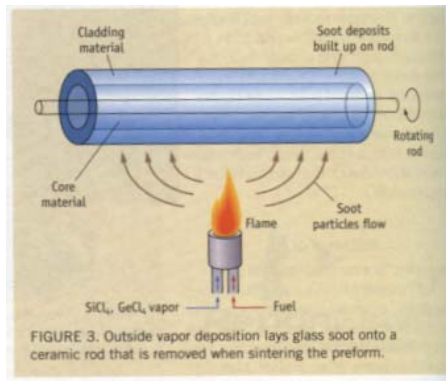
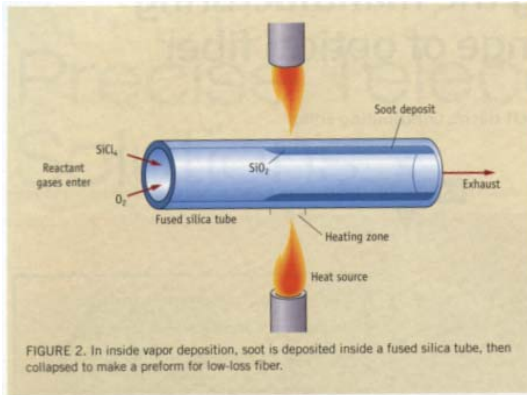
- 光纤制造

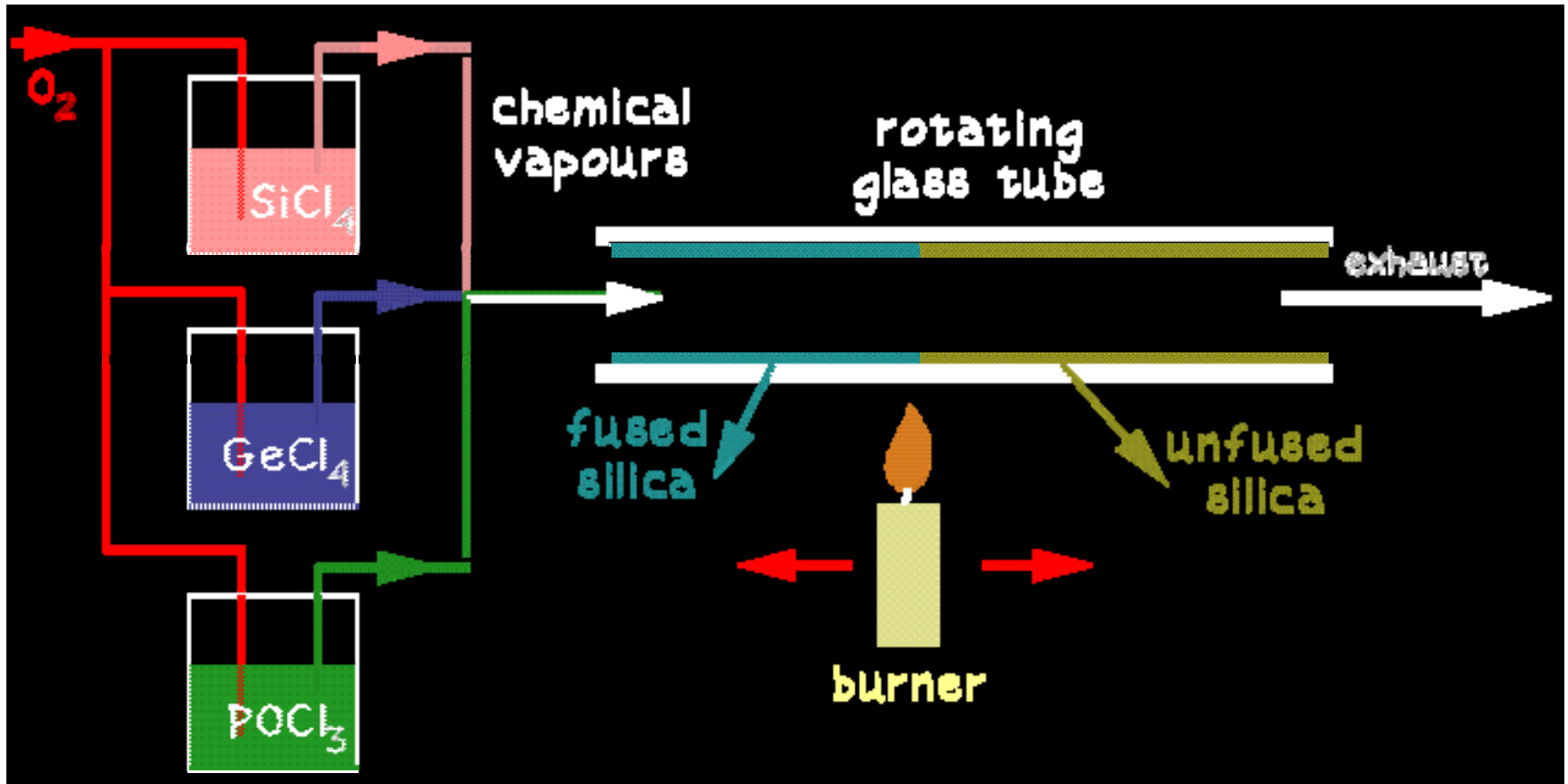
目前通信中所用一般是石英光纤。石英的化学名称为二氧化硅 (SiO_2)。但普通的石英材料制成的光纤不能用于光通信。通信光纤必须由纯度极高的材料组成；

- 在主体材料里掺入微量的掺杂剂，从而使纤芯和包层的折射率略有不同。

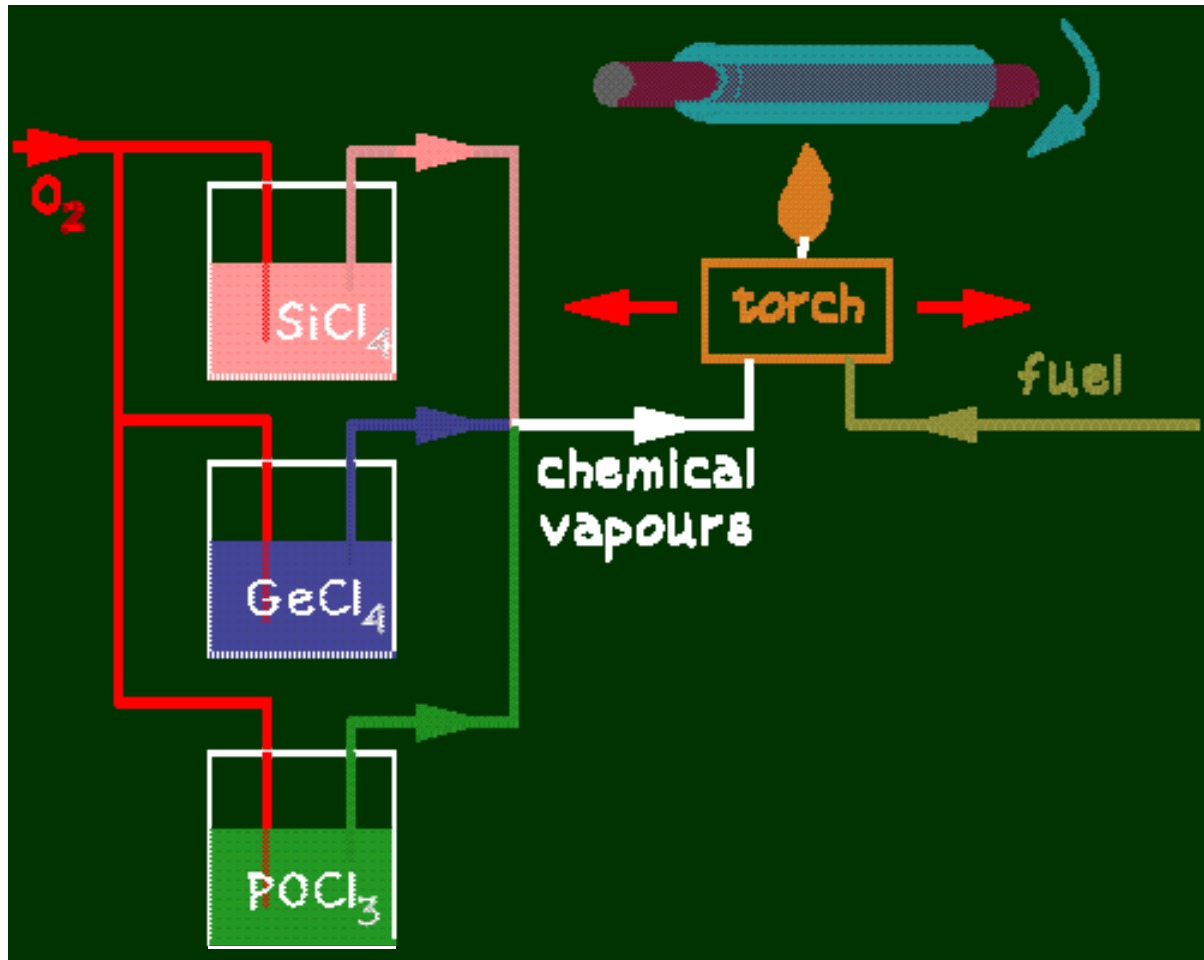
- 光纤的制造方法都要先在高温下做成光纤预制棒 [主要有：管内**CVD**(化学汽相沉积)法，棒内**CVD**法，**PCVD**(等离子体化学汽相沉积)法和**VAD**(轴向汽相沉积)法]，然后在高温炉中加温软化，拉成长丝，再进行涂覆、套塑，成为光纤芯线。
- 光纤的制造要求每道工序都要相当精密，由计算机控制。

Fiber manufacture

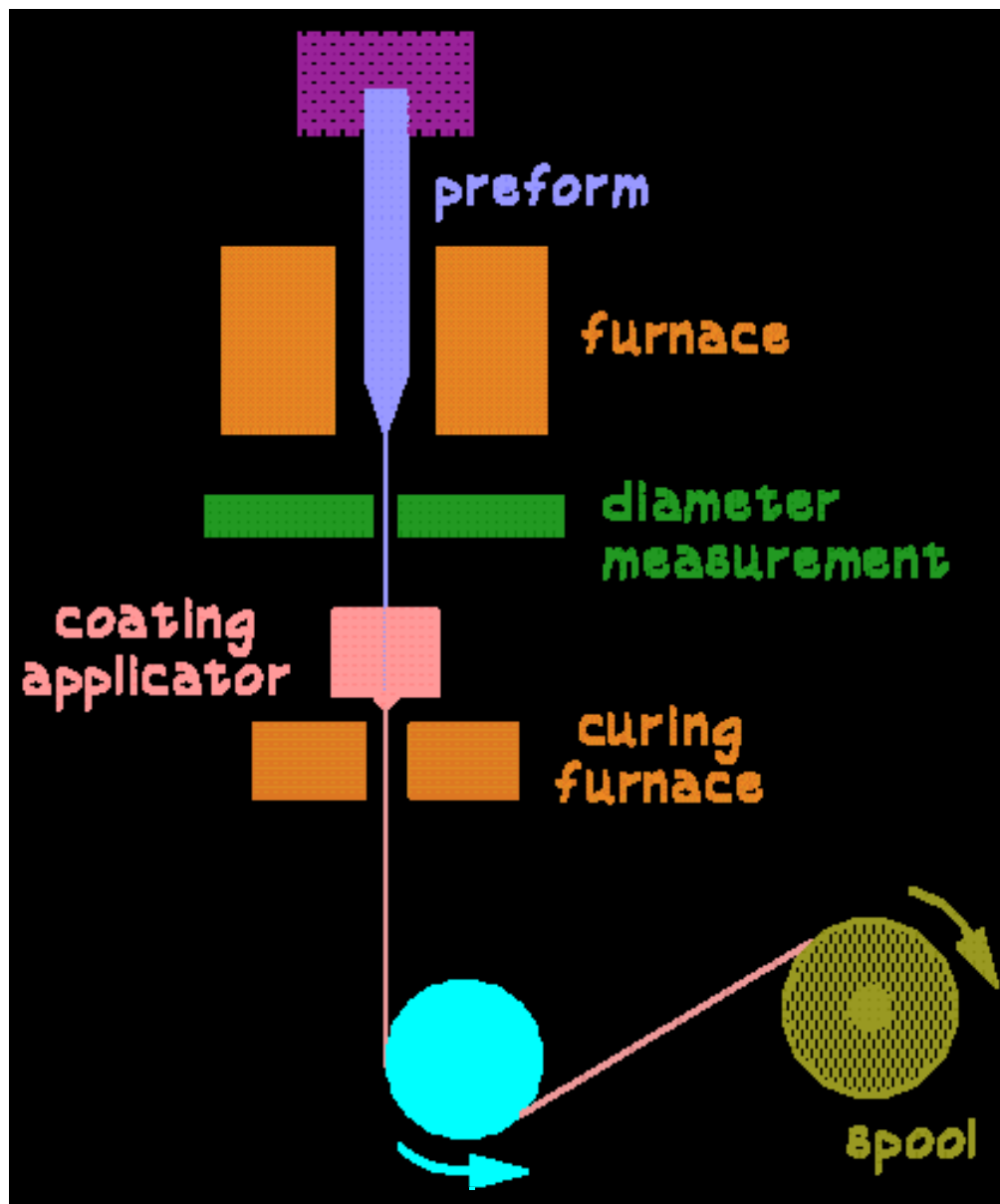




光纤预制棒 – MCVD(改进化学气相沉积)



光纤预制棒 – OVD(棒外气相沉积)



拉丝

3.2 光缆

- 我国五大光缆生产基地

- 1.湖北武汉（长飞、烽火等）
- 2.四川成都（中康、汇源等）
- 3.浙江富阳（富通、华伦、富春江等）
- 4.江苏吴江（亨通、永鼎等）
- 5.江苏南通（中天、通光等）

光缆的基本要求

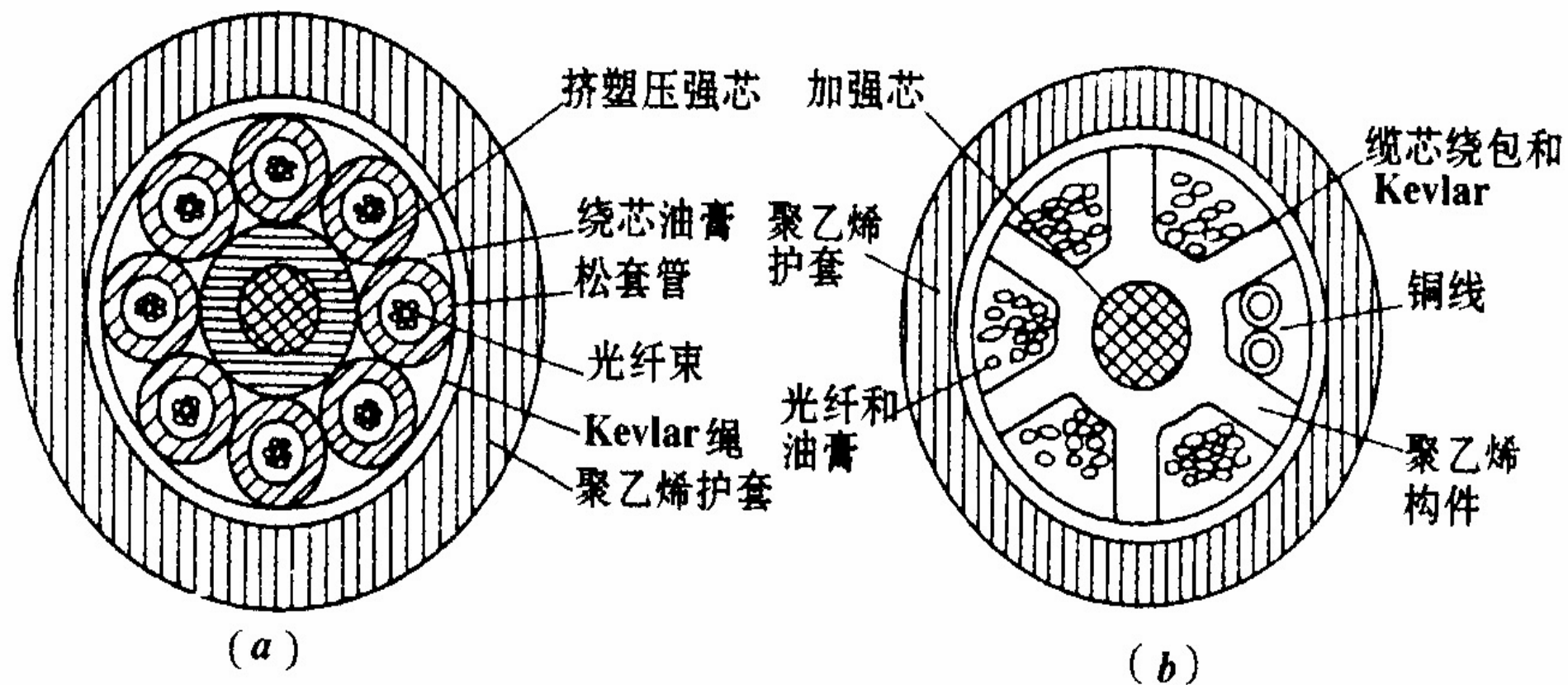
- 能对光纤提供足够的保护；
- 保留光纤比金属导线质轻、径细的优点；
- 便于铺设、维护方便。

光缆结构

- 缆芯（紧套和松套）
- 护层（一般是多层护套组合，包括：聚乙烯、聚氯乙烯、钢-塑轧纹、钢丝铠装、钢带铠装护套等）

光缆构成

常用光缆的典型构成



层绞式

骨架式

光缆特性测试

- 传输特性：光损耗
- 温度特性：
- 机械特性：抗张强度、抗冲击性、弯曲特性、柔曲性、扭转特性、抗压扁性等。

国外光纤技术发展情况

- 20世纪60年代中期，所研制的最好的光纤损耗在**400dB**以上
- 1966年英国标准电信研究所高锷及**Hockham**从理论上预言光纤损耗可降至**20dB/km**以下
- 日本于1969年研制出第一根通信用光纤损耗为**100dB/km**
- 1970年康宁公司（**Corning**）采用“粉末法”先后获得了损耗低于**20dB/km**和**4dB/km**的低损耗石英光纤
- 1974年贝尔实验室（**Bell**）采用改进的化学汽相沉积法制出性能优于康宁公司的光纤产品。
- 到1979年，掺锗石英光纤在**1.55 μm** 处的损耗已经降到**0.2dB/km**，这一数值已经十分接近由**Rayleigh**散射所决定的石英光纤理论损耗极限

国内发展状况

- **1963年**，开始光通信的研究
- **1977年**，第一根短波长(**850nm**)阶跃型石英光纤问世，损耗为**300dB/km**
- **1978年**，阶跃光纤的衰减降至**5dB/km**。研制出短波长多模梯度光纤，即**G.651**光纤
- **1979年**，研制出多模长波长光纤，衰减为**1dB/km**。建成**5.7 km**、**8Mb/s**光通信系统试验段
- **1980年** **1300nm**窗口衰减降至**0.48dB/km**，**1550nm**窗口衰减为**0.29dB/km**。
- **1981年**多模光纤活动连接器进入实用
- **1984年**武汉、天津**34Mb/s**市话中继光传输系统工程建成(多模)

- **1990年**，研制出**G.652**标准单模光纤，最小衰减达**0.35dB/km**（1992年降至**0.26dB/km**）
- **1991年**，研制出**G.653**色散位移光纤。最小衰减达**0.22dB/km**
- **1997年**，研制出**G.655**非零色散位移光纤
- “六五”、“七五”、“八五”铺设“八纵八横”光纤线路总长约七万公里
- **2000年前后**，各地“光谷”！

我国光通信技术的特点

- 光纤光缆应用已相当普遍，尽管其研制仅短短的20多年：迄今，已敷设光缆长度超过100万km，光缆已敷设到世界屋脊西藏；生产光缆的厂家有200多家，每年所用光纤的数量超过400万km。
- 在实际网络中，无论是核心网还是接入网，目前主要应用G.652光纤。在核心网中新建线路已采用G.655光纤，在接入网中已应用光纤带光缆。
- 我国光通信领域已掌握光纤(缆)、器件、系统等各方面的关键技术，逐渐走进了国际光通信的先进行列。尤其在主要技术上，都有了自己的特色和创新。

总结

- 光纤通信简史
- 光纤通信网络（传输介质：光纤、光缆）

主 讲：张荣君

电话：65643559

E-mail: rjzhang@fudan.edu.cn