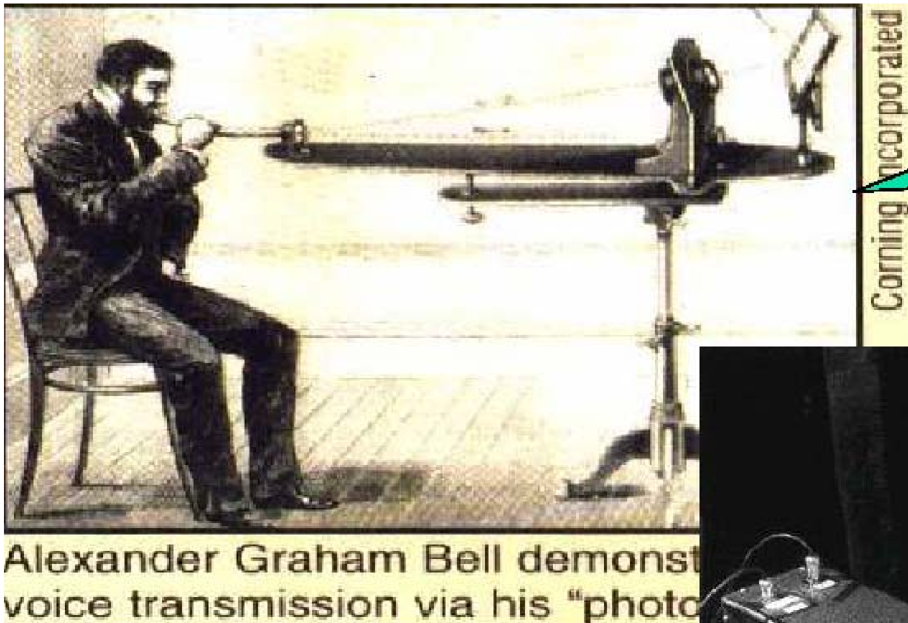
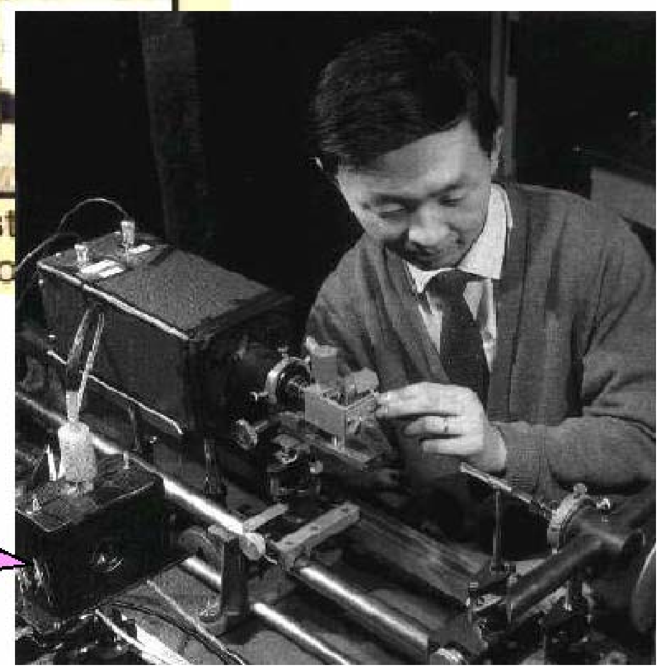
第3章 微波传输线

- 3.1 TEM，TE和TM波的一般解
- 3.2 矩形金属波导
- 3.3 圆波导
- 3.4 同轴线的高次模及单模传输
- 3.5 带状线和微带
- 3.6 介质波导

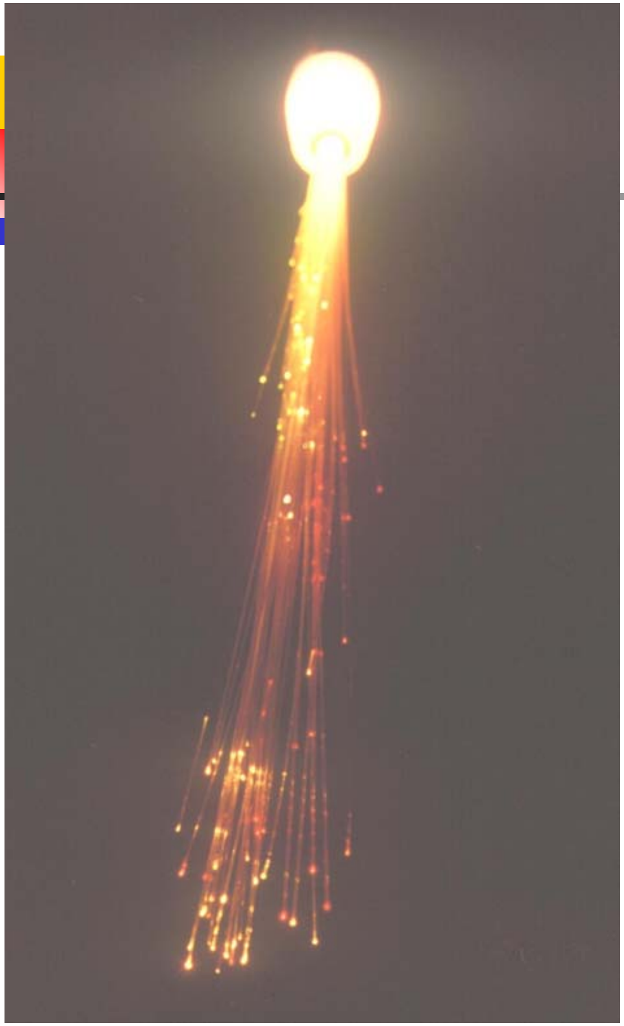
Father of Optical Fiber: Dr. Gao



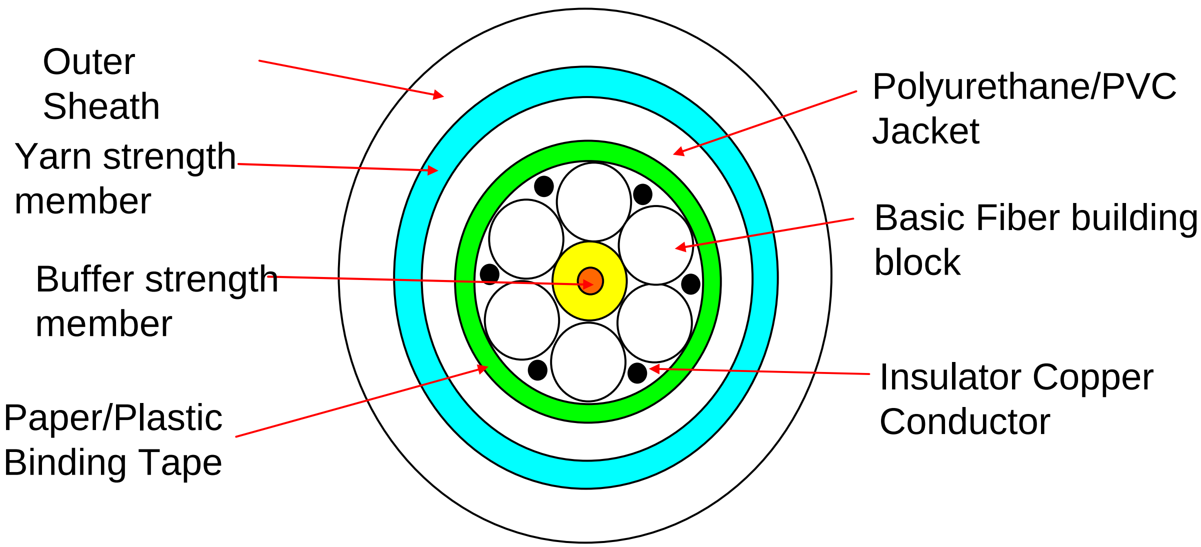
贝尔的“光话”
演示实验



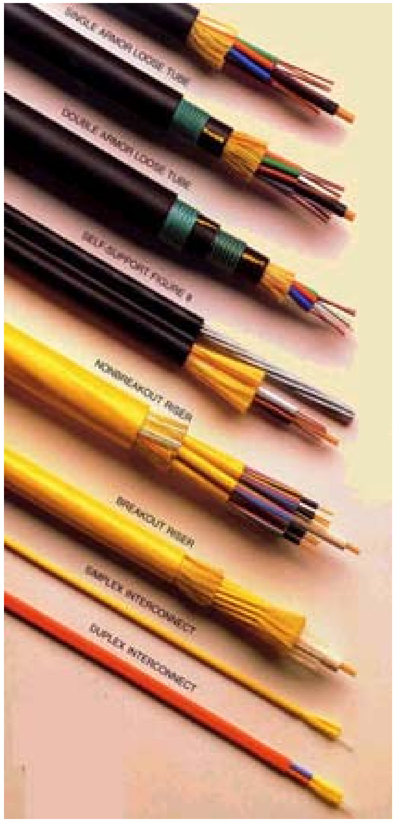
“光纤之父”高锟博士在英国
STL的早期关于光纤的实验



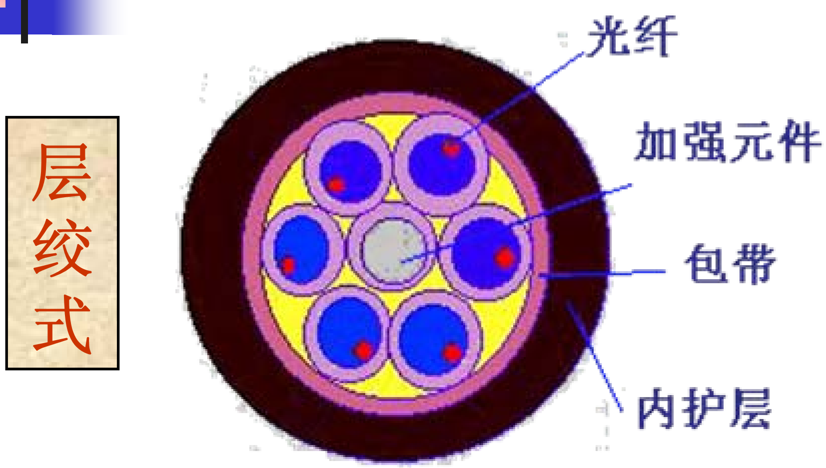
光 导 纤 维

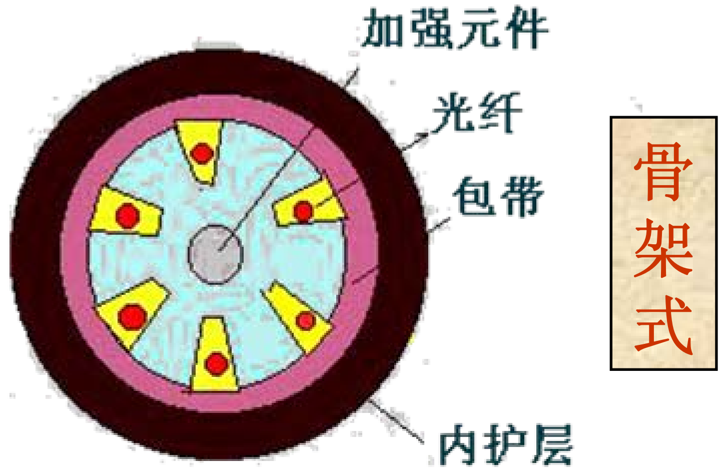


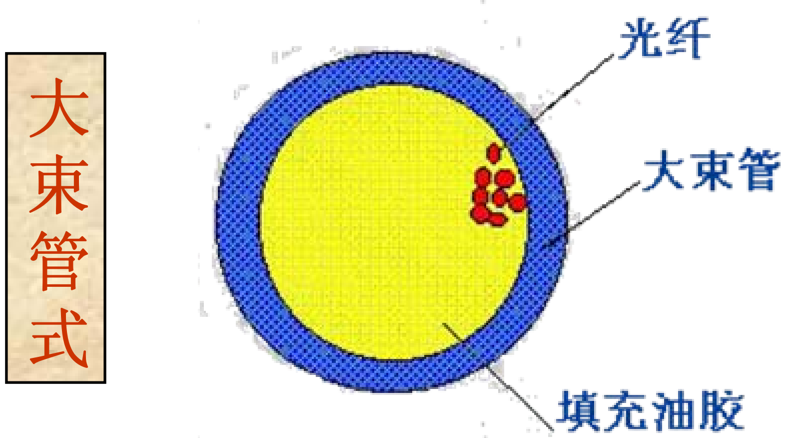
Six-fiber cable

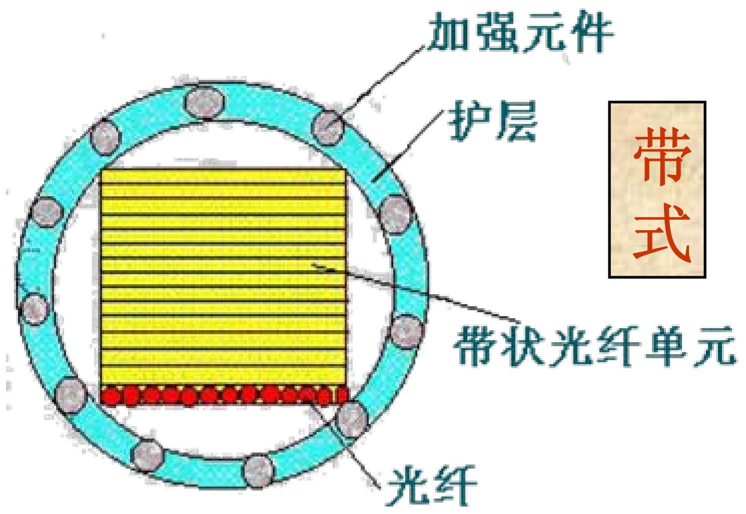


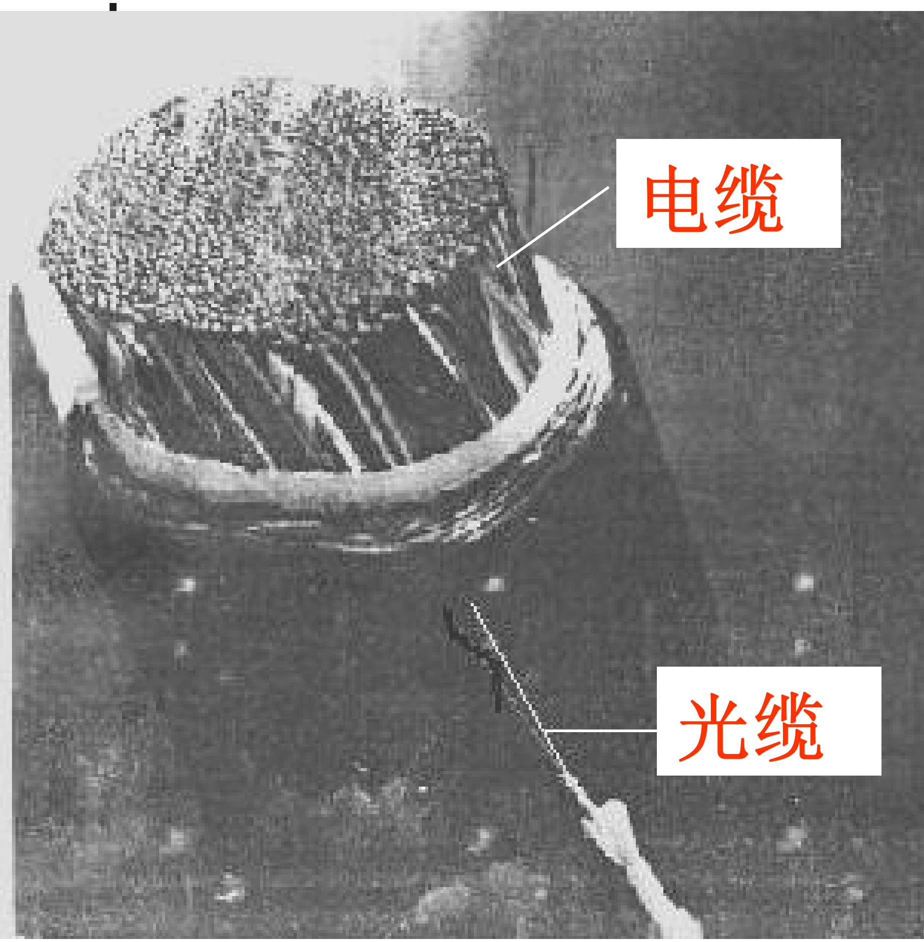
缆芯结构


层绞式
光纤
加强元件
包带
内护层


骨架式
加强元件
光纤
包带
内护层


大束管式
光纤
大束管
填充油胶


带式
加强元件
护层
带状光纤单元
光纤



光纤通信容量大，而且损耗小。

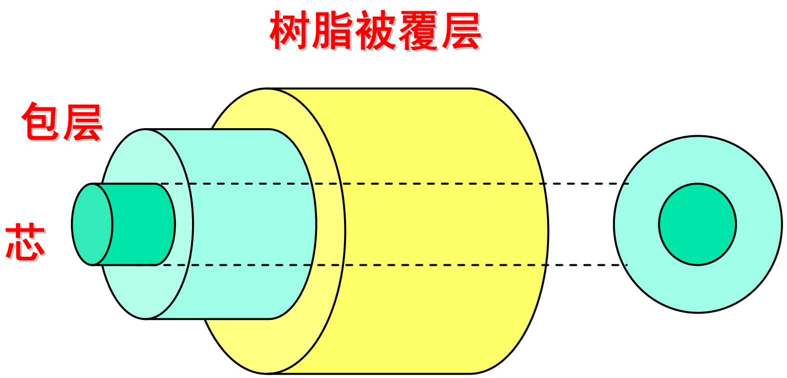
在不加中继站的情况下，光缆传输距离可达300公里。而同轴电缆只几公里，微波也只有几十公里。

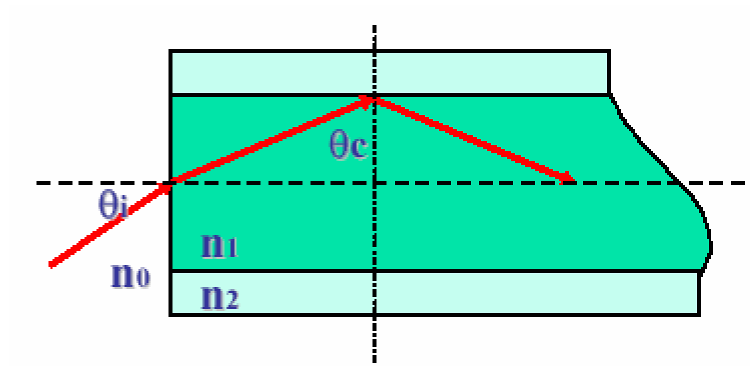
图中的细光缆和粗电缆的通信容量相同

我国电信的主干线全部都采用光缆。

介质光波导

- 光纤是一种高度透明的玻璃丝，由纯石英经复杂工艺拉制而成
- 光纤：芯（Core）+同心圆状包裹层(包层Clad)+涂覆层
- 特点：$n_{core}>n_{clad}$ ⇒光在芯和包层之间的界面上反复进行全反射，并在光纤中传递下去





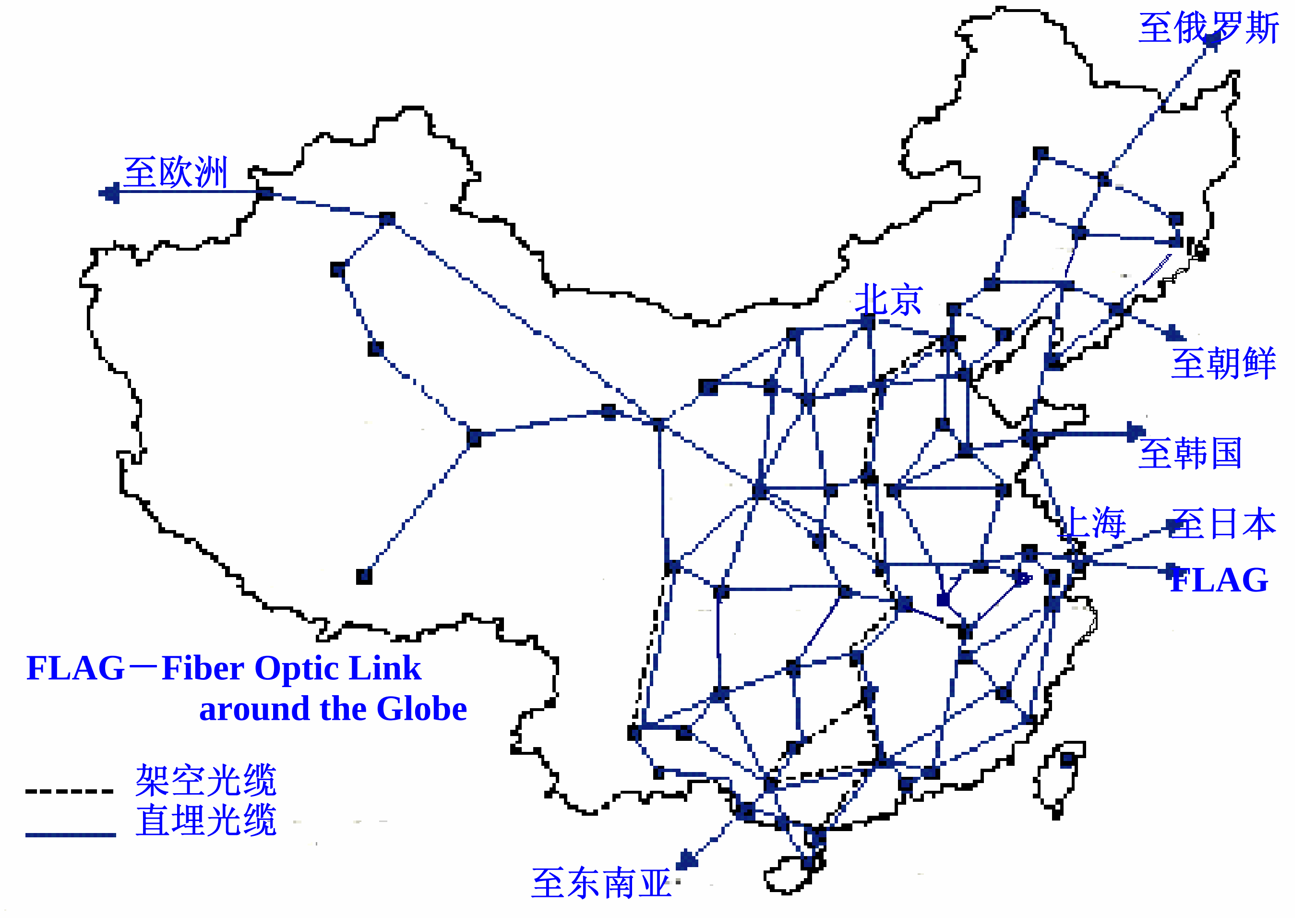
- 60年代，光纤损耗超过1000dB/km
- 1970年出现突破，光纤损耗降低到约20dB/km （1μm附近）
- 1979年，光纤损耗降到0.2dB/km （1.55 μm）→开创了光纤通信时代
- 80年代，我国光纤引入

我国光纤通信的现状

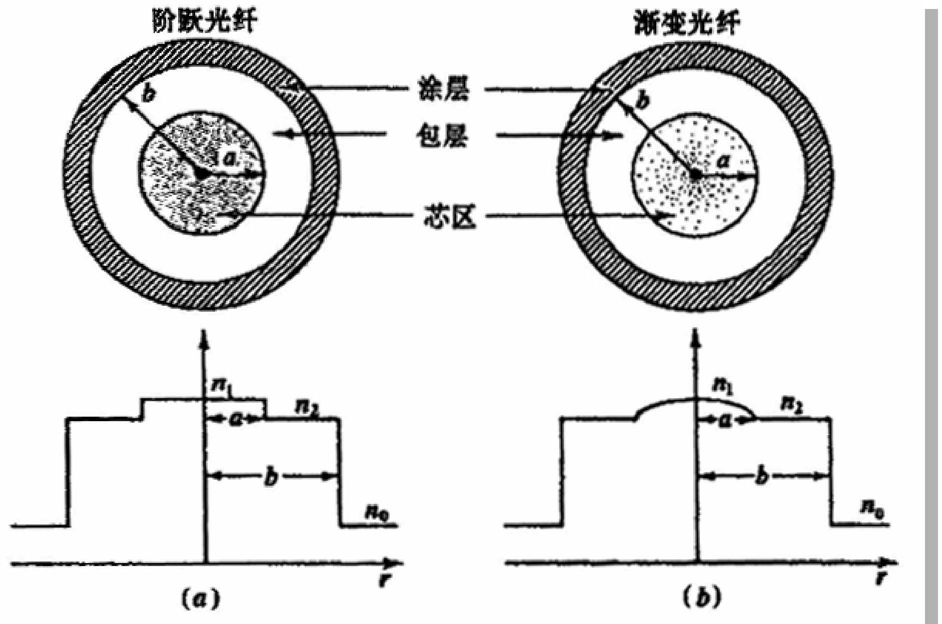
- 1986年建立了国内第一条光缆干线——宁汉光缆
- 1999年建成8纵8横光纤骨干网，覆盖了除台湾外所有省会城市和75%地市。
- 目前，我国长途骨干网的光缆长度达到了17万公里，并经中美、中日、中韩等海缆和欧亚大陆桥光缆与国际光缆网连接。
- 我国总的光缆线路总长度超过100万公里，居世界前列。

- 在光纤通信线路建设的同时，果断地将传输技术从正在广泛发展的PDH，跳越式地改用SDH (Synchronous Digital Hierarchy，同步数字系列）。
- SDH传输技术的优越性有：1、SDH在传输高速信息时，比PDH更经济有效；2、其灵活的组网能力和强大的生存能力增加了网络性能；3、根据ITU-T制定的SDH标准，能构成统一的网络，允许不同厂家设备共用。
- 目前，我国99.8%的国家长途线路均采用SDH，已拥有世界上最大的基于SDH的光纤通信网路。

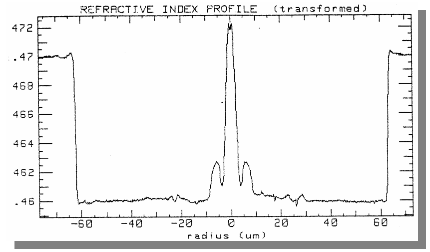
我国光缆骨干网分布图


至俄罗斯
至欧洲
北京
至朝鲜
至韩国
上海
至日本
FLAG
至东南亚
FLAG－Fiber Optic Link
around the Globe
架空光缆
直埋光缆

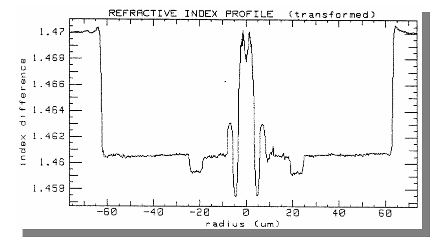
光纤芯区折射率径向分布



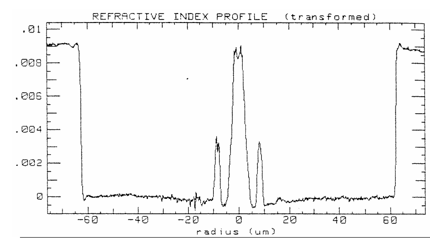
阶跃光纤(a)与渐变光纤(b)的横截面和折射率分布



CORNING： LEAF



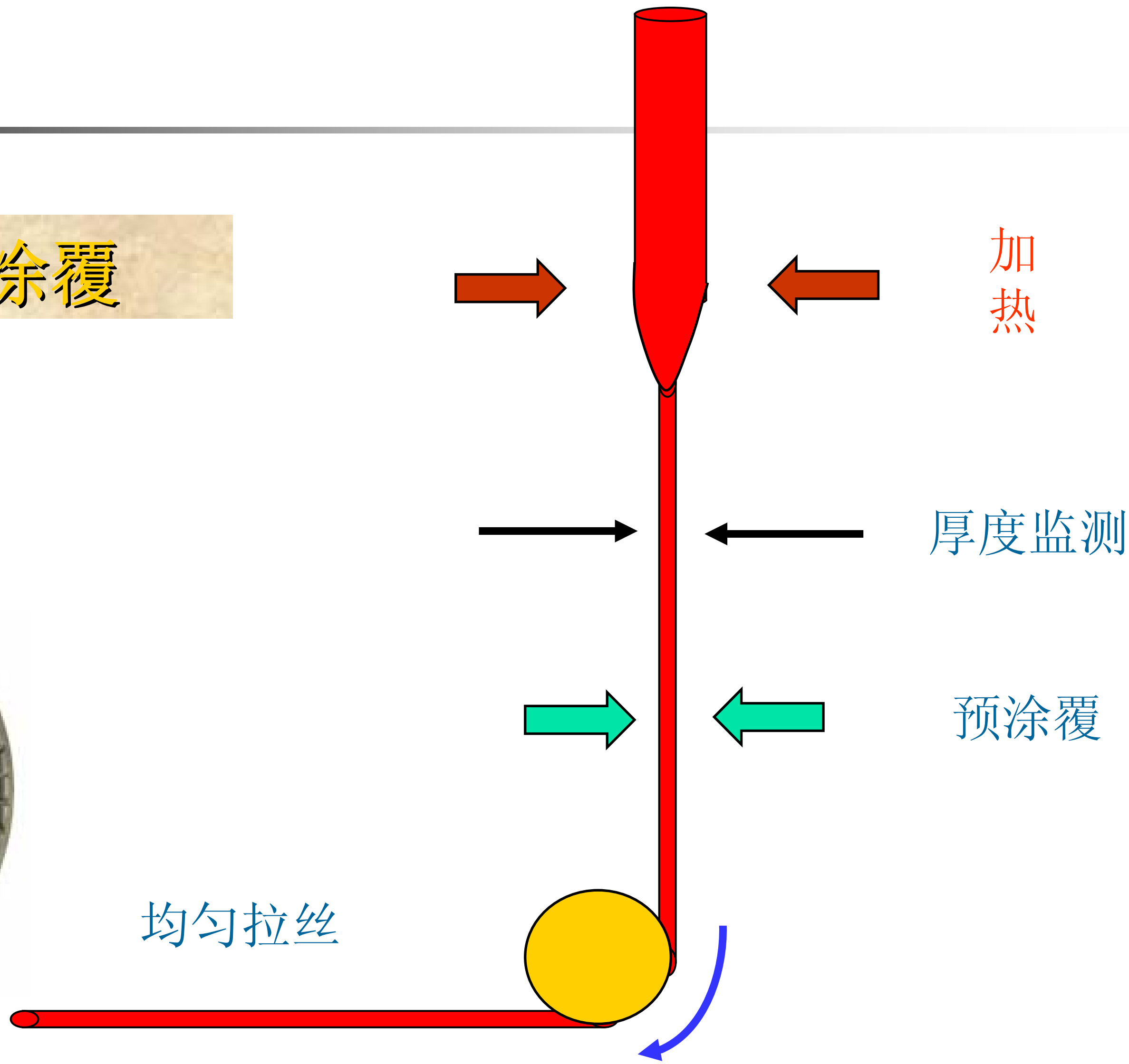
LUCENT： Truewave RS



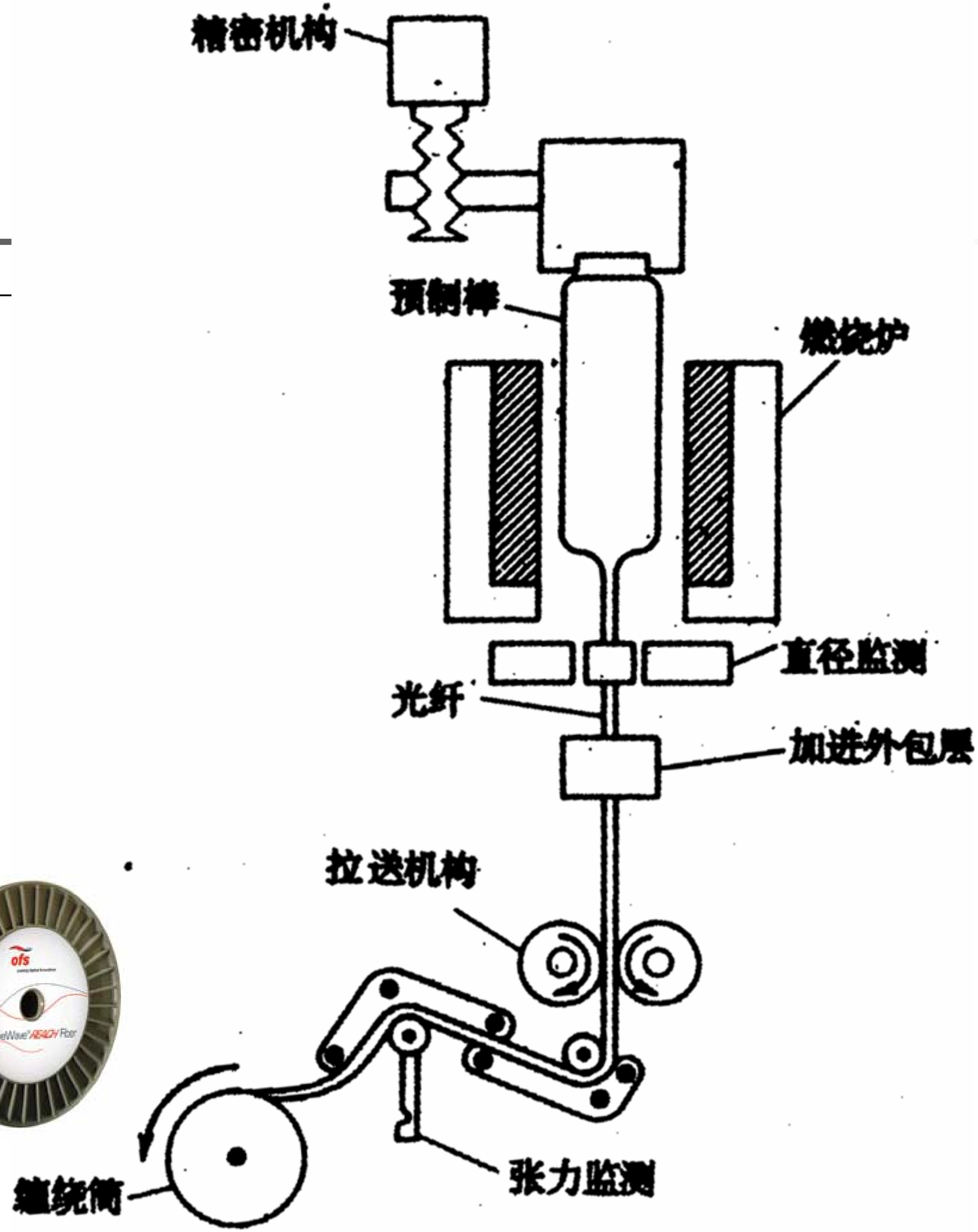
ALCATEL： TeraLight

不同的折射率分布，传输特性完全不同

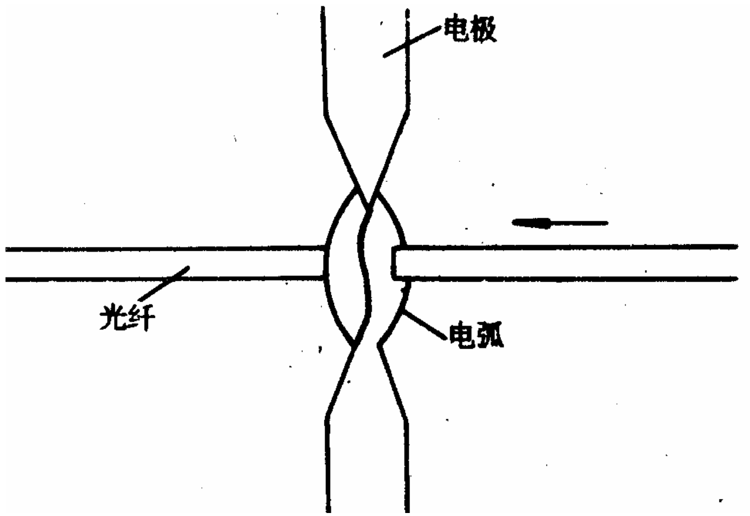
拉丝与涂覆

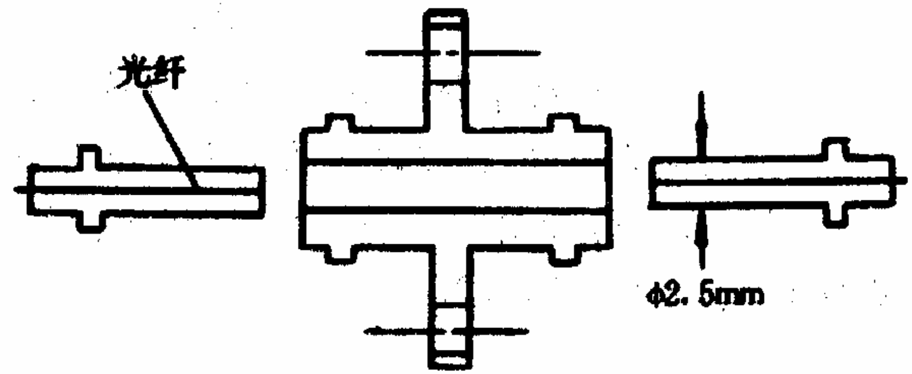


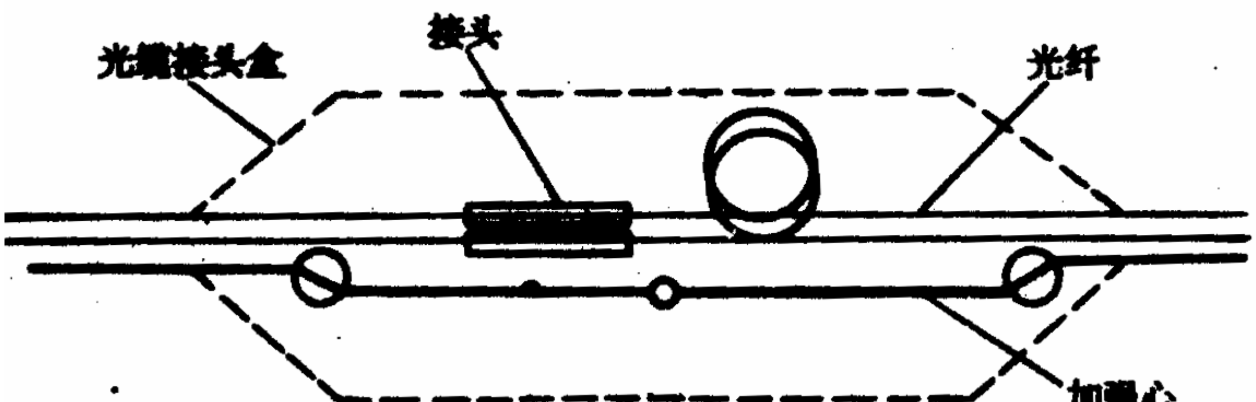
光纤的拉丝过程



■ 光纤的连接







光纤的传输特性

1. 损耗特性　　损耗谱：光纤的损耗特性曲线

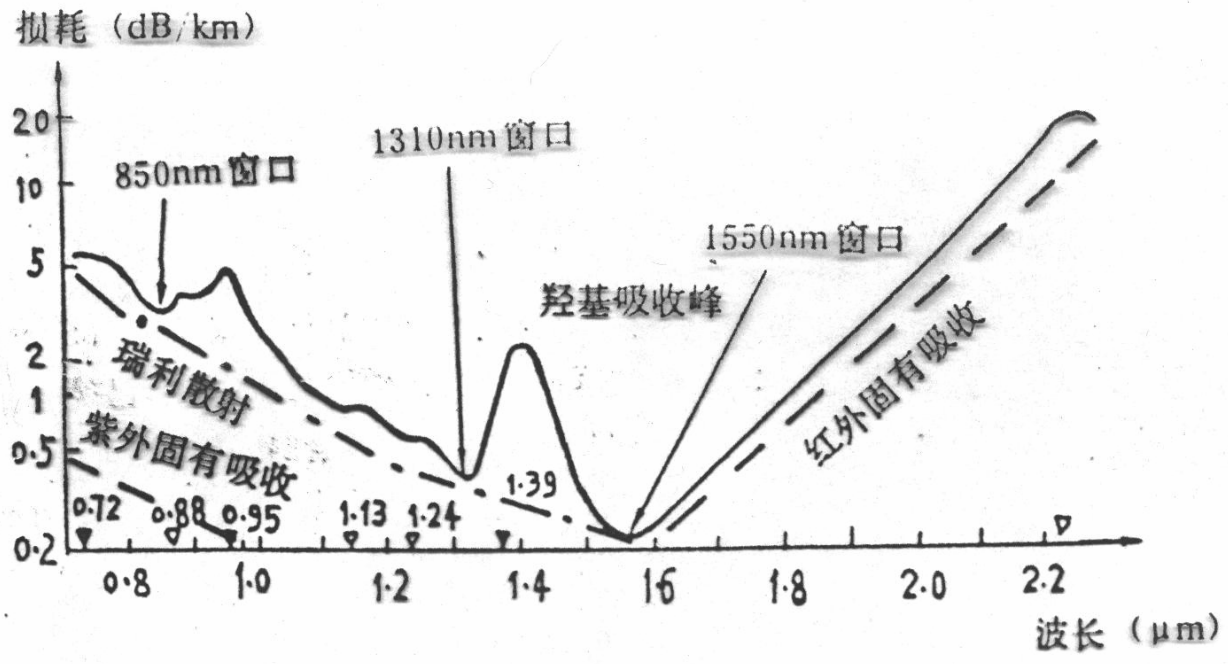


图1　光纤的损耗　波长特性

光纤的色散种类

a.模式色散:

多模光纤中每种模式的群速度不同，产生时延差。

b. 材料色散:

光纤材料的折射率随光的波长的不同而变化，各种波长的光传播速度不同，引起时延差。

c. 波导色散:

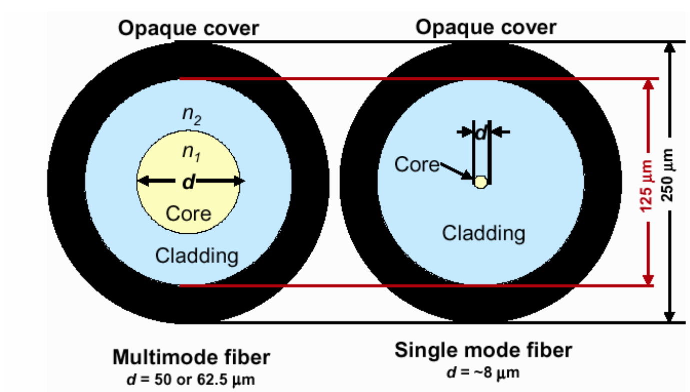
同一模式的光的相位常数随光的波长的不同而变化，各种波长的光传播速度不同，引起时延差。波导色散与折射率分布有关.

多模光纤：模式色散占主要地位.

单模光纤：材料色散和波导色散共同影响总色散.

光纤的分类

- 按照光纤传输模式的多少分：单模光纤、多模光纤
- 按照光纤截面折射率分布分：阶跃型光纤、梯度型光纤(多模光纤)、双包层（W型）和三角分布-色散位移光纤(DSF G.653),非零色散位移光纤(NZ-DSF G.655)
- ITU-T标准光纤：普通单模光纤（G.652:SMF）、色散位移光纤(G.653:DSF)和非零色散位移光纤(G.655:NZ-DSF)
- 特种光纤:保偏（PMF）、色散补偿（DCF）和掺铒光纤（EDF）等



光纤的分类

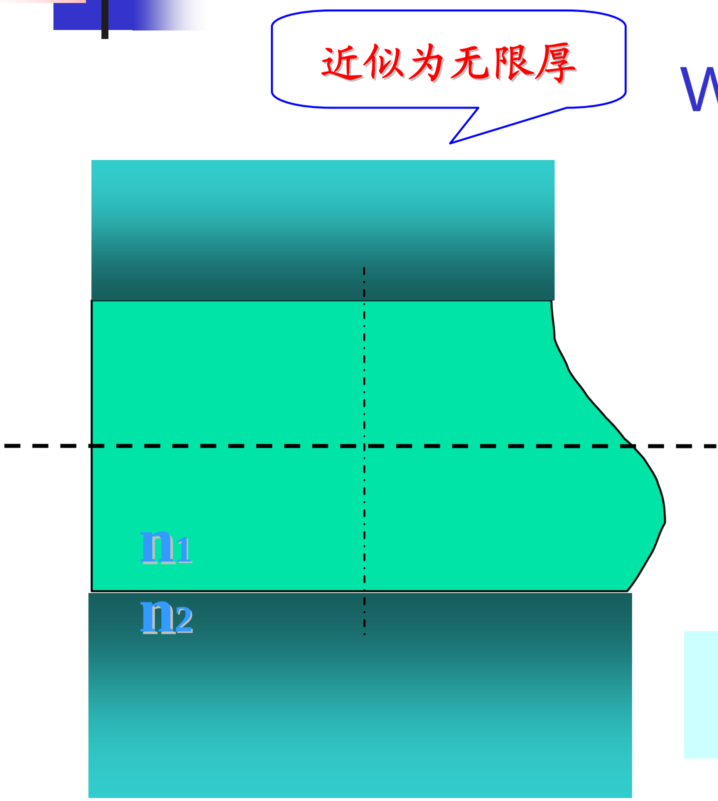
国际电信联盟电信标准化部门ITU-T标准

- G.651－多模光纤
- G.652光纤—常规单模光纤，非色散位移光纤
- G.653光纤—色散位移单模光纤
- G.654光纤—截止波长位移单模光纤
- G.655光纤—非零色散位移光纤
- 色散补偿单模光纤

阶跃折射率光纤的波动理论

- 波动方程求解
- 传播条件
- 传播模式分析
- 截止条件及单模传输
- 色散
- 模式的简并

阶跃折射率光纤的波动理论求解－1



Wave equations

$$\nabla^2\tilde{\mathbf{E}}+\omega^2\mu\cdot\varepsilon\tilde{\mathbf{E}}=0$$

$$\tilde{\mathbf{E}}(r,\phi,z)=\tilde{\mathbf{E}}(r,\phi)\cdot\tilde{Z}(z)$$

$$\nabla_t^2\tilde{\mathbf{E}}(r,\phi)+\left(\omega^2\mu\varepsilon+T^2\right)\cdot\tilde{\mathbf{E}}(r,\phi)=0$$

$$K_c^2=\omega^2\mu\cdot\varepsilon+T^2=k^2+T^2$$

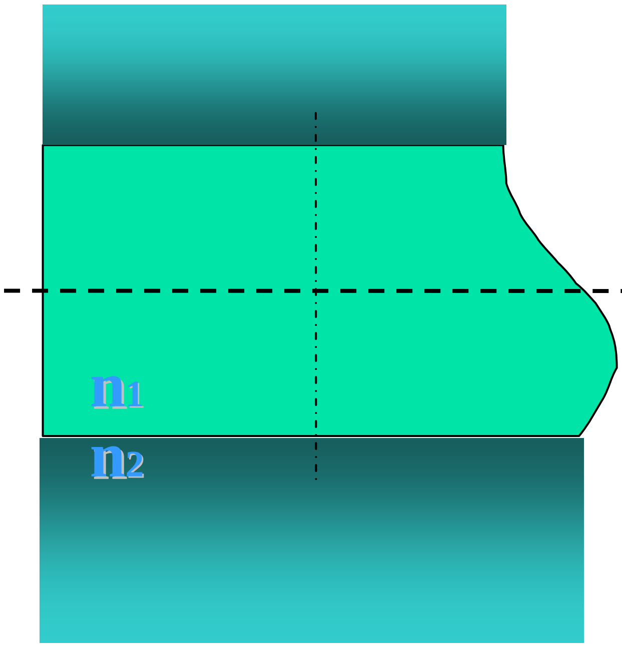
$$\tilde{\mathbf{E}}(r,\phi)=\left\{\mathrm{E}_r(r,\phi),\mathrm{E}_\phi(r,\phi),\mathrm{E}_Z(r,\phi)\right\}\longrightarrow\tilde{\mathbf{E}}$$

$$n(r)=\begin{cases}n_1 & r\le a\\ n_2 & r>a\end{cases}$$

$$\nabla_t^2\tilde{\mathbf{E}}(r,\phi)+K_c^2\cdot\tilde{\mathbf{E}}(r,\phi)=0\Rightarrow\begin{cases}\nabla_t{}^2\tilde{\mathrm{E}}_r+K_c{}^2\cdot\tilde{\mathrm{E}}_r=0\\ \cdots\\ \nabla_t{}^2\tilde{\mathrm{E}}_z+K_c{}^2\cdot\tilde{\mathrm{E}}_z=0\end{cases}$$

阶跃折射率光纤的波动理论求解－2

First We want to get Ez or Hz:



$$\begin{cases} \nabla_t^{\,2}\tilde{\mathrm{E}}_z(r,\phi)+K_c^{\,2}\cdot\tilde{\mathrm{E}}_z(r,\phi)=0 \\ \nabla_t^{\,2}\tilde{\mathrm{H}}_z(r,\phi)+K_c^{\,2}\cdot\tilde{\mathrm{H}}_z(r,\phi)=0 \end{cases}$$

$$\nabla_t^{\,2}\tilde{\mathrm{U}}(r,\phi)+K_c^{\,2}\cdot\tilde{\mathrm{U}}(r,\phi)=0 \quad \tilde{\mathrm{U}}(r,\phi)=\tilde{\mathrm{R}}(r)\cdot\tilde{\Phi}(\phi)$$

$$\frac{r}{\mathrm{R}}\frac{d\mathrm{R}}{dr}\left(r\cdot\frac{d\mathrm{R}}{dr}\right)+K_c^{\,2}\cdot r^2=-\frac{1}{\Phi}\frac{d^2\Phi}{d\phi^2}\quad=Cons\tan t\ =i^2$$

$$\Phi_m(\phi)=A_m\sin(m\phi)+B_m\cos(m\phi)=\begin{matrix}\cos(m\phi)\\ \sin(m\phi)\end{matrix}$$

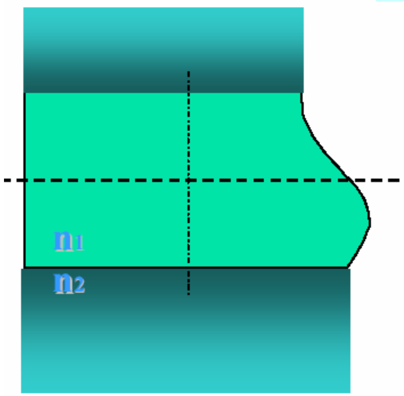
$$\frac{d^2R}{dr^2}+\frac{1}{r}\frac{dR}{dr}+\left(K_c^2-\frac{m^2}{r^2}\right)R=0$$

$$K_c^2=\omega^2\mu\varepsilon+T^2=k^2-\beta^2$$

阶跃折射率光纤的波动理论求解－3

$k_0^{\ 2}=\omega^2\mu_0\varepsilon_0$

$$\frac{d^2R}{dr^2}+\frac{1}{r}\frac{dR}{dr}+\left(K_c^2-\frac{m^2}{r^2}\right)R=0$$



归一化相移常数 u

① $r\le a$ 时，引入 $u^2=a^2K_c^2$ 即 $u^2=a^2\left(n_1^2k_0^2-\beta^2\right)$

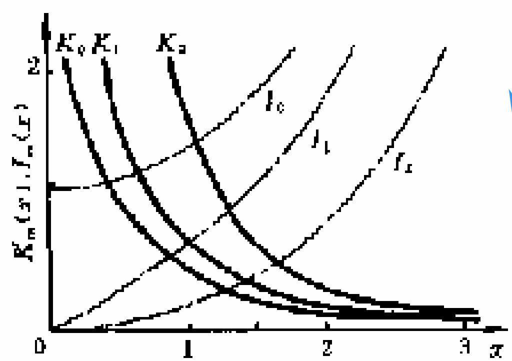
Bessel Function: $$\frac{d^2R}{dr^2}+\frac{1}{r}\frac{dR}{dr}+\left(\frac{u^2}{a^2}-\frac{m^2}{r^2}\right)R=0$$

$$R(r)=C_1J_m(ur/a)+C_2\cancel{N_m(ur/a)}$$

$$n(r)=\begin{cases} n_1=\sqrt{\varepsilon_1/\varepsilon_0} & r\le a \\ n_2=\sqrt{\varepsilon_2/\varepsilon_0} & r>a \end{cases}$$

归一化衰减常数 w

② $r>a$ 时，引入 $w^2=-a^2K_c^2$ 即 $w^2=a^2\left(\beta^2-n_2^2k_0^2\right)$



变态Bessel Function: $$\frac{d^2R}{dr^2}+\frac{1}{r}\frac{dR}{dr}-\left(\frac{w^2}{a^2}+\frac{m^2}{r^2}\right)R=0$$

$$R(r)=D_1\cancel{I_m(wr/a)}+D_2K_m(wr/a)$$

$r\to\infty$ $\quad I_m(wr/a)\to\infty$ $\quad K_m(wr)\to e^{-wr}\to 0$

实际：不存在

阶跃折射率光纤的波动理论求解－4

$$E_Z(r,\phi)=\begin{cases}A_1 J_m(ur/a)\begin{matrix}\cos m\phi\\ \sin m\phi\end{matrix} & r\le a\\ A_2 K_m(wr/a)\begin{matrix}\cos m\phi\\ \sin m\phi\end{matrix} & r>a\end{cases}\qquad H_Z(r,\phi)=\begin{cases}B_1 J_m(ur/a)\begin{matrix}\cos m\phi\\ \sin m\phi\end{matrix} & r\le a\\ B_2 K_m(wr/a)\begin{matrix}\cos m\phi\\ \sin m\phi\end{matrix} & r>a\end{cases}$$

$$\begin{cases}\vec{E}_T=\dfrac{1}{K_c^2}\left(\dfrac{\partial}{\partial z}\nabla_T E_z+j\omega\mu\vec{z}\times\nabla_T H_z\right)\\ \vec{H}_T=\dfrac{1}{K_c^2}\left(\dfrac{\partial}{\partial z}\nabla_T H_z-j\omega\varepsilon\vec{z}\times\nabla_T E_z\right)\end{cases}$$

光纤芯径和
包层场结构

$$\mathrm{E}_r=-\frac{j}{K_c^{\,2}}\left(\beta\frac{\partial \mathrm{E}_z}{\partial r}+\frac{\omega\mu_0}{r}\frac{\partial \mathrm{H}_z}{\partial\phi}\right)$$

$$\mathrm{E}_\phi=-\frac{j}{K_c^{\,2}}\left(\frac{\beta}{r}\frac{\partial \mathrm{E}_z}{\partial\phi}-\omega\mu_0\frac{\partial \mathrm{H}_z}{\partial r}\right)$$

$$\mathrm{H}_r=-\frac{j}{K_c^{\,2}}\left(\beta\frac{\partial \mathrm{H}_z}{\partial r}-\frac{\omega\varepsilon}{r}\frac{\partial \mathrm{E}_z}{\partial\phi}\right)$$

$$\mathrm{H}_\phi=-\frac{j}{K_c^{\,2}}\left(\frac{\beta}{r}\frac{\partial \mathrm{H}_z}{\partial\phi}+\omega\varepsilon\frac{\partial \mathrm{E}_z}{\partial r}\right)$$

两种无损介
质分界面没
有自由电荷
和面电流

$$\vec{n}\times\left(\vec{E}_1-\vec{E}_2\right)=0\rightarrow E_{1t}=E_{2t}$$

$$\vec{n}\times\left(\vec{H}_1-\vec{H}_2\right)=\vec{J}_s=0\rightarrow H_{1t}=H_{2t}$$

$$\begin{cases}E_{z1}=E_{z2}\\ E_{\varphi1}=E_{\varphi2}\end{cases}\qquad\begin{cases}H_{z1}=H_{z2}\\ H_{\varphi1}=H_{\varphi2}\end{cases}$$

$$\left[\frac{J_m'(u)}{uJ_m(u)}+\frac{K_m'(w)}{wK_m(w)}\right]\cdot\left[n_1^2\frac{J_m'(u)}{uJ_m(u)}+n_2^2\frac{K_m'(w)}{wK_m(w)}\right]=\left(\frac{\beta m}{k_0}\right)^2\left(\frac{1}{u^2}+\frac{1}{w^2}\right)$$

传输模特
性方程

阶跃折射率光纤中模式分析

传输模特性方程

$$\left[\frac{J'_m(u)}{uJ_m(u)}+\frac{K'_m(w)}{wK_m(w)}\right]\cdot\left[n_1^2\frac{J'_m(u)}{uJ_m(u)}+n_2^2\frac{K'_m(w)}{wK_m(w)}\right]=\left(\frac{\beta m}{k_0}\right)^2\left(\frac{1}{u^2}+\frac{1}{w^2}\right)$$

其中 $k_0{}^2=\omega^2\mu_0\varepsilon_0$　$u^2=a^2\left(n_1^2k_0^2-\beta^2\right)$　$w^2=a^2\left(\beta^2-n_2^2k_0^2\right)$

给定 $n_1,n_2,a,\omega(k_0)$ ➡ β_{mn} ➡ 对应模式

- 模式：每一个传输常数对应着一种可能的光场分布
- 对每个m，都存在多个解－记为β_{mn}。每个β_{mn}对应于一个光场分布。
- 对应于每组（mn），本征方程又包含两组解，两组解的Ez和Hz相对值不同：

混合模：场的六个分量都存在

$m>0$
- 当Hz >Ez，称为HEmn模
- 当Hz <Ez，称为EHmn模

$m=0$ ➡

$$\begin{cases}E_{z1}=0\\E_{z2}=0\end{cases}\qquad \frac{J_1(u)}{uJ_0(u)}+\frac{K_1(w)}{wK_0(w)}=0\qquad \text{TE}_{0n}\text{模}$$

$$\begin{cases}H_{z1}=0\\H_{z2}=0\end{cases}\qquad n_1^2\frac{J_1(u)}{uJ_0(u)}+n_2^2\frac{K_1(w)}{wK_0(w)}=0\qquad \text{TM}_{0n}\text{模}$$

阶跃折射率光纤中传播条件

传输模特性方程

$$\left[\frac{J_m'(u)}{uJ_m(u)}+\frac{K_m'(w)}{wK_m(w)}\right]\cdot\left[n_1^2\frac{J_m'(u)}{uJ_m(u)}+n_2^2\frac{K_m'(w)}{wK_m(w)}\right]=\left(\frac{\beta m}{k_0}\right)^2\left(\frac{1}{u^2}+\frac{1}{w^2}\right)$$

其中 $k_0{}^2=\omega^2\mu_0\varepsilon_0$　　$u^2=a^2\left(n_1^2k_0^2-\beta^2\right)$　　$w^2=a^2\left(\beta^2-n_2^2k_0^2\right)$

给定 $n_1,n_2,a,\omega(k_0)$ ➡ β_{mn} ➡ 对应模式

$$E_Z(r,\phi)=\begin{cases}A_1J_m(ur/a)\begin{matrix}\cos m\phi\\ \sin m\phi\end{matrix} & r\le a\\ A_2K_m(wr/a)\begin{matrix}\cos m\phi\\ \sin m\phi\end{matrix} & r>a\end{cases}$$

考虑 $u^2=a^2K_c^2$ 纤芯中u为实数　　$\beta\le k_0n_1$

否则对应Kc为虚数，波长也为虚数

$wr\to\infty$ 时，$K_m(wr)\to e^{-wr}\to 0$　$w>0,\ \beta>k_0n_2$

w

为虚数时，包层电磁场沿 r 方向为辐射状态

W<0，辐射状态

不能沿z方向传输

传输条件：$u^2>0\to$ $\underline{k_0n_2<\beta<k_0n_1}$

截止、传输临界条件：$w=0\to$ $\underline{k_0n_2=\beta}$

弱导近似下光纤中各种模式的截止条件-1

弱导近似: $\Delta \approx (n_1 - n_2)/n_1 << 1, n_1 \approx n_2$

$$u^2 = a^2\left(n_1^2 k_0^2 - \beta^2\right)$$

TE_{0n}模和TM_{0n}模:

特征方程近似为

$$\frac{J_1(u)}{uJ_0(u)} + \frac{K_1(w)}{wK_0(w)} = 0$$

推出截止条件

$$J_0(u) = 0$$

解为

$u_{01} = 2.4048$ $\quad u_{02} = 5.5201 \quad \cdots$

对应 $TE(M)_{01}$ $\quad TE(M)_{02}$的截止条件

EH_{mn}模: $\quad J_m(u) = 0, u > 0 \quad u_{11} = 3.8317 \quad u_{21} = 5.1356 \quad \cdots$

HE_{mn}模:

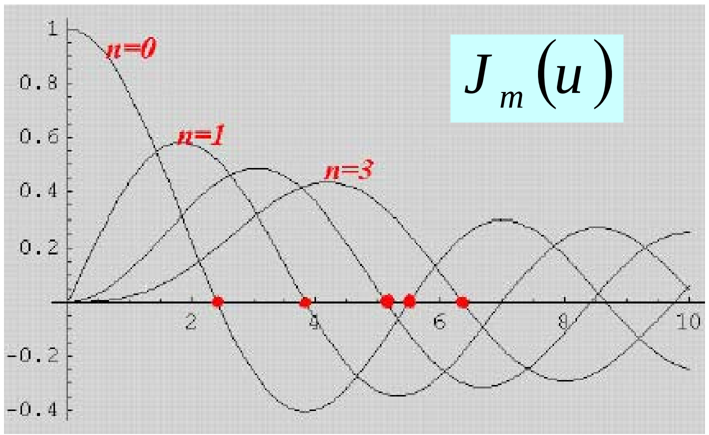
- HE_{1n}模 (m=1) $\quad J_1(u) = 0 \quad u_{11} = 0 \quad u_{12} = 3.8317 \quad \cdots$
- HE_{mn}模 (m>1) $\quad J_{m-2}(u) = 0, u > 0$

截止波长无穷大，截止频率为0→主模

$u_{01} = 2.4048$

$u_{02} = 5.5201$

$\cdots$



弱导近似下光纤中各种模式的截止条件-2

$$\begin{cases} u^2 = a^2\left(n_1^2 k_0^2 - \beta^2\right) \\ w^2 = a^2\left(\beta^2 - n_2^2 k_0^2\right) \end{cases}$$

$n_1, n_2, a, \omega(k_0) \Rightarrow \beta_{mn}$

截止波长

截止条件: $w = 0 \to \quad k_0 n_2 = \beta \Rightarrow u_c^2 = a^2\left(n_1^2 k_c^2 - n_2^2 k_c^2\right) \Rightarrow \lambda_c = 2\pi / k_c$

归一化频率 $V=\sqrt{u^2+w^2} = \dfrac{2\pi a}{\lambda_0}\sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx \dfrac{2\pi a}{\lambda_0} n_1\sqrt{2\Delta}$

弱导近似时

截止条件下（$w=0$）$V_c = u_c = \dfrac{2\pi a}{\lambda_c}\sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx \dfrac{2\pi a}{\lambda_c} n_1\sqrt{2\Delta}$

传输条件 $V > V_c = u_c \approx \dfrac{2\pi a}{\lambda_c} n_1\sqrt{2\Delta}$

TE01、TM01和HE21模

截止条件

HE11模 $u_c = 0$

单模传输条件: $0 < V = \dfrac{2\pi a}{\lambda_0}\sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx \dfrac{2\pi a}{\lambda_0} n_1\sqrt{2\Delta} < 2.4048$

阶跃折射率光纤的色散

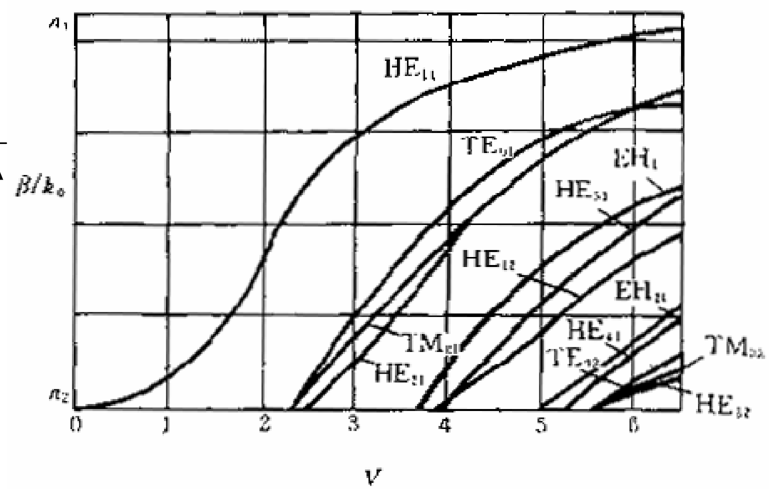
光纤色散：光信号中的不同频率分量的传播速度不同，而引起信号失真

Chromatic dispersion causes different wavelengths of a light pulse to travel at different speeds in fiber, resulting in pulse spreading

$$\begin{cases} u^2 = a^2\left(n_1^2 k_0^2 - \beta^2\right) \\ w^2 = a^2\left(\beta^2 - n_2^2 k_0^2\right) \end{cases} \qquad n_1, n_2, a, \omega(k_0) \Rightarrow \beta_{mn}$$

$$V = \sqrt{u^2 + w^2} = \frac{2\pi a}{\lambda_0}\sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx \frac{2\pi a}{\lambda_0} n_1 \sqrt{2\Delta}$$

$$v_p = \omega / \beta$$



色散类型

- 模内色散：材料色散n (λ) 、波导色散β (λ)
- 模间色散（仅多模光纤）
- 偏振模色散

弱导近似下光纤中模式的简并

弱导近似:

$$\Delta \approx (n_1 - n_2)/n_1 << 1, n_1 \approx n_2$$

- Ez和Hz 都很小（远小于横向分量：准TEM波），TE0n、TH0n和HE2n三类、 HEm+1,n和EHm-1,n 两类具有相同的传播常数－简并，用LPmn表示
- 简并模（横向分量场）线性叠加后具有线偏振性，故又称LP模为线偏振模（linearly Polarized Mode）
- 弱导近似下的近似处理，实际并不存在，简化分析