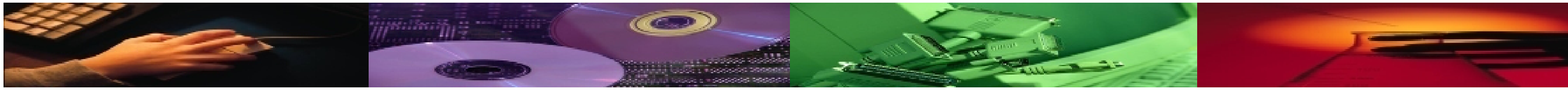
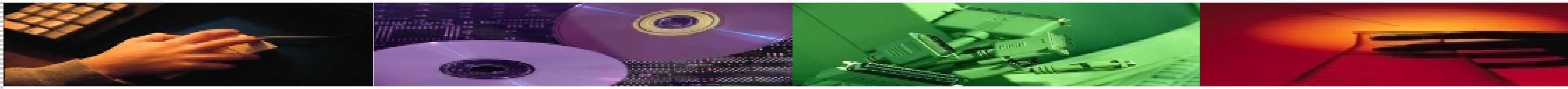


光纤通信系统

光纤与光缆



光纤是光纤通信系统中的传输媒质，其材料、结构和传输性能的好坏直接影响了系统的性能。本章首先介绍光纤光缆的基本结构和类型，然后分别应用射线光学和波动光学理论分析光纤传输原理，在此基础上对光纤的损耗、色散和非线性等传输性能参数进行介绍，最后给出光纤的类型及工程技术。

2.1 光纤光缆的结构和类型

2.1.1 光纤结构

2.1.2 光纤类型

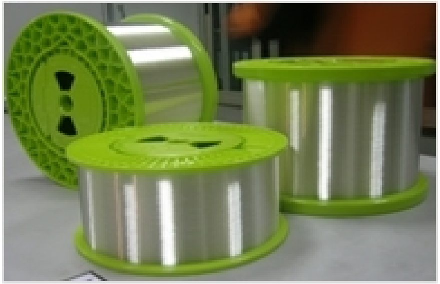
2.1.3 光纤制造工艺

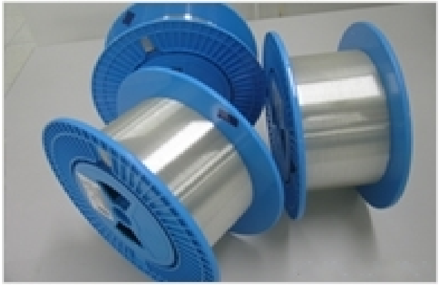
2.1.3 光缆及其结构

2.1.1 光纤结构

光纤的基本结构主要由以下几部分组成：折射率（n_1）较高的纤芯部分、折射率（n_2）较低的包层部分以及表面涂覆层。结构如图2-1所示。为保护光纤，在涂覆层外有二次涂覆层（又称塑料套管）。

图2-1 光纤基本结构



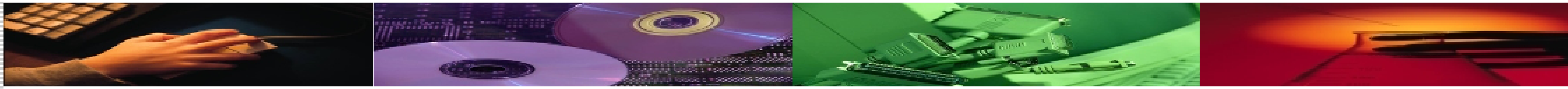


纤芯和包层仅在折射率等参数上不同，结构上是一个完整整体

涂覆层的主要作用是为光纤提供保护

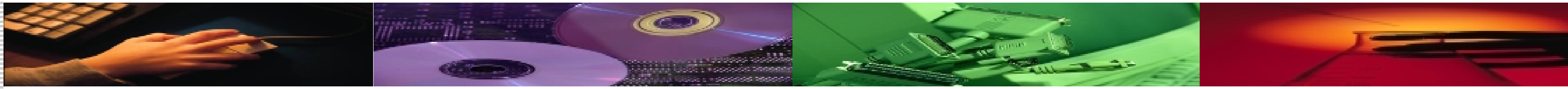
无论何种光纤，其包层直径都是一致的

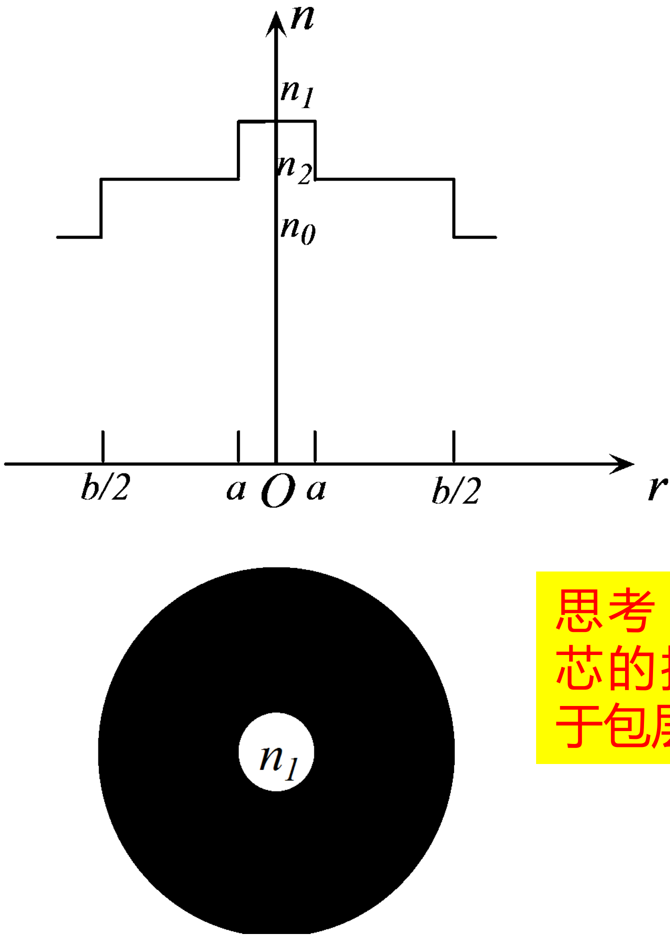
光纤的分类



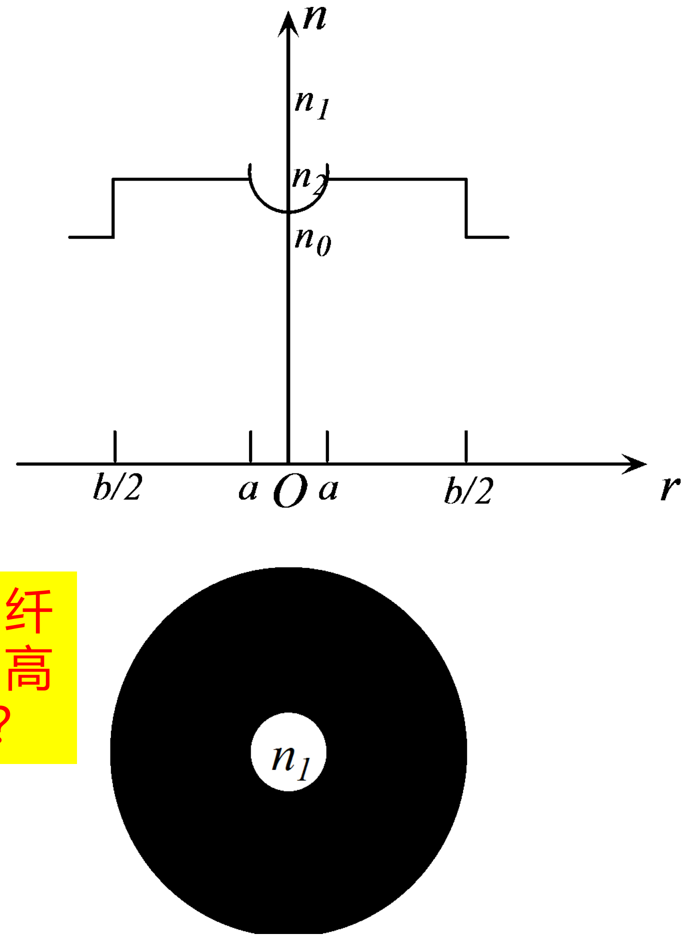
- 按折射率分布
- 按二次涂覆层结构
- 按材料
- 按传导模式

1. 按纤芯折射率分布：阶跃折射率分布和渐变折射率分布





思考：为什么纤芯的折射率要高于包层折射率？



2. 按光纤的二次涂覆层结构

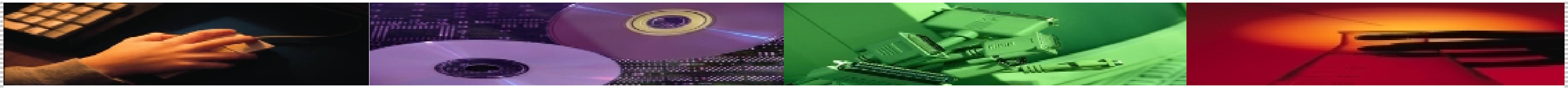
- 紧套结构光纤
- 松套结构光纤

3. 按光纤主要材料

- SiO_2光纤*
- 塑料光纤
- 氟化物光纤

* SiO_2是目前最主要的光纤材料

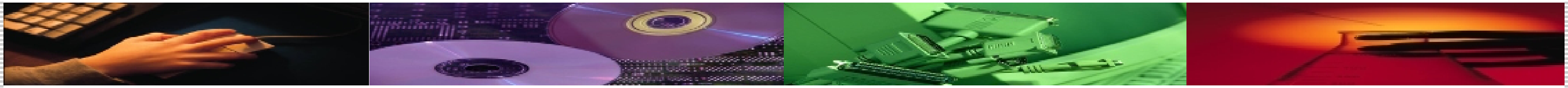
4. 按光纤中的传导模式*



- 单模光纤
- 多模光纤

* 传导模式的概念将在模式分析部分介绍

2.1.2 光纤类型



目前国际上对光纤光缆型号进行标准化的主要是国际电信联盟标准化组织(ITU-T)和国际电工委员会(IEC)。ITU-T涉及通信光纤的标准主要是G.65x系列，IEC则是标准60793系列。

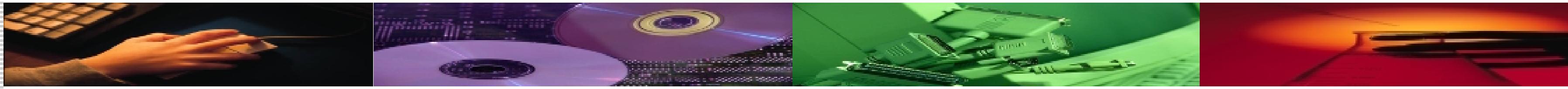
ITU-T规定的光纤型号主要有G.651光纤（多模光纤），G.652光纤（常规单模光纤），G.653光纤（色散位移光纤），G.654光纤（低损耗光纤），G.655光纤（非零色散位移光纤）以及最新的G.656和G.657光纤。

IEC 标准（我国国标也参照IEC命名）将光纤的种类分为A 类（多模）光纤和B类（单模）光纤。

2.1.3 光纤制造工艺

- 改进的化学汽相沉积法(MCVD)
- 轴向汽相沉积法(VAD)
- 棒外化学汽相沉积法(OVD)
- 等离子体激活化学汽相沉积法(PCVD)

光纤接续方法

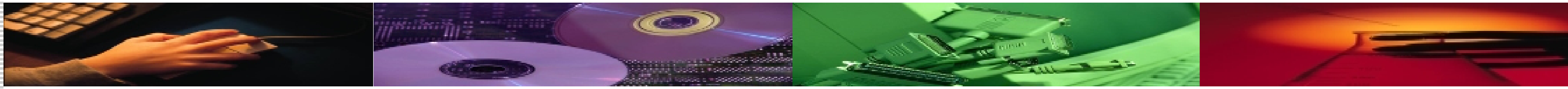


- 永久接续法
- 连接器接续法

2.1.4 光缆及其结构

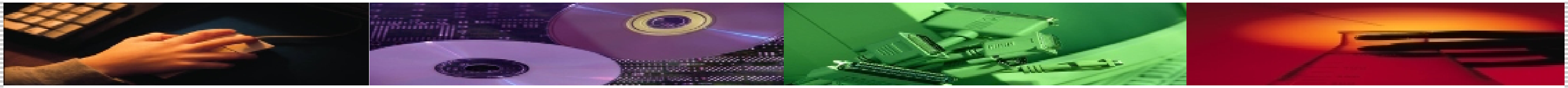
光缆是以光纤为主要通信元件，通过加强件和外护层组合成的整体。光缆是依靠其中的光纤来完成传送信息的任务，因此光缆的结构设计必须要保证其中的光纤具有稳定的传输特性。

光缆的分类方法



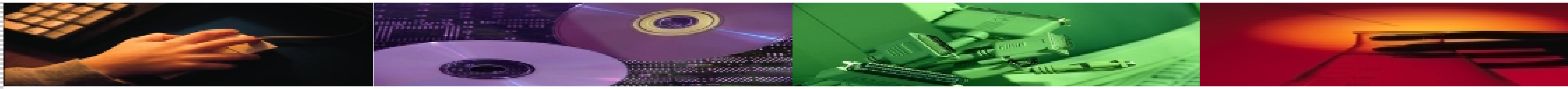
- 按成缆光纤类型
  - 多模光纤光缆和单模光纤光缆
- 按缆芯结构
  - 中心束管、层绞、骨架和带状
- 按加强件和护层
  - 金属加强件、非金属加强、铠装
- 按使用场合
  - 长途/室外、室内、水下/海底等
- 按敷设方式
  - 架空、管道、直埋和水下

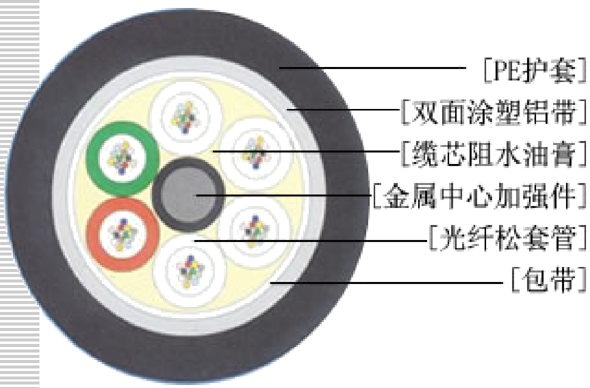
光缆的结构（成缆方式）



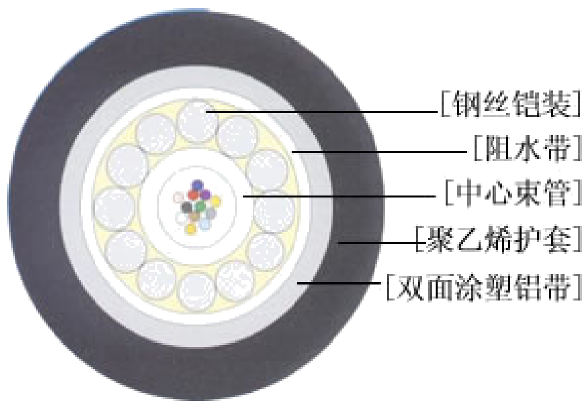
- 层绞式
- 骨架式
- 中心束管式
- 带状式

光缆结构示意图

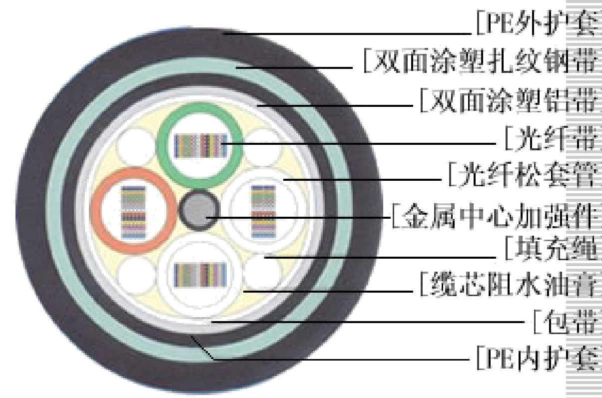




层绞式

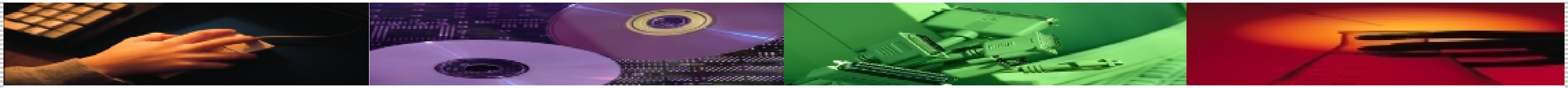


中心束管式



带状式

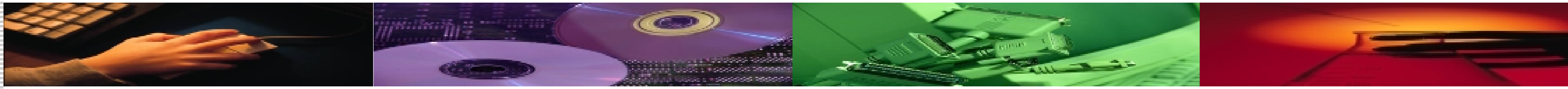
2.2 光纤传输原理



2.2.1 射线光学分析方法

2.2.2 波动光学分析方法

2.2.1 射线光学理论



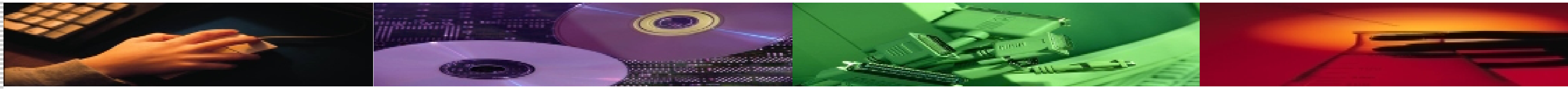
- 分析光波在光纤中传输可应用两种理论：波动理论和射线理论。
- 波动理论分析光波在阶跃折射率光纤中传播的模式特性的方法比较复杂。
- 射线理论是一种近似的分析方法，但简单直观，对定性理解光的传播现象很有效，而且对光纤半径远大于光波长的多模光纤能提供很好的近似。

两个重要概念1：光射线（简称射线）

设有一个极小的光源，它的光通过一块不透明板上的一个极小的孔，板后面的一条光的边界并不明显锐利，而有连续但又快速变化的亮和暗，这就是所谓的衍射条纹。

如果光波长极短（趋于0）而可以忽略，并使小孔小到无穷小，则通过的光就形成一条尖锐的线，这就是光射线。也可以说一条很细很细的光束，它的轴线就是光射线。

两个重要概念2：射线光学（即几何光学）



当光波长趋于0而可以忽略时，用射线去代表光能量传输线路的方法称为射线光学。在射线光学中，把光用几何学来考虑，所以也称为几何光学。

射线光学是忽略波长的光学，亦即射线理论是$\lambda \to 0$时的波动理论。

1. Snell定律

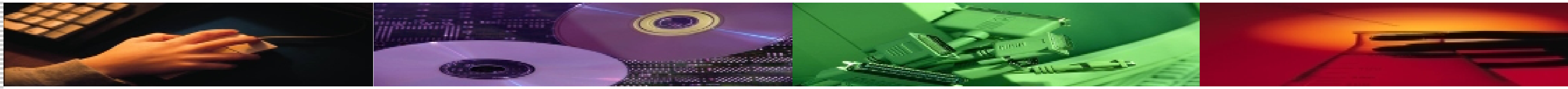
从射线方程导出的射线光学最重要的理论之一是斯涅尔（Snell）定律，它应用于恒定折射率n_1和n_2区域时可写成：

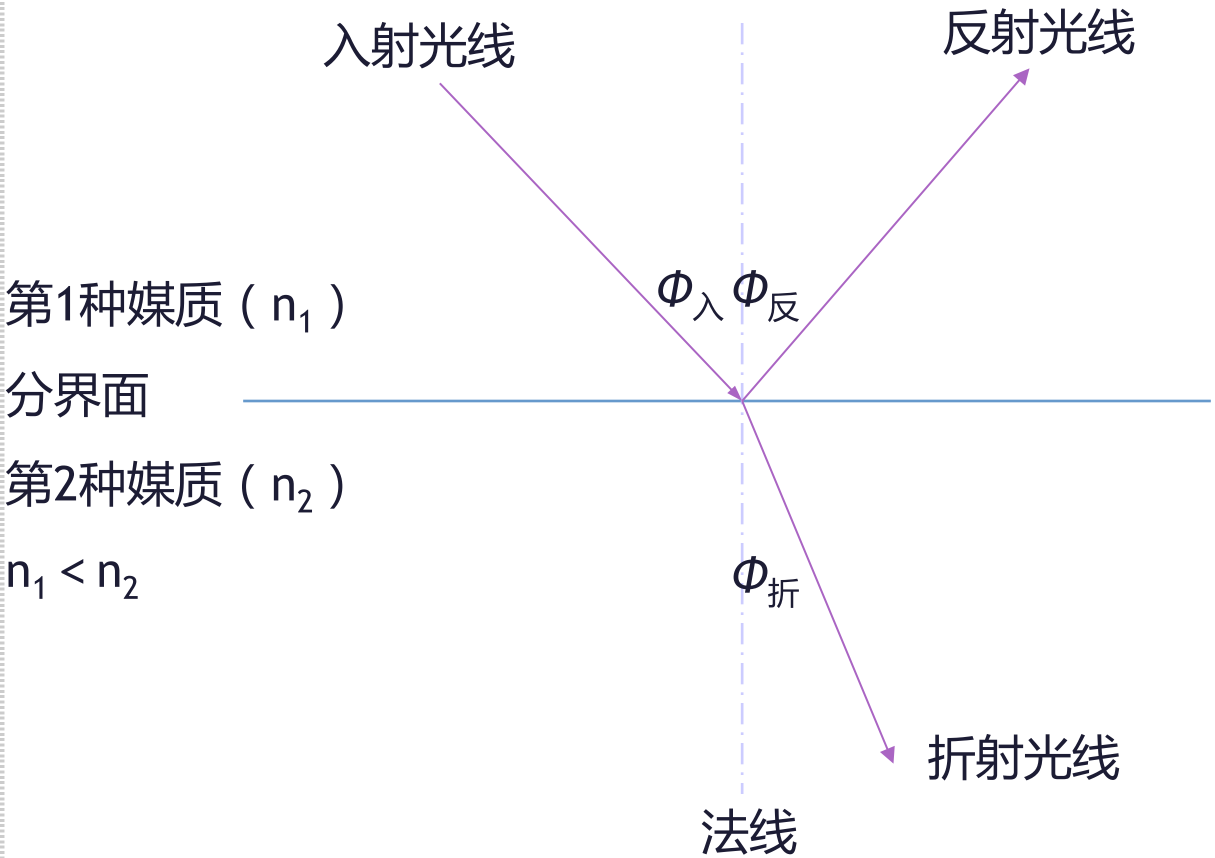
反射定律：$\varphi_{入} = \varphi_{反}$ （2-2）

折射定律：$n_1 \sin\varphi_{入} = n_2 \sin\varphi_{折}$ （2-3）

式中n_1、n_2为介质的折射率，$\varphi_{入}$、$\varphi_{反}$、$\varphi_{折}$分别是光线的入射角、反射角和折射角。

光射线的反射和折射





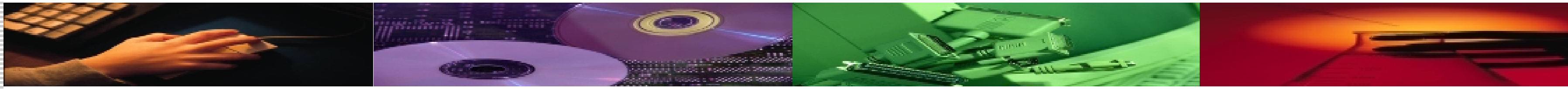
反射定律：

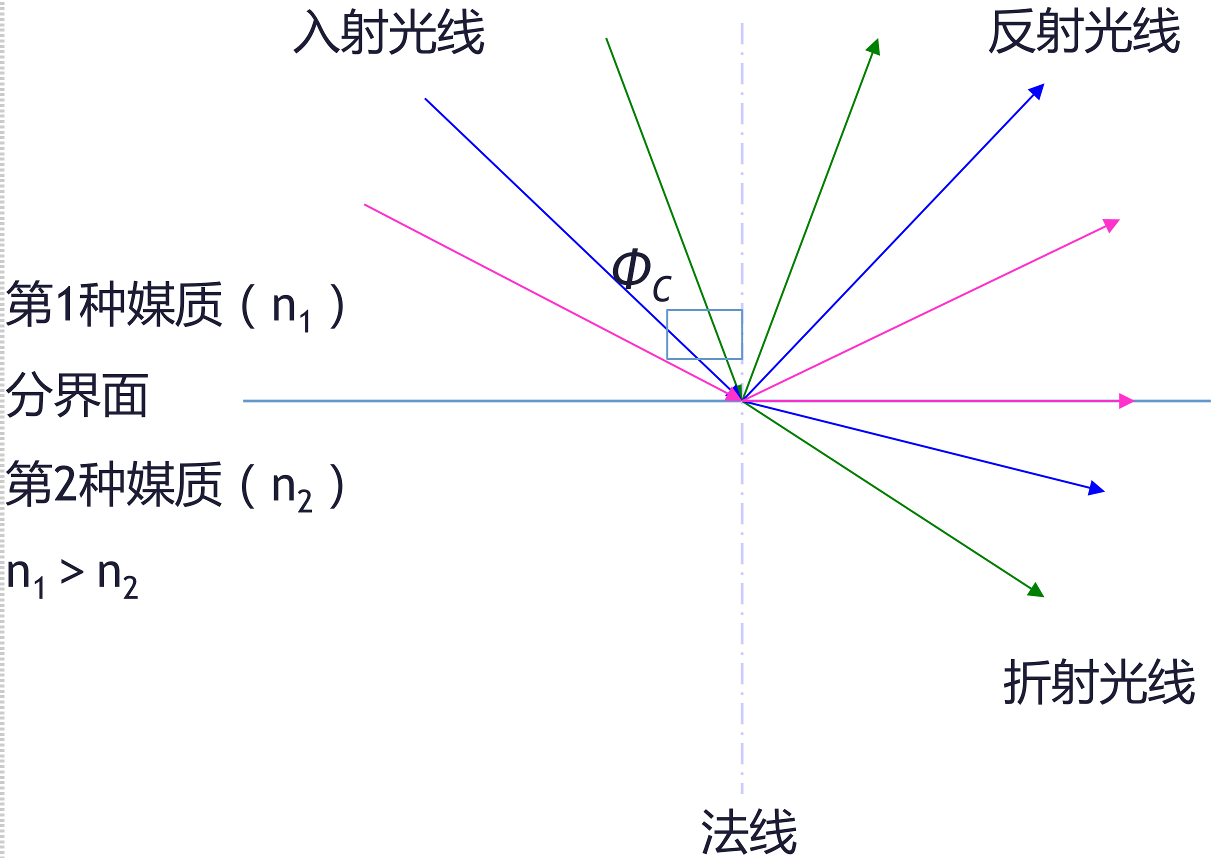
入射角$\Phi_{入}$ = 反射角$\Phi_{反}$

折射定律：

$n_1 \cdot \sin\Phi_{入} = n_2 \cdot \sin\Phi_{折}$

光的全反射现象（光密介质 - 光疏介质）

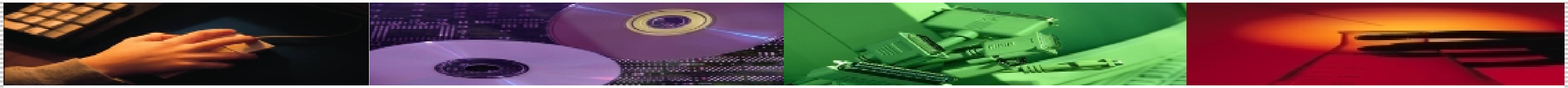




全反射定律：

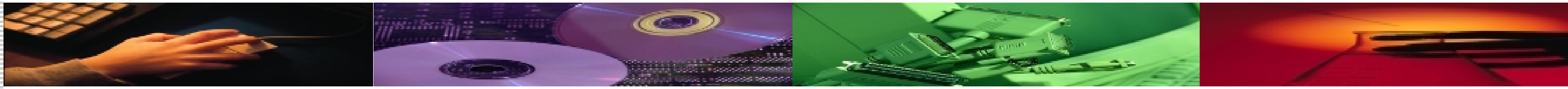
当入射角度增大到某一角度时，折射角可以获得最大值90°，此时可认为无折射光存在，所有的入射光都被反射，称为全反射现象，满足全反射现象的最小角度称为全反射的临界角φ_c。

2. 光纤的传光原理



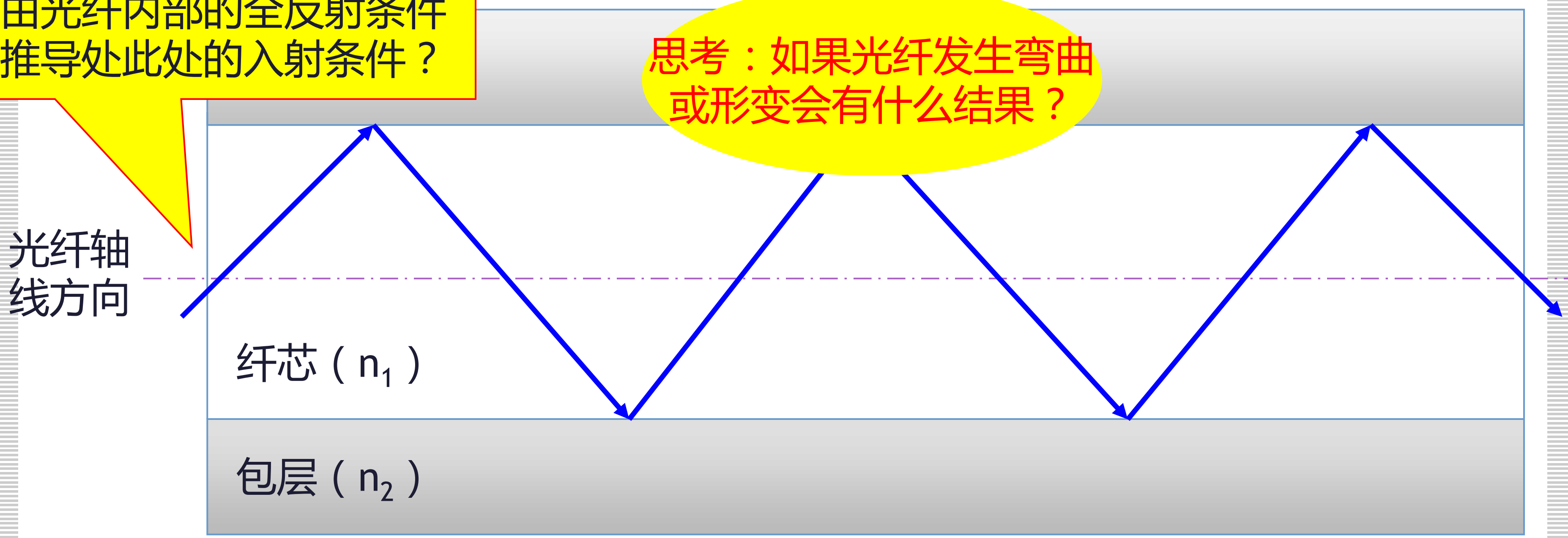
利用上述的射线分析方法，可以直观地对光纤的传光原理进行解释，但是必须要指出的是，射线分析方法虽然具有易于理解的优点，但其本质上是一种近似分析方法，只能定性地解释光纤的传光原理，并不能作为定量的分析依据。

阶跃折射率光纤中的全反射传输



此处亦有折射现象，如何由光纤内部的全反射条件推导处此处的入射条件？

思考：如果光纤发生弯曲或形变会有什么结果？



$n_1 > n_2$

最大接收角和数值孔径

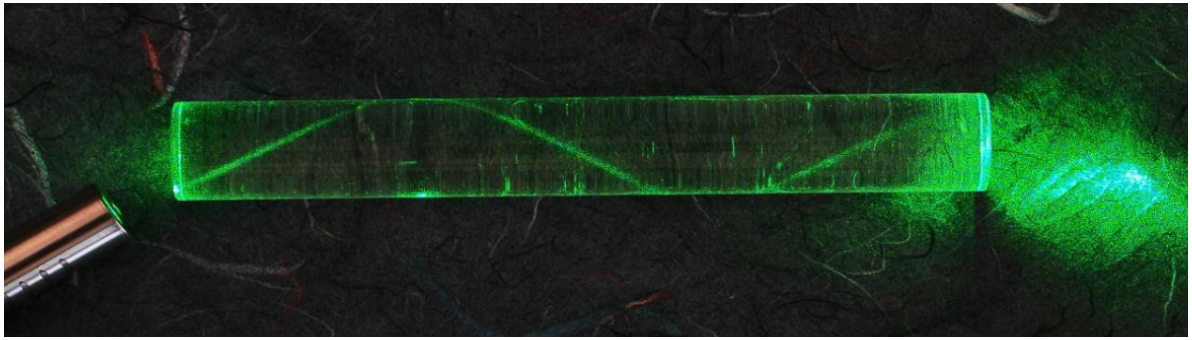
最大接收角

$$\theta_a = \sin^{-1}\frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0} \approx \sin^{-1}\sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx \sin^{-1} n_1\sqrt{2\Delta}$$

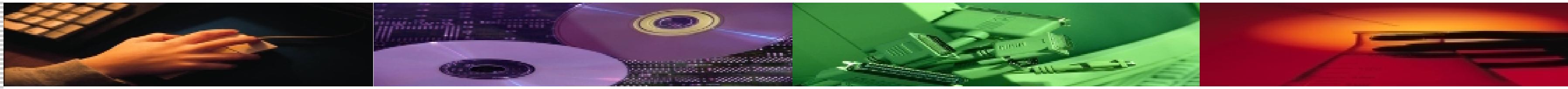
数值孔径为

$$NA = n_0 \sin\theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx n_1\sqrt{2\Delta}$$

式中，n_1,n_2 分别为光纤芯和包层的折射率，Δ 为相对折射率差。



2.2.2 波动光学分析方法



射线光纤理论分析方法虽然形象地给出了光纤中光的传输原理，但其是假定光波长趋于0时的近似分析方法，无法对光在光纤中的传输状态进行严格的定量分析，因此需要引入波动光学理论分析方法。

波动光学理论分析方法的核心是求解波动方程。

简化形式的波动方程

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \qquad (2\text{-}11)$$

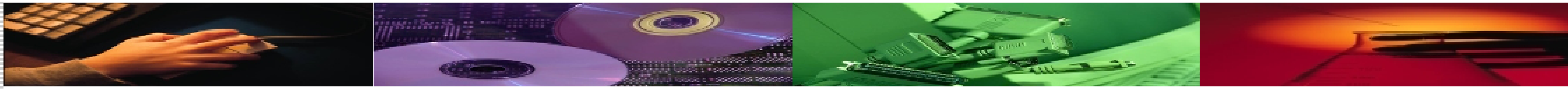
$$\nabla^2 \vec{H} + k^2 \vec{H} = 0 \qquad (2\text{-}12)$$

式中，$\vec{E}$ 和 $\vec{H}$ 分别是电场强度矢量和磁场强度矢量，k为波数，表示为

$$k = \omega\sqrt{\varepsilon\mu} = \frac{\omega}{\upsilon} = \frac{2\pi}{\lambda}$$

ω为角频率，ε和μ分别为介电常数和磁导率。

光纤中波动方程的求解



考虑光纤的外形是圆柱形，纤芯和包层是存在一定折射率差的石英（SiO_2）材料。因此，可以把光纤抽象为一个圆柱形介质波导体，z轴是轴向坐标（光信号传播的前进方向）。用求解波动方程的方法考察光在光纤中具体的传播和存在形式，即在圆柱坐标系中求解 6个变量。由于波动方程只有2个方程，因此需要进行必要的矢量变换。

2.2.4 柱面坐标系下的波动方程

$$E_\varphi = \frac{-j}{K^2}\left(\frac{\beta}{r}\frac{\partial E_z}{\partial \varphi} - \omega\mu \cdot \frac{\partial H_z}{\partial r}\right)$$

$$E_r = \frac{-j}{K^2}\left(\beta\frac{\partial E_z}{\partial r} + \omega\mu\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial H_z}{\partial \varphi}\right)$$

$$H_r = \frac{-j}{K^2}\left(\beta\frac{\partial H_z}{\partial r} - \omega\mu\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial E_z}{\partial \varphi}\right)$$

$$H_\varphi = \frac{-j}{K^2}\left(\frac{\beta}{r}\frac{\partial H_z}{\partial \varphi} + \omega\mu \cdot \frac{\partial E_z}{\partial r}\right)$$

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 E_z}{\partial \varphi^2} + K^2 E_z = 0$$

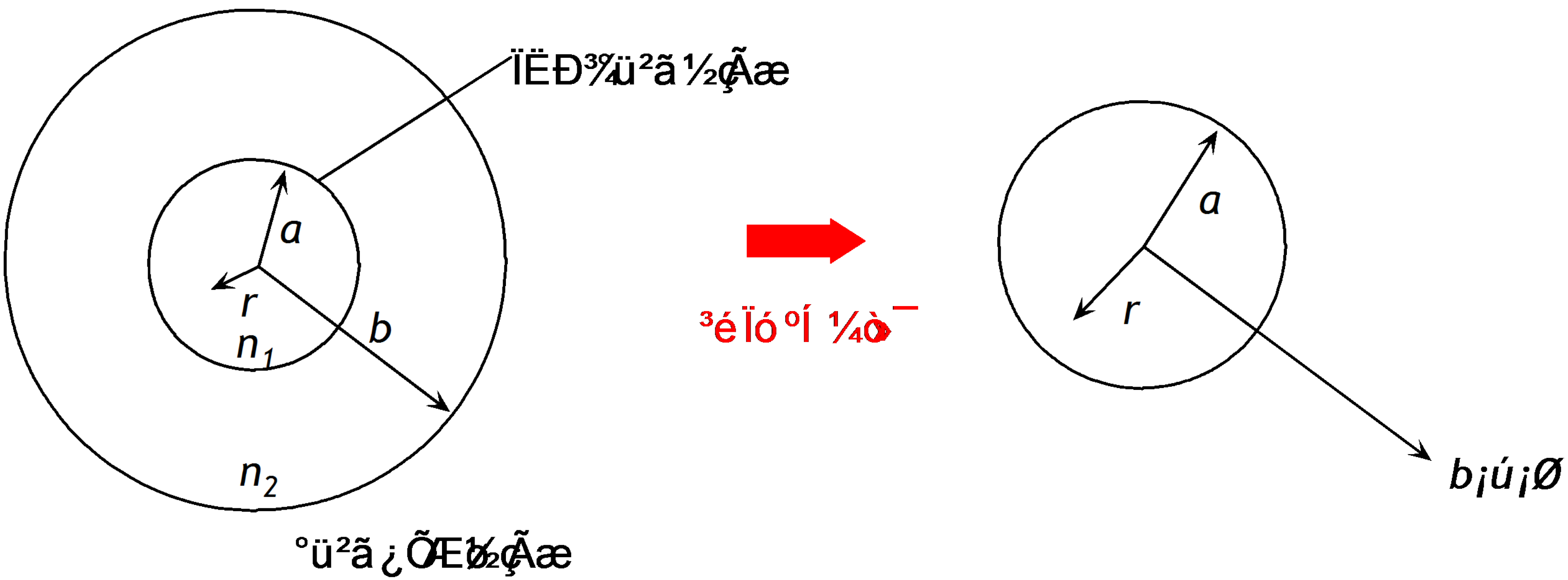
$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial H_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 H_z}{\partial \varphi^2} + K^2 H_z = 0$$

2. 阶跃折射率光纤模式分析

本节将用波动理论来分析阶跃折射率分布光纤，得到在光纤中传播的各种模式的表示方法。讨论各模式的截止条件，并引入线性极化模的概念。

用于分析的阶跃折射率光纤几何图形如图2-7所示。假设光纤包层的半径 b 足够大，以使得包层内电磁场按指数幂衰减，并在包层和空气的界面处趋于 0，这样就可以把光纤作为两种介质的边界问题进行分析。

图2-9 阶跃折射率光纤几何图形



波动方程的求解

运用分离变量法求解波动方程经过一系列数学处理，可得

$$\frac{d^2E_z}{dr^2}+\frac{1}{r}\frac{dE_z}{dr}+(n^2k_0^2-\beta^2-\frac{m^2}{r^2})E_z=0$$

$$\frac{d^2H_z}{dr^2}+\frac{1}{r}\frac{dH_z}{dr}+(n^2k_0^2-\beta^2-\frac{m^2}{r^2})H_z=0$$

上式是贝塞尔方程，式中m是贝塞尔函数的阶数，称为方位角模数，它表示纤芯沿方位角ϕ绕一圈场变化的周期数。