

2.2 导光原理

2.2.1 光传输理论

1. 波动理论与光射线理论

光具有波粒二象性，既可以被看作是光波，又可以被看作是由光子组成的粒子流，所以有两种分析光纤传输特性的理论，即波动理论和光射线理论。波动理论是分析光纤的标准理论，其核心是求解满足初始条件和边界条件的麦克斯韦方程，这种分析方法能够精确地描述光纤的传输特性，但涉及的物理数学知识很广，非常复杂；光射线理论是用几何光学的分析方法，将光看成是传播的“光线”，物理描述直观，可以解决一些实际问题。

对于多模光纤，波动理论的求解十分繁琐，而且由于传输模数量很大，讨论个别模的意义不大。用光射线理论进行分析却简洁、方便，而且多模光纤的纤芯直径较大，使用光射线理论的分析结果，与波动理论的结果十分接近。因此分析多模光纤的导光原理大多采用光射线理论。

对于单模光纤，因为其芯径很小，所以不适合使用光射线理论进行分析，而使用波动理论进行分析更准确。

由于波动理论的复杂性，这里就使用光射线理论进行导光原理的分析，可以使读者定性地了解光纤的导光原理。

2. 光频率和介质对光传输的影响

光是一种电磁波。电磁波波谱如图 2-10 所示，其中光波范围包括红外线、可见光、紫外线，其波长范围为： $300\mu\text{m}\sim 6\times 10^{-3}\mu\text{m}$ ，可见光由红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫七种颜色的连续光波组成，其中红光的波长最长，紫光的波长最短。

光纤通信的波谱在 $1.67\times 10^{14}\text{Hz}\sim 3.75\times 10^{14}\text{Hz}$ 之间，即波长在 $0.8\mu\text{m}\sim 1.8\mu\text{m}$ 之间，属于红外波段，将 $0.8\mu\text{m}\sim 0.9\mu\text{m}$ 称为短波长， $1.0\mu\text{m}\sim 1.8\mu\text{m}$ 称为长波长， $2.0\mu\text{m}$ 以上称为超长波长。

光波在真空中，是以光速 ($c=3\times 10^5\text{ km/s}$) 传播的。不同的光频率对应不同颜色的光，如频率 $f=500\text{ THz}$ ($1\text{ THz}=10^{12}\text{ Hz}$)，对应的是红光。

光的频率是由光源决定的，如频率为 231 THz 的光，在真空中传播的波长为 $1.3\mu\text{m}$ 、速度为 $c=3\times 10^5\text{ km/s}$ ，而在光纤中传播时，其频率不变，但速度和波长会改变，分别约为 $2\times 10^5\text{ km/s}$ 、 $1\mu\text{m}$ ，可见光的速度和波长受传输介质和频率的影响。

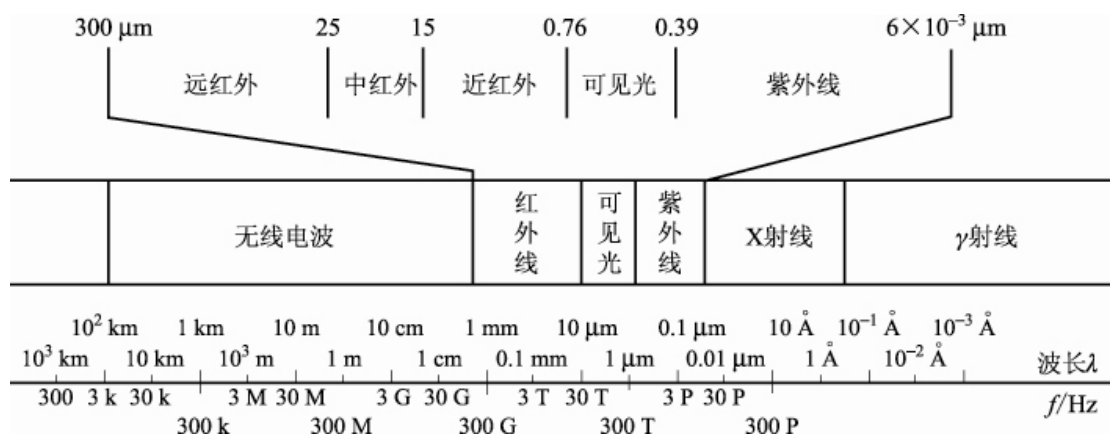


图 2-10 电磁波波谱

2.2.2 反射与折射

1. 斯涅耳定律的应用

光在真空中的传播速度定义为 c ，光在介质中的传播速度定义为 v ，则

$$\text{折射率 } n = \frac{c}{v} \quad (2-3)$$

水的折射率为 1.333，空气的折射率为 1.000，石英玻璃的折射率是 1.520。

光在真空中、介质中的波长分别为 λ 和 λ_m ，则有

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2-4)$$

$$\lambda_m = \frac{v}{f} \quad (2-5)$$

所以

$$\lambda_m = \frac{\lambda}{n} \quad (2-6)$$

按照光射线理论，当一条光线照射到两种介质的分界面时，入射光线分成两束，即反射光线与折射光线，如图 2-11 所示。

由斯涅耳定律，反射角与入射角相等，均为 θ_1 ，且

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2-7)$$

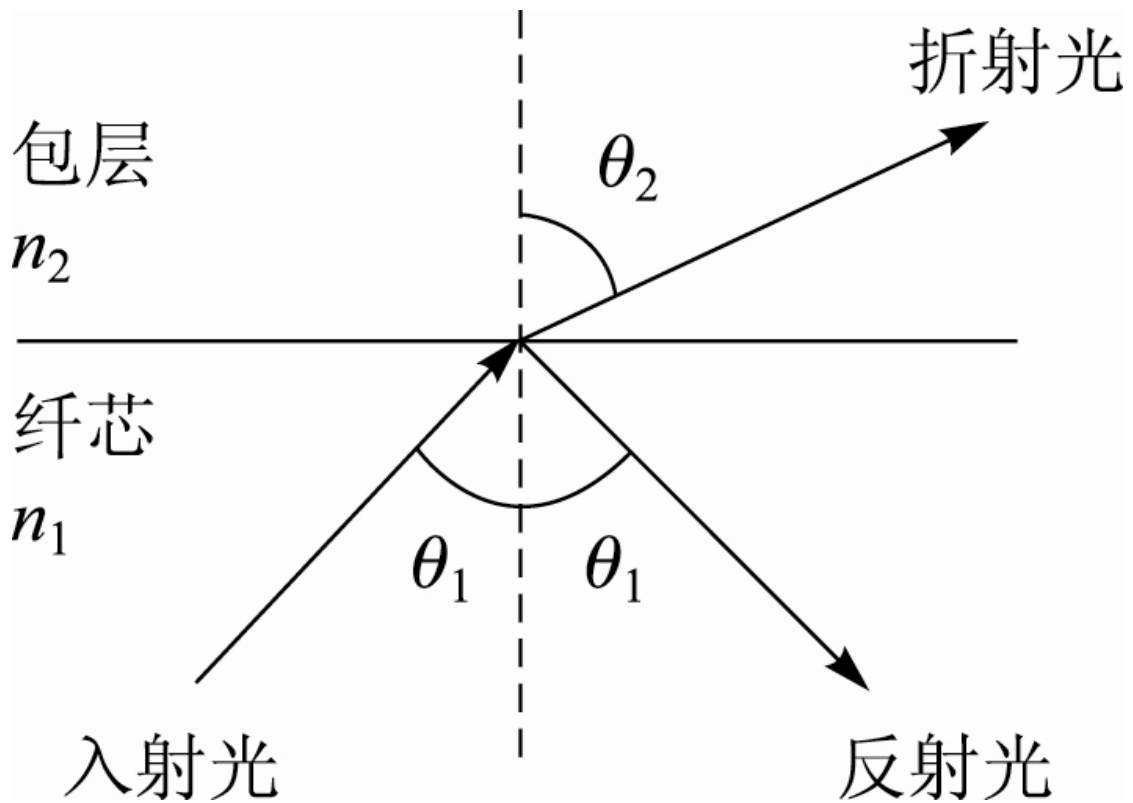


图 2-11 光的反射与折射

很显然，入射光被分为两条光线，即入射光与折射光，且 n_2 与 n_1 的关系直接影响入射角 θ_1 与折射角 θ_2 的关系。这种影响达到一定程度时，折射角 θ_2 将等于或大于 90° ，光线的传播出现全反射的现象。

2. 全反射

由式 (2-7)，有

$$\sin \theta_2 = \frac{n_1 \sin \theta_1}{n_2} \quad (2-8)$$

已知 n_1 (光纤的纤芯折射率) $> n_2$ (包层的折射率)，则 $\theta_1 < \theta_2$ 。若 n_1 与 n_2 的比值加大到一定值后，则必然使折射角 $\theta_2 \geq 90^\circ$ ，这意味着折射光不再进入包层，而出现在纤芯与包层的分界面 (此时的入射角 θ_1 ，定义为临界角 θ_c) 或返回纤芯，这个现象就是光的全反射，如图 2-12 所示。

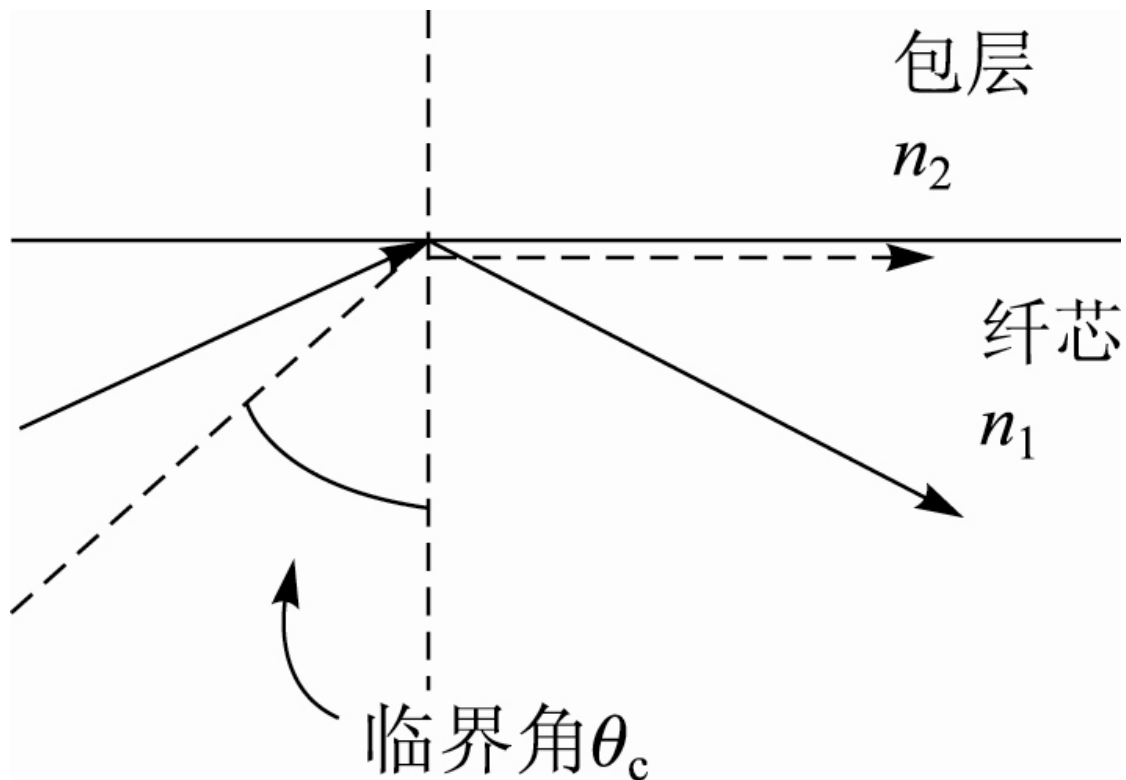


图 2-12 全反射

可以得到，满足全反射的条件是

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (2-9)$$

可见全反射是光信号在光纤中传播的必要条件，此时必须满足 $\theta_1 \geq \theta_c$ ，光线会在纤芯区域内传播，没有光“泄漏”到包层中，大大降低了光纤的衰耗，可以实现远距离传输。

2.2.3 光在阶跃型光纤中的传播

对于阶跃型光纤，由于纤芯及包层的折射率有 $n_1 > n_2$ 的关系，因此完全可以满足全反射的要求，只要入射角 $\theta_1 \geq \theta_c$ 。在阶跃型光纤内，其光线的传播轨迹将是“之”字形的，如图 2-4(a) 所示，为进行定量研究，重绘该图，如图 2-13 所示。

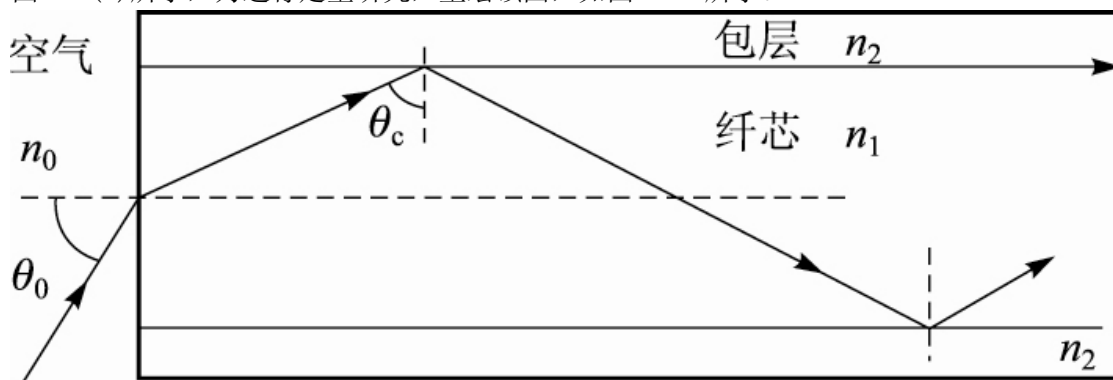


图 2-13 阶跃型光纤中的传播

数值孔径 NA 的定义：数值孔径 NA 是多模光纤的一个重要特性参数，它表征多模光纤集光能力大小及与光源耦合难易的程度，同时对连接损耗、微弯损耗、衰减温度特性和传输带

宽等都有影响。数值孔径用来表示光纤捕捉光射线的能力，该参数表明，进入光纤的光线的入射角 θ_c （临界角）决定了光纤收集光线的的能力，即能够实现全反射，使光线以可以允许的损耗在光纤中传播。数值孔径 NA 推导如下：

应用斯涅耳定律，不难得到

$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin(90^\circ - \theta_c) \quad (2-10)$$

因为空气的折射率为 $n_0 = 1.000$ ，所以

$$\sin \theta_0 = n_1 \sin(90^\circ - \theta_c) \quad (2-11)$$

为了满足全反射，应用式 (2-9)，有

$$\begin{aligned} \sin \theta_0 &= n_1 \sin(90^\circ - \theta_c) \\ &= n_1 \cos \theta_c \\ &= n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} \\ &= \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \\ &= NA \end{aligned} \quad (2-12)$$

利用式 (2-1)，可得

$$NA = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (2-13)$$

式 (2-13) 中 Δ 为相对折射率差。

从上述推导中，可以发现数值孔径 NA 就是能够使光线在光纤中以全内反射的形式进行传播的入射角 θ_0 的正弦值，即纤芯与包层折射率平方差的开方。

NA 的物理意义在于：它表征了光纤搜集光线的的能力。

NA 越大，光纤收集光线的的能力越强，但并不是越大越好，因为随着 NA 的加大， Δ 也越大，导致模式色散加大，使光纤传输容量变小；NA 与光纤的几何尺寸无关，只与纤芯和包层的折射率分布有关；CCITT 建议光纤的 NA 取值范围为 0.18~0.23。

2.2.4 光在渐变型光纤中的传播

对于渐变型光纤，使用光射线理论进行定量分析是不合适的，而使用波动理论，利用麦克斯韦方程求解，显得复杂、艰涩，因此这里只给出相应的定性分析。

由图 2-3(b) 可知，在光纤轴心处，折射率最大，沿截面径向向外，折射率依次变小。可以设想光纤是由许许多多的同心层构成的，其折射率 n_{11} 、 n_{12} 、 n_{13} ... 依次减小（如图 2-14 所示）。这样光在每个相邻层的分界面处，均会产生折射现象，其折射角也会大于入射角（因为 $n_{11} > n_{12} > n_{13}$...），其结果是光线在不断的折射过程中，在纤芯与包层的分界面，产生全反射，全反射光沿该分界面传播，而反射光则向轴心方向逐层折射，不断重复以上过程，就会得到光在渐变型光纤中的传播轨迹，如图 2-15 所示。

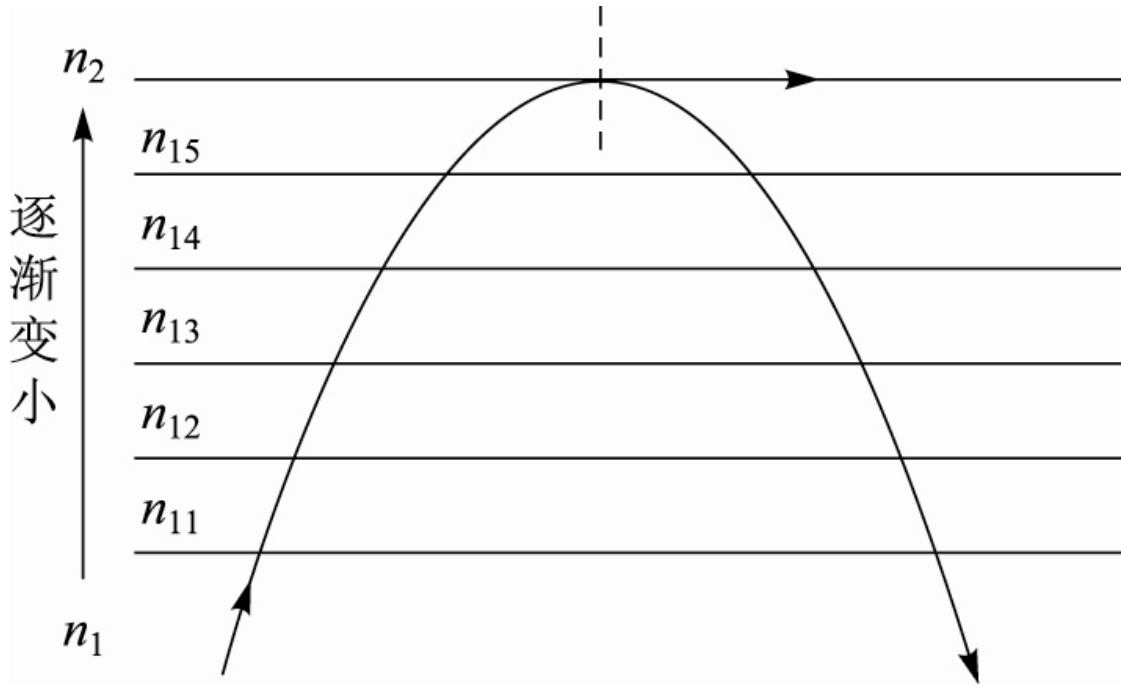


图 2-14 渐变型光纤中光的传播

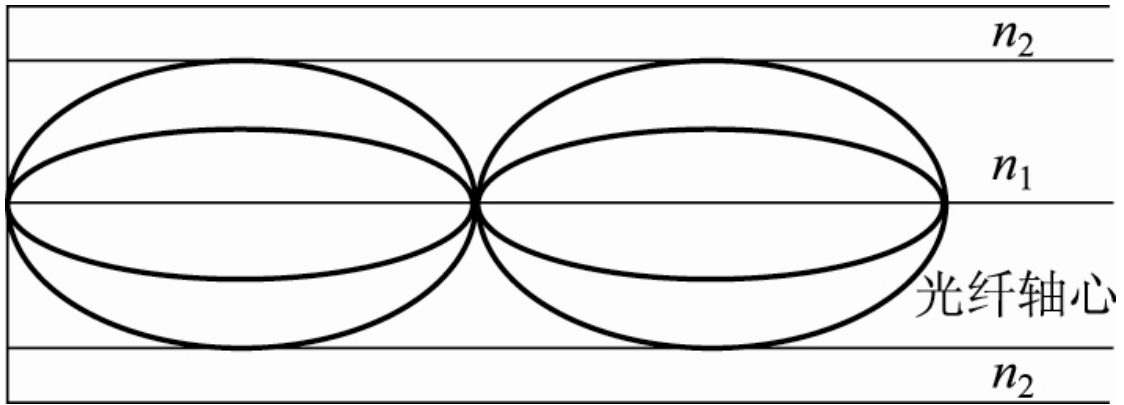


图 2-15 渐变型光纤光传播轨迹