

## 光電實驗（五） 光纖的基本特性

### （一）實驗目的：

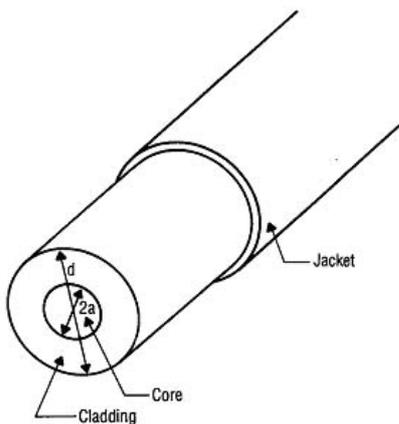
將雷射光耦合進入光纖時，除了要將光纖端面處理平整避免散射外，還要配合光纖的 NA(Numerical Aperture)值與模態分佈。學習如何有效率地將 He-Ne 雷射光耦合入光纖(由耦合損耗判斷)、計算出此光纖的 NA 值、彎曲損耗並觀察單模光纖與多模光纖的橫模態分佈。

### （二）實驗原理：

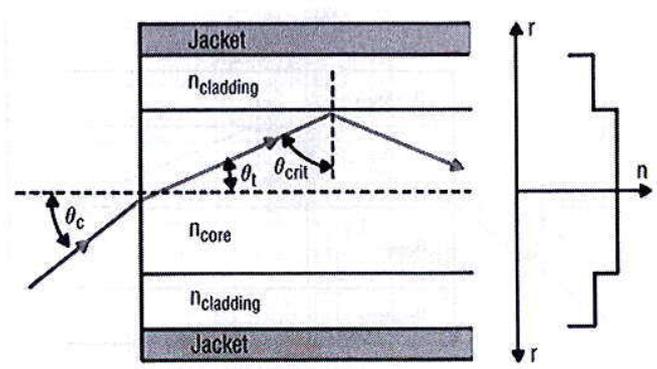
**光纖** 在光纖通訊系統中所扮演的角色為傳輸介質，能將光訊號由光源處傳遞到遠方的目的地，以達到通訊的功能。以 ray-optics 來講，為達到傳遞訊息的目的，可視同光在纖衣裡以全反射的方式行進。其基本結構，如圖一所示，是由 SiO<sub>2</sub>:GeO<sub>2</sub> 形成折射率(refractive index)較高的纖心(Core)、純 SiO<sub>2</sub> 或摻雜比例較低的混合物形成折射率(refractive index)較低的纖衣(Cladding)以及最外層的塑膠保護層(jacket)所組成；有一物理量(fractional refractive index difference)，常用以表示光纖折射率差值比例的定義：

$$\Delta \equiv \frac{(n_{core} - n_{cladding})}{n_{core}}$$

一般而言，單模光纖的纖心直徑約為 4-8 μm、纖衣直徑約為 125-140 μm 左右，而多模光纖直徑便已經大約為 50-100 μm 了，最外層的保護層直徑則約為 500-1000 μm 左右。



圖一 光纖剖面



圖二 步階式光纖

光纖其實是圓柱型電介質波導管的一種，在此，為簡化起見，則以一電介質平板的波導模型來說明光纖的導光作用，如圖二所示。

由 Snell's 定律可知：

$$\begin{aligned} n_0 \sin \theta_c &= n_{core} \sin \theta_t = n_{core} \sin(90 - \theta_{crit}) \\ &= n_{core} \cos \theta_{crit} = n_{core} \sqrt{1 - \sin^2(\theta_{crit})} \end{aligned}$$

又

$$n_{core} \sin \theta_{crit} = n_{cl} \sin 90 = n_{cl}$$

$$\therefore n_0 \sin \theta_c = \sqrt{n_{core}^2 - n_{cl}^2} \equiv N.A.$$

式中 N.A. 定義為光纖的數值孔徑(Numerical Aperture)， $\theta_c$  稱為光纖的接受角(fiber acceptance angle)，意即只有當入射角小於 $\theta_c$ 時，光才有可能藉由全反射效應而被侷限在光纖的核心中傳播不致散射至核心之外而造成訊號衰減。另外，

$$N.A. = \sqrt{n_{core}^2 - n_{cl}^2} = \sqrt{(n_{core} + n_{cl})(n_{core} - n_{cl})} \approx n_{core} \sqrt{2\Delta} \quad \text{if } \Delta \ll 1.$$

但除了滿足以上條件之外，經波導理論推算，光波若要穩定存在於光纖中，必須滿足相位匹配(phase match)的條件；就是在  $r$  方向上也必須產生駐波：

$$\begin{aligned} 2\pi \left[ \frac{2a}{\lambda_0 / (n_{core} \cos \theta)} \right] - 2\phi &= 2m\pi, \quad \text{where } m = \text{integral} \\ \text{or } \frac{2\pi n_{core} \cos \theta}{\lambda_0} - \phi &= m\pi \end{aligned}$$

其中  $a$  為核心半徑

$\lambda_0$  為光波於真空中的波長

$\phi$  為界面全反射引進之相位差

只有在滿足  $m$  為一整數的情況下，光才能在核心內穩定傳播，此稱之為光纖的傳播模態(modes)。最大的傳播模態數可以從最大接受角來估計：

$$\begin{aligned} m &\leq \frac{2an_{core}}{\lambda_0} \sqrt{1 - \left(\frac{n_{cl}}{n_{core}}\right)^2} - \frac{\phi}{\pi} \equiv \frac{V}{\pi} - \frac{\phi}{\pi} \\ \text{where } V &\equiv \frac{2\pi a}{\lambda_0} \sqrt{n_{core}^2 - n_{cl}^2} \end{aligned}$$

$V$  稱為歸一化頻率(normalized frequency)，所以若纖心半徑已知，則估計總傳播模態數。對纖心直徑約為 2~10 $\mu\text{m}$  時，只傳播單一模態， $V < 2.405$ ，此時為單模光纖，而直徑若約為 50~300 $\mu\text{m}$  時， $V$  遠大於 2.405，故而允許許多模態同時在光纖中傳播，故稱之為多模光纖。

**橫模** 光在光纖內傳播的光場分佈可利用 Maxwell's equation 來分析。對於一般的光纖而言，可能會有 TE、TM、HE、EH 或 LP 等不同的模態。對於單模光纖而言，只會有  $\text{HE}_{11}$ (或  $\text{LP}_{01}$ ) 模態，如圖 3 所示。但對於多模光纖而言，存在的模態數不只一個，因此多模光纖的光場分佈就不會只向單模光纖一樣，不會是一個看似圓型的光場分佈。