

# 光纤通信预习报告

郑力恒 202111999064

## 1. 实验目的

1. 了解光纤光学的基础知识
2. 学习测量光纤数值孔径和损耗特性的方法
3. 了解光纤温度传感器的工作原理
4. 了解光纤音频通信的基本原理和系统构成

## 2. 实验原理

### 2.1 光纤的损耗

光纤是一种介质波导, 利用光学全反射原理, 将光的能量约束在光吸收和光散射都非常小的波导界面内. 因此, 光纤通信的一大特征就是损耗小, 光纤的技术的发展历史也是围绕着降低光纤材料的损耗率进行的.

光纤的损耗主要来自材料的两种固有损耗: 散射与吸收, 它们有着不同的损耗机制(即, 损耗与波长的函数关系不同). 在本实验中, 方便起见, 不对损耗的机制进行区分, 测量一个总的损耗系数. 这样, 光功率的指数衰减可以简单描述为

$$P(L) = P(0) \exp(-\alpha(\lambda)L)$$

损耗作为一种材料属性, 我们关心其单位长度上的损耗; 同时这样一个指数结构, 可以用声学上的分贝类似地描述:

$$\alpha(\lambda) = \frac{A(\lambda)}{L} = \frac{10}{L} \lg \frac{P(0)}{P(L)} \quad (1)$$

### 2.2 光纤的数值孔径

损耗特性是光纤得以广泛应用的基础, 下面进一步考虑这种光学波导的细节.

光纤的数值孔径 (NA) 是表征光纤集光能力的一个重要物理量. NA 与端面处光线的最大入射角有关, 当然由于光路的可逆性, 该角也是出射角. 因此, NA 既反映了光纤的入射性质, 又反映了光纤的出射性质.

之所以集光能力与最大入射角有关, 源自于光纤的内表面全反射原理. 在光纤内部, 光线从光密介质进入光纤介质而发生全反射, 这只有在介质面入射角足够大时才能发生. 而这个入射角越大, 就意味着端面处的入射角越小, 意味着端面处的入射角有一个上确界  $\theta$ . 我们将这个上确界角定义为光纤的数值孔径, 即

$$NA = \sin \theta \quad (2)$$

内表面全反射的性质还决定了光纤材料构成上是分层的。通常, 光纤的内全反射由折射率较高的纤芯和其外侧折射率较低的包层完成; 包层外的涂敷层与套塑则用于加强光纤的机械强度。

## 2.3 光源与光纤的耦合效率

光纤作为一种光波的传输材料, 与光源是分开的。因此, 光线从光源进入光纤时, 有一个耦合的过程。为了获得最大的耦合效率, 考虑光纤的特征长度, 即端面的半径  $a$ 。对于激光, 总是可以选择合适的焦距的透镜, 对其高斯光束的束腰  $W_0$  进行调节。当

$$2W_0 = 2a$$

时, 耦合效率最佳。在此基础上, 耦合的影响就在于入射到端面时的功率  $P_0$  到光纤中的功率  $P$  变化。此时, 耦合效率定义为

$$\gamma = \frac{P}{P_0}$$

## 2.4 光纤温度传感器

通过光纤测量物理量, 关键在于物理量变化对光信号的影响。温度传感器就是一个例子。通过光纤分束器, 将激光的相干光源分别输入两根长度一致的光纤中, 就能发生双缝干涉。此处, 相位差可以用光程写出:

$$\phi(T) = \frac{2\pi}{\lambda} n(T) L(T) - \phi_0 \quad (3)$$

其中,  $\phi_0$  为参考光纤的相位, 通过改变探测光纤的温度, 其折射率和长度都会发生变化, 最终导致相位差的变化。

## 2.5 音频信号通信

光纤技术的核心是对光信号的无损耗传输。想要应用光纤技术, 就要将光信号与其他信号相互转换。本实验中, 使用 LED 进行电流到光信号的转换, 使用硅光电二极管将光信号转换为光电流。在转换的过程中, 需要输入端和输出端都保持光电流与光功率成正比, 防止光信号失真。

由于 LED 的光功率输出曲线在低功率时不是线性的, 需要选择一个合适的偏置电流, 使光信号无畸变。

### 3. 实验内容

#### 3.1 光纤损耗

根据公式 (1), 需要光纤传输过程中距离为  $L$  的两个光功率值  $P(0)$  和  $P(L)$ . 由于光源和光纤耦合的存在, 不能直接选取光源处的光功率, 而使用‘截断法’.

首先, 在稳定的光强输入条件下, 测量长度为  $L$  的整根光纤的输出功率  $P_2$ ; 然后, 保持耦合条件不变, 在离光纤输入端约  $l$  处截断光纤, 测量此短光纤的输出功率  $P_1$ . 当  $L \gg l$  时, 短光纤损耗可以忽略, 故可近似认为  $P_1$  和  $P_2$  是被截断光纤 (长度为  $L-l$ ) 的输入功率和输出功率.

为了能够实现光纤的截断, 我们使用便于处理的塑料光纤. 对其处理有几个要点:(1) 端面需要尽量的垂直与平滑.(2) 用铜管固定光纤, 需要注意光路的调节, 光功率计的设置等, 反复微调使输出功率最大, 以测量较为准确的损耗系数.

#### 3.2 数值孔径和耦合系数

数值孔径类似于一个光锥, 以端面中心为顶点. 由于公式 (2), 我们要测量的角度是很小的, 于是我们使用‘远场光斑法’.

由光纤出射的光照射到观察屏上, 测出光纤端面与观察屏之间的距离  $h$ , 以及观察屏上光斑直径  $2r$  之后, 就可以由下式求出光纤的数值孔径为

$$NA = \sin \theta = \frac{r}{\sqrt{r^2 + h^2}}$$

由于不需要截断, 这里使用的是商用石英光纤. 需要注意的有 (1) 光纤的长度.(2) 用光纤剥线钳处理光纤端面.(3) 耦合系数和数值孔径依赖于端面的处理, 需要使用显微镜检查. (4) 光纤输出功率需要调至最大, 以保证远场光斑测量的准确性.

#### 3.3 光纤温度传感器

探测光纤的温度发生微小改变时, 通过折射率与长度的形式发生相位差变化,

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(L\Delta n + n\Delta L)$$

相位差的变化直接影响干涉条纹的移动. 这里需要选择分束-干涉系统, 在显示器上调节出亮度合适且清晰的干涉条纹.

探测光纤需要放入加热器狭缝中. 实验中在  $30^\circ\text{C}$ - $40^\circ\text{C}$  的范围内调节温度, 测量温度系数  $\Delta N/\Delta T$ .

## 4. 思考题

1. 请列出光纤能够成为信息传播介质的物理原因.

答: 由于出色的低损耗性能, 光纤传输距离远, 信号稳定性好. 由于材料特性, 成本低, 寿命长, 耐腐蚀. 由于以光波作为信息载体, 通信容量大.

2. 光纤的数值孔径与光纤的内全反射有什么关系?

答: 内全反射对内入射角有一个下确界限制, 这反映在光纤端面入射角的上确界上. 低于该上确界, 就能实现内全反射. 数值孔径即为此上确界的正弦值. 这样, 数值孔径越大, 允许的入射角范围越大, 光纤的集光能力就越强.

3. 引起光纤损耗的因素有哪些? 列出实验中光传输系统中可能引起光信号的衰减的环节。

答: 主要因素是材料的散射与吸收, 即材料中杂质颗粒的散射与材料和杂质带来的吸收, 分为紫外吸收和红外吸收. 此外, 还有辐射损耗, 接续损耗, 弯曲损耗等. 在实验中, 与光源耦合, 端面未处理平滑与垂直会影响光纤的损耗. 此外光路未调节至水平等, 也会引起测量上的损耗.

4. 结合 LED 特性曲线, 说明如何实现用音频信号线性不失真地调节半导体激光二极管的发射光强。

答: LED 特性曲线在大小适中的电流处呈现线性. 为了使光信号-电流的转换相一致, 输入的电流要调节到线性区域, 方法是加一个偏置电流, 一般取线性部分中点对应的电流值或 LED 最大允许工作电流的一半.

5. 切割光纤对操作和纤芯截面有什么的技术要求? 哪个参数直接反映纤芯断面是否理想?

答: 用专用光纤切割器切割端面, 并在显微镜下观察光纤端面, 端面需光滑、垂直、干净. 如果达不到要求则需再次切割; 耦合系数与数值孔径反映了端面是否理想.