

实验十 光纤损耗与截止波长测量

一 实验目的

1. 了解单模光纤的工作原理及相关特性；
2. 掌握光纤截止波长的测量方法。

二 实验原理简介

2.1 光纤的结构与特性

光纤是一种高度透明的玻璃丝，由纯石英经复杂的工艺拉制而成，从横截面上看由三部分组成，即折射率较高的芯区，折射率较低的包层和表面涂层。根据芯区折射率径向分布的不同，可分为两类：折射率在纤芯与包层界面突变的光纤称为阶跃光纤；折射率在纤芯内按某种规律逐渐降低的光纤称为渐变光纤，折射率分布可分别表示为：

$$\text{阶跃: } n(r) = \begin{cases} n_1 & (0 \leq r \leq a) \\ n_2 & (r > a) \end{cases} \quad \text{渐变: } n(r) = \begin{cases} n_1[1 - 2\Delta(r/a)^2]^{1/2} & (0 \leq r \leq a) \\ n_2 & (r > a) \end{cases} \quad (10.1)$$

理论和实践表明，不同的折射率分布，传输特性差别很大。图 10.1给出了这两种光纤横截面的折射率分布。光纤的典型尺寸为：单模光纤纤芯直径 $2a = 8 \sim 12\mu\text{m}$ ，包层直径 $2b \sim 125\mu\text{m}$ ；多模光纤 $2a \sim 50\mu\text{m}$ ， $2b \sim 125\mu\text{m}$ 。对单模光纤， $2a$ 与 λ 处同一量级，由于衍射效应，模式分布度有相当一部分处于包层中，不易精确测出模式的真是尺寸。因此芯层直径 $2a$ 只有结构设计上有意义，在应用中并无太大实际意义，实际应用中常用模场或模斑直径表示。

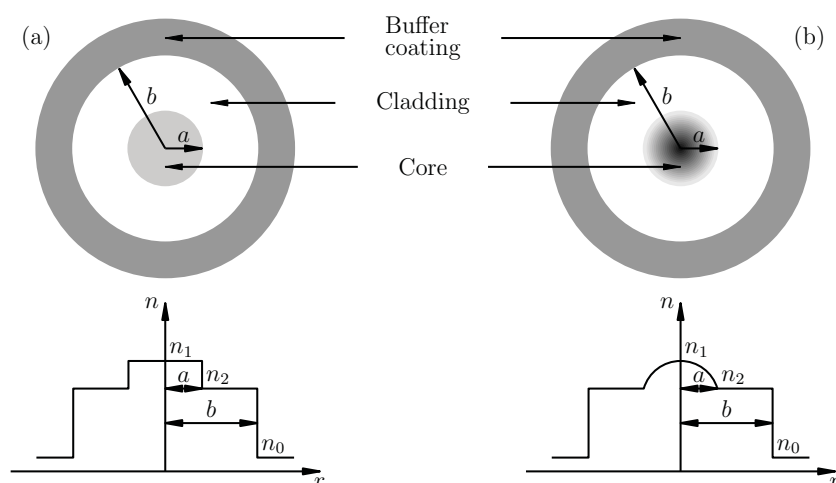


图 10.1: (a) 阶跃光纤, (b) 渐变光纤的横截面和折射率分布。

图10.2所示为阶跃光纤横截面，入射光在纤芯和包层的界面发生全反射，所有满足全反射条件的光线都将被限制在纤芯中，这是光纤约束和传导光场的基本机制。图10.3所示为渐变光纤的横截面，渐变光纤的芯区折射率不是一个常数，它从芯区中心的最大值 n_1 逐渐降低到纤芯-包层界面的最小值 n_2 ，大部分渐变光纤按二次方规律下降，正如方程10.1所示。在阶跃光纤中光线以曲折的锯齿形式向前传播，而在渐变光纤中则以一种正弦振荡形式向前传播。由图 10.2可见，类似于阶跃光纤，入射角大的光线路径长，由于折射率的变化，光速在沿路径变化，虽然沿光纤轴线传播路径最短，但轴线上折射率最大，光传播最慢，而斜光线的大部分路径在低折射率的介质中传播，虽然路径长，但传输得快。因而合理设计折射率分布，

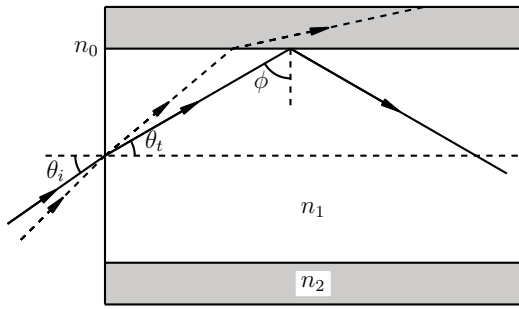


图 10.2: 阶跃折射率光纤中光线的传播路径。

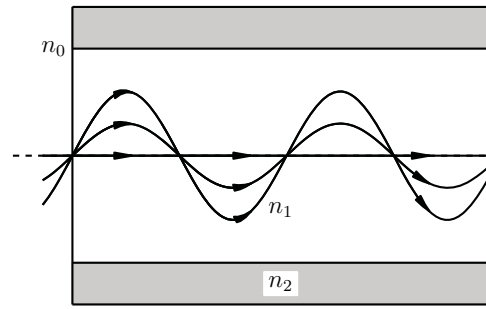


图 10.3: 渐变折射率光纤中的光线传播路径。

可使所有光线同时到达光纤输出端，从而降低了光纤模间色散。光纤是光纤通信的传输媒质，用石英材料制成，属于介质波导。光纤的主要特性是损耗、色散和非线性[16]。

2.2 光纤的损耗特性

光纤损耗是通信距离的固有限制，在给定发送功率和接收机灵敏度条件下，它决定了从光发送机到光接收机之间的最大距离，损耗过大将严重影响通信系统的性能。光纤的衰减机理主要有三种：即光能量的吸收损耗、散射损耗和辐射损耗。吸收损耗与光纤材料有关，散射损耗则与光纤材料及光纤中的结构缺陷有关，而辐射损耗则由光纤几何形状的微观和宏观扰动引起。光纤的损耗用衰减系数 α 表示：

$$\alpha(\text{dB/km}) = -10/L \times \log \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)$$

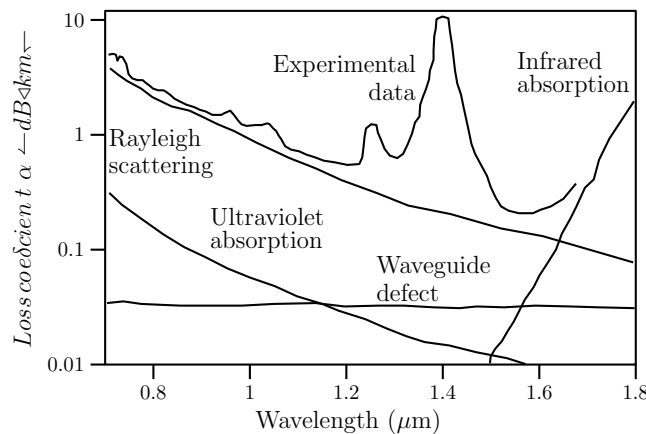


图 10.4: 单模光纤的损耗谱特性。

图10.4为光纤衰减系数随波长的变化曲线，图 10.5为光纤衰减研究的进展情况。早期，由于技术上的原因光纤通信只能利用 $0.8 - 0.9\mu\text{m}$ 的短波长波段，因为这个波段的损耗最小，且可得到与之匹配的光源与光电探测器。随着光纤杂质浓度的降低，光纤衰减大为减小。 $1.3\mu\text{m}$ 和 $1.5\mu\text{m}$ 是光纤的另两个低损耗窗口。目前，在 $1.3\mu\text{m}$ 波段，商品光纤的衰减为 0.35dB/Km ，而在 $1.5\mu\text{m}$ 波段为 0.25dB/Km ，已接近光纤固有损耗的极限。当更进一步减小光纤损耗时，可以得到在 $1.45\mu\text{m} \sim 1.65\mu\text{m}$ 波段的低损耗，这种光纤称全波段光纤，这将极大地扩展光纤的可用带宽[16]。

2.3 光纤截止波长与损耗的关系

光纤是一种介质波导，在光纤内传输的导波有各种不同模式。对于一定波长的光，它在光纤内传输时包含哪些模式，取决于光纤的内部结构（ n_1 、 n_2 、 a 和 b 的数值）。首先定义光纤接受光的能力，即数值孔径NA（Numerical Aperture）：

$$\text{NA} = \sin \theta_c = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

此处 θ_c 是光纤的最大接收半角。然后定义光纤的归一化频率 V ：

$$V = \frac{\pi d}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{\pi d}{\lambda} \text{NA}$$

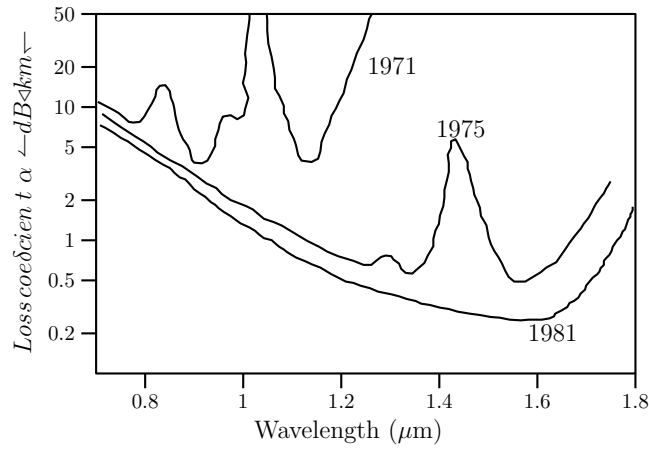


图 10.5: 光纤衰减随历史年代的进展。

当 V 值较大时，对于阶跃折射率光纤和渐变折射率光纤，其中传播模的数量 M 分别为

$$M_{\text{阶跃}} = \frac{V^2}{2}, \quad M_{\text{渐变}} = \frac{V^2}{4}$$

可见，通过减小 V （减小 d 和折射率差），就可以得只有一个传导模的光纤，即单模光纤。理论分析表明，各模式在 V 减小到某一数值时将会截止，即 V 小于某一数值以后，该种模式将不能在光纤中传输，弱波导纤维各低阶模式的截止归一化频率如表10.1所示。

表 10.1: 光纤模式与归一化波长关系

模式	V_c 值
LP01模	$V_c=0$
LP11模	$V_c=2.405$
LP21模	$V_c=3.832$
LP02模	$V_c=3.832$

从表10.1中的数据可以看出，LP01模的截止频率等于0，即不论 V 等于什么数值，它都可以在光纤内传输，所以称为基模。在 $V < 2.405$ 时，光纤中只有单一的基模传输。在这范围内工作的光纤称为单模光纤，它具有色散小，信息容量大等特点。对于一根特定的光纤(a, n_1 已确定)，只要波长充分长，总可以单模方式传输，开始实现单模传输的波长称为截止波长 λ_c ， $\lambda > \lambda_c$ 时，只有基模传输，各高阶模都被截止。

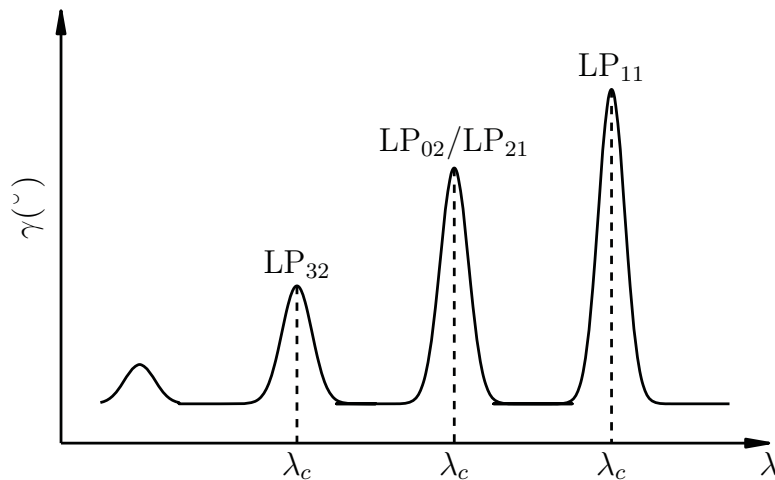


图 10.6: 光纤弯曲损耗与波长的关系

光纤弯曲时，在光纤内传输的光有一部分辐射到光纤之外，光纤内导波的强度将发生衰减。经过理论分析可知，由弯曲而引起的附加损耗在各模的截止点附近特别显著，而在偏离截止点稍远处附加损耗

却很小。附加损耗与波长的关系如图 10.6所示。因此，测量附加损耗与波长的关系，就可以定出光纤的截止波长 λ_c ，即对应于波长最大的那个附加损耗峰。

三 实验装置与内容

本实验要求正确搭建光路，测量出所给光纤的截止波长。本实验中要用到卤素灯，长时间工作的卤素灯温度很高，实验时一定要应注意避免烫伤。

3.1 实验光路

本实验所用光路如图10.7所示。

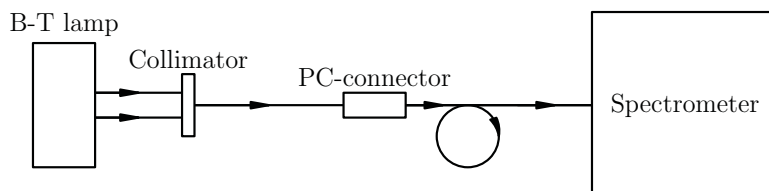


图 10.7: 光纤截止波长测量实验装置图。

3.2 实验步骤

1. 实验装置连接:

- 按图 10.7示光路连接实验装置，溴钨灯电源连接至PSG.OUT和GND输出。
- PSG置于低压源模式（LVS），输出电压调至9V。注意：此时输出电压必须从零缓慢连续增加至9V，而不能直接从0跳变到9V；这样作是为了延长灯的使用寿命。
- 将实验仪主机背板通讯接口用串行通讯电缆连接至计算机主机COM1口，打开实验仪主机电源后再运行计算机上的测试软件。

2. 单模光纤截止波长测量:

- 将溴钨灯辐射光束耦合进入单模光纤，单模光纤输出接入光谱分析器，输出狭缝置1mm。
- 保持单模光纤为自然伸展状态，将光谱分析器功率探头输出连接至PD.IN，PD量程(RTO)置10nA档。
- 测量单模光纤输出光谱，波长范围900 ~ 1700nm，波长间隔0.1nm。将此光谱设为损耗谱计算基准。
- 将单模光纤按直径30mm绕5圈，测量此时的单模光纤输出光谱。
- 求单模光纤弯曲损耗谱，确定单模光纤截止波长。

四 思考题

实验完成后，请思考如下的几个问题？

1. 光纤的导波机理是什么？有那些不同的类型？
2. 引起光纤损耗的原因有哪些？
3. 光纤的截止波长与那些因素有关？商用光纤（例如G652光纤）的截止波长大致是多少？

注意事项

1. 系统上电后禁止将光纤连接器对准人眼，以免灼伤。
2. 光纤连接器陶瓷插芯表面光洁度要求极高，除专用清洁布外禁止用手触摸或接触硬物。空置的光纤连接器端子必须插上护套。
3. 所有光纤均不可过于弯曲，除特殊测试外其曲率半径应大于30mm。