

光纤的物理性质与应用

一、引言

光纤通信是用激光作为信息的载体，以光纤作为传输介质的一种通信方式。因此，现代信息社会得以实现的最重要的两大关键技术是激光和光纤。光纤是光导纤维的简称。它是工作在光波段的一种介质波导，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，并引导光波沿着光纤轴线方向传播。

最早的光通信是 1880 年出现的贝尔光电话，将声膜的振动用光照反射、会聚到硅电池上，转换为电信号。光源为阳光或弧光灯，传输介质为空气。由于通话距离最远仅达到 213 米，因此实用性不强。1960 年，激光器在美国的发明，使沉睡了 80 年的光通信沐浴到复苏的曙光，但直到 1979 年，美国和日本研制出寿命达 100 万小时的室温连续工作半导体激光器，光通信的光源问题才真正解决。1960 年，最好的玻璃纤维的光损耗仍在 1000dB/km，许多人都放弃了用光纤作传输介质的努力。1966 年，华裔科学家高锟博士发表了《光频率的介质纤维表面波导》的论文，首次明确指出“只要设法降低玻璃纤维中的杂质，就能够获得能用于通信的、传输损耗较低的光导纤维”。1970 年，美国康宁玻璃公司率先研制成功了损耗为 20dB/km 的石英光纤，到 1976 年，日本电报电话公司已经将光纤损耗降低到 0.47dB/km。中国从 1976 年拉出 200m 长的第一根石英光纤，到 1979 年，光损耗降已为 4dB/km。低损耗通信光纤迅速发展到现在，损耗已小于 0.2dB/km。1980 年，美国标准化光纤通讯系统投入商业应用；1982 年，中国第一条实用化的光纤通信线路跨越武汉三镇。横跨大西洋和太平洋的海底光缆系统分别于 1988 年和 1989 年铺设完成。光纤光缆逐渐取代传统的金属电缆，成为现代信息传输的主要方式。光纤通信距离从 10 公里增加到可长达 1 万公里，且其通信容量可高达 1000Gb/s/km。2009 年，高锟以“涉及光纤传输的突破性成就”分享了该年度的诺贝尔物理学奖。

光纤通信之所以发展迅猛，主要缘于它具有以下几个特点：通信容量大、传输距离远；信号串扰小、保密性能好；抗电磁干扰、传输质量佳；光纤尺寸小、重量轻，便于敷设和运输；材料来源丰富，节约了大量有色金属铜；耐化学腐蚀，光缆适应性强，寿命长。光纤除了在现代通信系统中有着重要的应用外，在传感器技术方面，也有着独特的优势。光纤传感器是利用待测物理量对光纤内传输的光波的光学参量进行调制并传输至光学探测器进行解调，从而获得待测物理量的变化信息的装置，它具有损耗低、信息量大、线径细、质量轻、可绕性好的特点，可用于位移、振动、压力、电流、磁场、温度、浓度等各种物理量的测量，在通信、计算机、医学、自动控制、交通运输、国防等领域获得了广泛的应用。

光纤主要由纤芯、包层、涂敷层及套塑四部分组成，其构造如图 1 所示。

纤芯一般由直径为 5~50 μm 、掺有少量 P_2O_5 和 GeO_2 的高纯度 SiO_2 构成，掺杂剂的作用是提高纤芯的折射率。为减少光散射和光吸收，纤芯的杂质含量一般不大于 10^{-6} 。

包层主要也是由高纯度 SiO_2 构成，掺有少量的氟和硼以降低其折射率。包层的直径一般为 125 μm 。

包层外的涂敷层一般为环氧树脂或硅橡胶，其作用在于是增强光纤的机械强度。光纤的最外层是套塑，套塑大都是采用尼龙或聚乙烯，其作用也是加强光纤的机械强度，没有套塑层的光纤称为裸光纤。

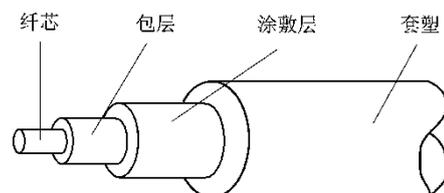


图 1 光纤结构示意图

光纤的分类方式有很多种,按照纤芯折射率分布形式可分为阶跃折射率光纤和渐变折射率光纤;按照光在光纤中的传输模式可分为单模光纤和多模光纤;按光纤的工作波长可分为短波长光纤、长波长光纤和超长波长光纤;而按照制造光纤所用的材料又可分为石英系光纤、多组分玻璃光纤、塑料包层石英芯光纤、全塑料光纤和氟化物光纤等。

本实验的目的是:了解光纤光学的基础知识;学习测量光纤数值孔径和损耗特性的方法;了解光纤温度传感器的工作原理;了解光纤音频通信的基本原理和系统构成。

二、实验原理

1. 光源与光纤的耦合效率

光源与光纤耦合时,为了降低耦合损耗,使更多的光功率注入光纤,获得最大的耦合效率,必须考虑光纤和光源的特性以及具体的耦合方法。He-Ne 激光器输出的高斯光束经过透镜后仍为高斯光束。仔细选择透镜的焦距 f , 使经透镜耦合后的高斯光束的束腰(光束中最窄的位置)与纤芯直径相等,即 $2W_0=2a$, 如图 2 所示。尽量将光纤的端面置于高斯光束的焦点处,以便获得最佳的耦合效率。耦合效率定义为

$$\gamma = \frac{P}{P_0}, \quad (1)$$

其中, P_0 是入射到光纤端面的光功率, P 是经耦合后输入光纤中的光功率。

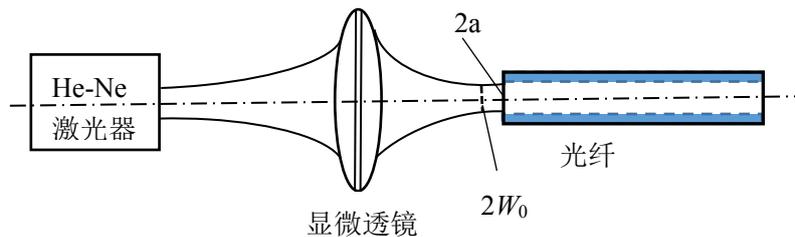


图 2 光纤与 He-Ne 激光器的耦合

2. 光纤的数值孔径

光纤的数值孔径 (NA-numerical aperture) 是表征光纤集光能力的一个重要物理量。由于光线传播具有可逆性,因此,数值孔径既反映了光纤的入射性质,又反映了光纤的出射性质。NA 越大,则光纤端面接收或会聚光的能力越强。从几何光学的观点来看,并不是所有入射到光纤端面上的光线都能进入光纤内部进行传播,都能从光纤入射端进去,从出射端出来。而是只有入射角度小于某一个角 θ 的光线,才能在光纤内部传播,如图 3 所示。设 θ 角是入射光线与光纤轴之间的夹角,这个角度的正弦值就定义为光纤的数值孔径 NA, 即

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

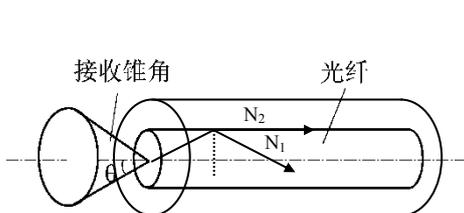


图 3 光纤的数值孔径

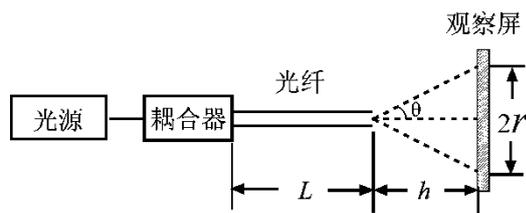


图 4 远场光斑法测试装置简图

本实验采用“远场光斑法”近似测量光纤的数值孔径，其测量原理如图4所示，由光纤射出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

$$NA = \sin \theta = \frac{r}{\sqrt{r^2 + h^2}}. \quad (3)$$

参考图3，若光线在纤芯和包层界面的入射角为临界角 $\theta_c = 90^\circ - \theta$ ，则所有与光纤光轴夹角小于 θ 的光线都能约束在光纤内。

3. 光纤的损耗

光波在光纤中传播会产生各种原因引起的损耗，除接续损耗弯曲损耗等附加损耗外，损耗主要来自于材料的两种固有损耗：散射与吸收。散射主要以瑞利散射为主，主要是由微小颗粒（尺度小于波长）或折射率不均匀导致的散射，其损耗与光波长的四次方成反比，除此之外，气泡、较大的杂质颗粒等也会引起米氏散射；另一种是光纤材料（包含杂质）的吸收，可分为紫外吸收与红外吸收。

光纤对光波产生的衰减作用称为光纤损耗。功率传输损耗是光纤最基本和最重要的特性之一，它在很大程度上决定了光纤通信的中继距离。光波在光纤的实际传输过程中，随着传播距离的增加，光功率以指数形式逐渐衰减，即

$$P(L) = P(0)e^{-\alpha(\lambda)L}, \quad (4)$$

其中， $P(0)$ 为光纤的输入功率， $P(L)$ 为光波传输 L 距离后光纤的输出功率， $\alpha(\lambda)$ 为损耗系数，它是光波波长的函数。在光通信中，光信号的损耗一般以分贝（dB）为单位，并采取以下的光纤损耗定义式：

$$A(\lambda) = 10 \lg \frac{P(0)}{P(L)} \text{ (dB)}. \quad (5)$$

光纤的损耗系数定义为单位距离上的损耗，即

$$\alpha(\lambda) = \frac{A(\lambda)}{L} \text{ (dB / Km)}. \quad (6)$$

本实验采用“截断法”测量光纤的损耗。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。这样，按照（5）式和（6）式便可以分别求出损耗和损耗系数。本实验所测量的损耗为包括吸收损耗、散射损耗和辐射损耗在内的总损耗。

4. 光纤温度传感器

光纤温度传感器是一种相位调制型光纤传感器，它的工作原理基于光纤双光束干涉相位的变化。由激光器发出的相干光，经光纤分束器分别送入两根长度基本相同的光纤中，其中一根叫探测臂，另一根叫参考臂。从两根光纤输出的激光束叠加后将产生干涉，形成干涉条纹。由双光束干涉理论可知，干涉场的光强 $I \propto (1 + \cos \varphi)$ ， φ 是相位差，表达式为

$$\varphi(T) = \frac{2\pi}{\lambda} n(T)L(T), \quad (7)$$

其中, λ 为波长; n 是光纤折射率, 一般为 1.458; L 是光纤的长度; T 是温度。当 $\varphi=2k\pi$ 时 (k 为干涉级次), 干涉场光强取极大值; 当 $\varphi=(2k+1)\pi$ 时, 干涉场光强取极小值。当外界的温度作用在其中一根光纤(探测臂)上时, 光纤在温度场作用下, 长度和折射率都将发生变化, 这使得相位也会发生变化, 并导致干涉条纹产生移动。

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(L\Delta n + n\Delta L). \quad (8)$$

5. 音频信号通信

音频信号传输系统由“光信号发送器”、“传输光纤”和“光信号接收器”三部分组成。其工作原理是: 将音频信号按一定的方式调制到载运信息的光波上, 经光纤传输到远端的接收器, 再经解调将信息还原并输出。在光纤传输过程中, 将音频信号转变成光信号和将光信号还原为音频信号是整个系统的关键, 下面分别介绍系统各部分的作用。

光信号发送器的作用是将音频电信号调制到激光器发出的光载波上, 使之变成载有音频信息的光信号, 而后进入光纤传送到光信号接收器。本实验采用直接强度调制方法把电信号转换为光信号。直接调制的方法是把传送的信息转变为电流信号, 用其驱动半导体发光二极管(LED-Light Emitting Diode), 使LED发出的光载功率的大小随电流信号的变化而变化。如图5所示, 当驱动电流较小时, LED的发射功率与驱动电流基本上呈线性关系, 当驱动电流达到某一阈值以后, 音频信号与LED的静态驱动电流相叠加, 使LED发送随音频信号变化的光信号。半导体发光二极管输出的光功率与其驱动

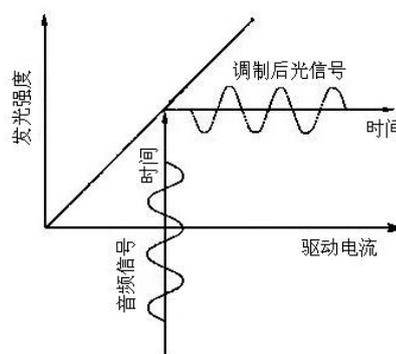


图5 音频信号调制为光信号

电流的关系称为LED的电光特性。为了避免和减小非线性失真, 使用时应给LED一个适当偏置电流, 其值等于这一特性曲线线性部分中点对应的电流值, 而调制信号的峰-峰值也应位于电光特性线性范围内。对于非线性失真要求不高的情况下, 也可把偏置电流选为LED最大允许工作电流的一半, 这样可使LED获得无截至畸变幅度最大的调制, 这有利于信号的远距离传输。

光信号接收器的作用是把传输光纤中的光信号耦合到光电二极管中, 由光电二极管将光信号转换成与之成正比的电流信号, 再经电流电压转换电路, 把电流信号变成电压信号, 音频电压信号经音频功率放大器后驱动喇叭发声。本实验的光信号接收采用硅光电二极管(SPD-Silicon Photo Diode), 峰值响应波长在820nm左右, 工作时SPD把经光纤出射端输出的光信号转化为与之光功率成正比的光电流, 经过I-V转换电路, 再把光电流转换成与之成正比例的电压信号。

实验所用的音频信号光纤传输实验原理框图及激光二极管输出*P-I*特性曲线如图6。音频信号输入光信号发送器, 经放大成为流过LED的音频调制电流 I_A , 以实现“电-光”过程的调制。LED要工作在线性区, 就必须加载偏置电流 I_D 。由 I_A+I_D 在电阻 R_e 上的压降 U_{Re} , 可测量调制信号。由图右的激光二极管输出*P-I*特性曲线可知, I_D 过小或过大, 将导致音频调制信号发生“截止形变”或“饱和形变”。

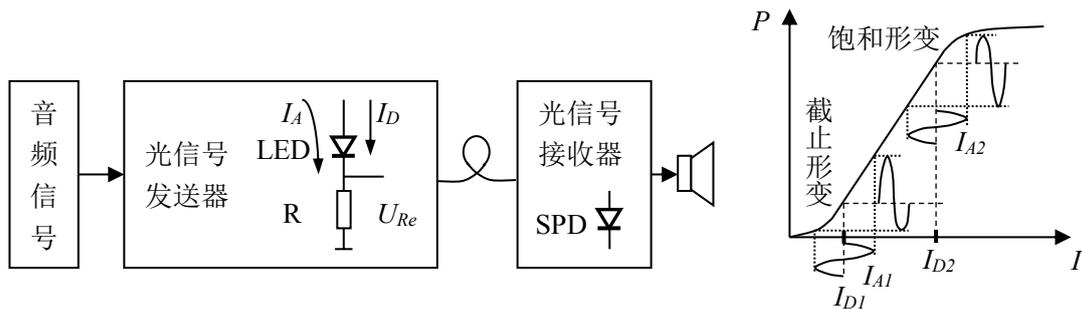


图 6. 音频信号光纤传输实验仪原理框图（左）和 LED 输出 $P-I$ 特性曲线（右）

被音频电流调制的光信号经光纤传到光信号接收器，其中 SPD 为“光-电”二极管探测器，实现与“电-光”LED 的相反功能，则可解调出音频电压信号 U_A 传送到扬声器。

三、实验装置

本实验所使用的仪器及光学元件有：He-Ne 激光器、光功率计、FD-OFT-A 型音频信号光纤传输实验仪、收音机、显微物镜、五维调整架、光纤、光纤切割刀、光纤钳。

四、实验要求：

- 1、设计测量塑料光纤的耦合效率和损耗系数的实验步骤。
- 2、设计测量商用石英光纤的数值孔径的实验步骤。
- 3、设计测量光纤温度传感器的温度系数的实验步骤。
- 4、（选作）光纤通信中信号的调制。

五、实验中的操作要点：

1、光路调节

- (a) 利用光学平台和可调小孔光阑，确认激光输出是否水平。具体方法：将小孔光阑放在激光的出光孔附近，调节小孔光阑的高度使其与光斑等高，孔的大小与激光光斑大小一致，平移小孔光阑远离激光器（保持在光学平台上），观察激光光斑是否刚好能通过光阑。若能，说明光束水平；若不能，则需调节激光器的俯仰，并重复以上步骤，直至光束水平。
- (b) 将五维调节架放入光学平台，使激光入射到聚焦目镜上，观察光束的反射斑，判断激光束是否与其光轴共轴（判断依据？）。若不共轴，调节目镜的位置、方向和高低，直至共轴。然后打开磁性表座开关固定五维调节架。
- (c) 观察激光是否和固定光纤的通光孔共轴（讨论判断依据？），若不共轴，反复调节通光孔的上下、左右位置以及俯仰角度，直至激光与通光孔共轴。

2、塑料光纤的耦合效率和损耗系数测量

- (a) 取一段塑料光纤（1.5~3 m），用实验室提供的剪刀处理端面，端面尽量的垂直与平滑。
- (b) 用铜套固定光纤的一端，光纤露出铜管的长度控制在 2mm 以内（如图 1b 所示），将铜管固定在五维调节架上。
- (c) 观察激光光斑与光纤端面的相对位置，调节五维调节架上的铜管的左右与上下位置（此时最好不要调节俯仰角，想想为什么？），直到激光光斑打在光纤端面上，将光纤的另一端也用铜管固定在光纤架上，并将光纤输出端尽量贴近光功率计感光面（想想为什

么?), 反复微调铜管位置、光纤与聚焦目镜的距离, 使输出功率最大。根据预先设计的实验方案, 记录数据, 并计算塑料光纤的耦合效率和损耗系数。

(d) 测量塑料光纤的数值孔径。



(a) 螺纹铜套

(b)

(c) 卡式铜套

(d)

图1 用铜套固定光纤的方法

3、商用石英光纤的耦合和数值孔径测量

(a) 取商用石英光纤, 其长度以能从五维调节架连接到桌面光纤耦合插头为宜, 过短的光纤应更换。

(b) 处理光纤端面: 用专用光纤剥线钳(如图2所示)的套塑孔剥除大约6-10cm左右的黄色塑套; 用涂覆层孔剥除白色涂覆层, 每次剥除长度最好不超过1cm, 露出裸光纤2cm左右; 最后用包层孔剥除包层, 保留包层的长度不超过2mm(如图3所示)。



图2 光纤剥线钳

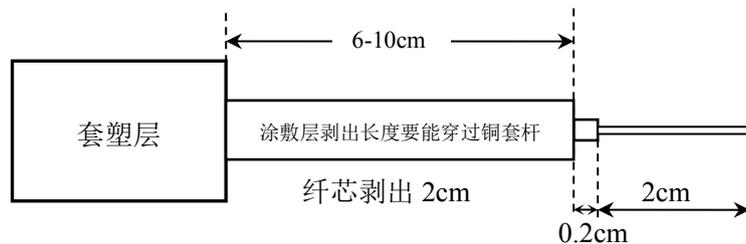


图3 光纤各部分处理长度

(c) 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。

(d) 将处理好的光纤装入螺纹铜套并固定在五维调节架上, 调节光纤位置至输出功率最大。根据自己的设计方案测量商用光纤的数值孔径。

4、光纤温度测量传感器的温度系数

保持第3步中石英光纤处于最佳耦合状态, 将光纤插头接入分束-干涉系统, 选择“1分四”光纤分束器的两个输出端(如何选择?), 观察输出光斑的形状, 根据情况决定是否对光纤端面进行处理, 将一支光纤放入桌面上的加热器狭缝中并固定好。将加热臂与参考臂两光纤输出端固定在光纤座上(或铜棒中), 调整两光纤的相对位置, 以及光纤与CCD探头的相对位置, 直到在显示器上观察到清晰的干涉条纹, 调节光纤耦合, 使干涉条纹亮度合适。

接通加热板电源，加热光纤，在 30°C~40°C 温度范围，按自己的设计方案测量并计算光纤传感器的温度系数，即 $\frac{\Delta N}{\Delta T} = ?$ ，分析干涉条纹产生及移动的原因，并讨论条纹移动数和温度之间的关系以及测量误差的来源，升温与降温至少各测一次。

(以下为选做内容，在课程允许的时间内，如果提前完成以上实验内容后，可以继续完成下面的部分内容)

5、LED 电光特性

- (1) 打开主机电源，将光纤其中一端接至 LED 发射器中信号输出端，另一端接至 SPD 接收器中的信号输入端；
- (2) 将光功率计开关置于测量档。调节偏流调节旋钮，使面板电流表读数为零，再将光功率表也调零。偏置电流从 5 mA~50 mA，每隔 5 mA 记录对应的光功率值。根据测量结果绘出 LED 电光特性曲线，即 LED 光功率与其驱动电流的关系图，分析其线性范围。

6、LED 直流偏流与最大不失真调制幅度的关系测定

本实验要找出在不同的直流偏流 I_D 下电路能加载的不失真调制幅度的大小，同时找到 LED 发光电路最佳工作点，以及在此工作点下能加载的最大不失真信号幅度。实验时先接好音频信号通道、光通道，把光功率计置于实验档。然后将音频发生器产生信号和 LED 调制信号输入双踪示波器观察。调节音频信号发生器，使其输出信号峰-峰值为 1V，频率为 10 KHz。接着把偏流加至 20 mA，调节“LED 发射器”中的幅度调节旋钮，使加在电路上的音频信号由小变大，观察调制信号的波形及失真情况。记录偏流为 20 mA 时最大不失真调制幅度的峰-峰值。分析观察到的现象，然后决定增大或减小偏流以找到最佳静态工作点 I_{DQ} 。实验时可调节音频信号幅度来检验新的工作点是否为 I_{DQ} ，若在示波器上能观察到调制信号同时出现截止和饱和失真(这时的偏置电流约为 66 mA 左右)，则此时正处于最佳工作点。记录刚要同时出现两种失真现象时的偏流值 I_{DQ} 和调制信号峰-峰值 V_{DQ} ，则从电路方面考虑，通过 LED 的最佳工作电流和最大不失真交流幅度分别为 I_{DQ} 和 V_{DQ}/R_e (本仪器 $R_e=50\Omega$)。

7、光纤传输系统幅频特性的测定

先接好音频信号通道、光通道，把光功率计置于实验档，将音频发生器产生信号和 LED 调制信号输入双踪示波器观察。实验时先将音频发生器输出信号峰-峰值调为 1V，偏流和调制信号幅度调节适当，以确保光信号发送器正常工作。然后将音频发生器输出信号频率依次调为 100Hz、500Hz、1KHz、5KHz、10KHz、15KHz、20KHz，用示波器观测由光纤传输的光信号转化成的音频电信号的波形和峰-峰值。由观测结果绘出音频信号光纤传输系统幅频特性曲线。

8、语音信号的传送

将半导体收音机的信号接入发送器的输入端(在后面板上)，通过后面板上的转换开关接收功放输出端接上扬声器，实验整个音频信号光纤传输系统的音响效果。实验时调节发送器 LED 的偏置电流，考察传输系统的听觉效果。

五、注意事项

- 1、眼睛不要正视激光器或光纤耦合输出的激光束。
- 2、小心插拔任何光器件的活动插头，不用时带好防尘护套，防止光纤端面污染和损坏。
- 3、实验开始前及结束后，应把 LED 发射器的幅度调节和偏流调节电位器逆时针旋至最小；

4、在实验中，光纤与发射器和接收器接头插拔时应该注意不要用力过猛，以免损坏。

六、思考题

1. 请列出光纤能够成为信息传播介质的物理原因。
2. 光纤的数值孔径与光纤的内全反射有什么关系？
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。
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。
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？

参考文献

- [1] 袁松青, 刘海平, 刘敏肖. 光纤通信原理. 北京: 人民邮电出版社, 1998
- [2] 雷肇棣. 光纤通信基础. 成都: 电子科技大学出版社, 1998
- [3] 廖延彪. 光纤光学. 北京: 清华大学出版社, 2000
- [4] 吕斯骅, 段家祗. 新编基础物理实验. 北京: 北京大学出版社, 2005

附录：光纤的模式

光是电磁波，它具有电磁波的通性。因此，光波在光纤中传输的一些基本性质，都可以从电磁场的麦克斯韦方程组中推导出来。所谓光纤的模式，就是可以在光纤中稳定传输的电磁场结构，可以由麦克斯韦方程组和边界条件严格求解。光纤的模式可以分成两大类，即矢量模和标量模。

(1) 矢量模的场结构

光纤的矢量模的场结构主要有横电波、横磁波和混和模。

1) 横电波 TE_{mn} : 电场强度矢量集中在光纤横截面上，在纵轴方向上无电场强度分量，只有磁场强度分量。

2) 横磁波 TM_{mn} : 磁场强度矢量集中在光纤横截面上，在纵轴方向上无磁场强度分量，只有电场强度分量。

3) 混合模， EH_{mn} 和 HE_{mn} : 两者在光纤横截面、纵轴方向同时存在电场分量和磁场分量。当纵轴方向上的电场比磁场强时，混合模用 EH_{mn} 表示，反之，用 HE_{mn} 表示。

通常，模式的下标 m 表示该模式的场分量沿光纤横截面圆周方向的最大值有 m 对，而下标 n 表示该模式的场分量沿光纤横截面径向有 n 对最大值。通常，将 m 、 n 较小的模称为低阶模，反之称为高阶模，把光纤中携带光能量最

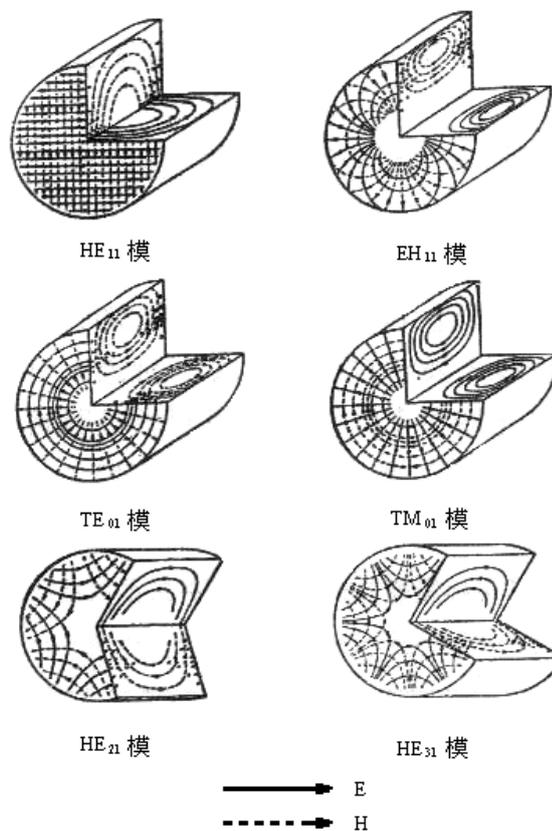


图2 部分矢量模场结构图

多的模称为主模。

图 2 是光纤中部分矢量模的场结构图。以 TE_{01} 模为例，说明场分布。 TE_{01} 模的场结构在横截面上的电力线是些同心圆，表示电场在圆周方向无变化，因而 $m=0$ ；在直径方向，电力线在截面中心与边缘两处最疏，在两者中间密度最密，电场在直径上有一对最大值，因而 $n=1$ 。

关于光纤模式的理论知识请参阅电动力学的有关章节。

(2) 标量模的场结构

所谓的线极化又称为线偏振，如果波的电磁场矢量空间取向不变，即其端点的轨迹为一曲线时，就把这种极化称为线极化。一般认为，光纤中的光波只有场的横向分量时为线极化波。若光波场的偏振状态保持不变，就可以用一个标量来描述它，此时光纤中传播的模式称为标量模，或线偏振模，用 LP_{mn} 表示。下标 m 表示光场沿圆周方向的最大值的对数， n 表示光场沿横截面径向的最大值的对数。

(3) 矢量模与标量模的关系

光纤中传播的矢量模式可能很多，不同的矢量模式有不同的场结构，但是，如果它们具有相同的传播常数时，这些模式在传播过程中会互相简并。通常，把这种现象称为模式简并，把这类模称为简并模。表 1 给出常见矢量模与标量模的简并关系及它们的场结构图。

表1 常见矢量模与标量模的简并关系及它们的场结构图

LP 模	LP_{01} 模	LP_{11} 模			LP_{21} 模	
光斑						
电场分布						
矢量模	HE_{11}	TE_{01}	TM_{01}	HE_{21}	EH_{11}	HE_{31}