

3.10 音频信号光纤传输技术实验

[实验目的]

1. 熟悉半导体电光/光电器件的基本性能及主要特性的测试方法；
2. 了解音频信号光纤传输系统的结构及选配各主要部件的原则；
3. 掌握半导体电光/光电器件在模拟信号光纤传输系统中的应用技术；
4. 训练音频信号光纤传输系统的调试技术。

[实验原理]

1. 系统的组成

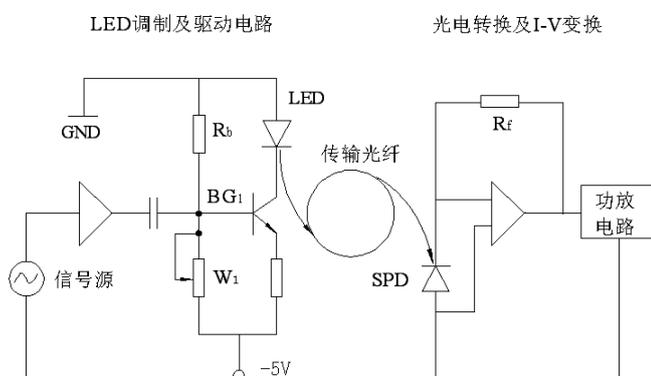


图 3.10.1 音频信号光纤传输系统原理图

图 3.10.1 示出了一个音频信号直接光强调制光纤传输系统的结构原理图，它主要包括由 LED 及其调制、驱动电路组成的光信号发送器、传输光纤和由光电转换、I—V 变换及功放电路组成的光信号接收器三个部分。光源器件 LED 的发光中心波长必须在传输光纤呈现低损耗的 $0.85\ \mu\text{m}$ 、 $1.3\ \mu\text{m}$ 或 $1.5\ \mu\text{m}$ 附近，本实验采用中心波长 $0.85\ \mu\text{m}$ 附近的 GaAs 半导体发光二极管 (LED) 作光源、峰值响应波长为 $0.8\sim 0.9\ \mu\text{m}$ 的硅光二极管 (SPD) 作光电检测元件。为了避免或减少谐波失真，要求整个传输系统的频带宽度能够覆盖被传信号的频谱范围，对于语音信号，其频谱在 $300\sim 3400\text{Hz}$ 的范围内。由于光导纤维对光信号具有很宽的频带，故在音频范围内，整个系统的频带宽度主要决定于发送端调制放大电路和接收端功放电路的幅频特性。

2. 光导纤维的结构及传光原理

衡量光导纤维性能好坏有两个重要指标：一是看它传输信息的距离有多远，二是看它携带信息的容量有多大，前者决定于光纤的损耗特性，后者决定于光纤的脉冲响应或基带频率特性。

经过人们对光纤材料的提纯，目前已使光纤的损耗容易做到 $1\ \text{dB}/\text{km}$ 以下。光纤的损

耗与工作波长有关，所以在工作波长的选用上，应尽量选用低损耗的工作波长，光纤通讯最早是用短波长 $0.85\ \mu\text{m}$ ，近来发展至用 $1.3\sim 1.55\ \mu\text{m}$ 范围的波长，因为在这一波长范围内光纤不仅损耗低，而且“色散”也小。

光纤的脉冲响应或它的基带频率特性又主要决定于光纤的模式性质。光纤按其模式性质通常可以分成两大类：单模光纤和多模光纤。无论单模或多模光纤，其结构均由纤芯和包层两部分组成。纤芯的折射率较包层折射率大，对于单模光纤，纤芯直径只有 $5\sim 10\ \mu\text{m}$ ，在一定条件下，只允许一种电磁场形态的光波在纤芯内传播，多模光纤的纤芯直径为 $50\ \mu\text{m}$ 或 $62.5\ \mu\text{m}$ ，允许多种电磁场形态的光波传播；以上两种光纤的包层直径均为 $125\ \mu\text{m}$ 。按其折射率沿光纤截面的径向分布状况又分成阶跃型和渐变型两种光纤（本实验采用阶跃型多模光纤作为信道），对于阶跃型光纤，在纤芯和包层中折射率均为常数，但纤芯折射率 n_1 略大于包层折射率 n_2 。所以阶跃型多模光纤，可用几何光学的全反射理论解释它的导光原理。在渐变型光纤中，纤芯折射率随离开光纤轴线距离的增加而逐渐减小，直到在纤芯与包层界面处减到某一值后，在包层的范围内折射率保持这一值不变。根据光射线在非均匀介质中的传播理论可知：经光源耦合到渐变型光纤中的某些光射线，在纤芯内是沿周期性地向光纤轴线的曲线传播。

3. 半导体发光二极管的结构、工作原理、特性及驱动与调制电路

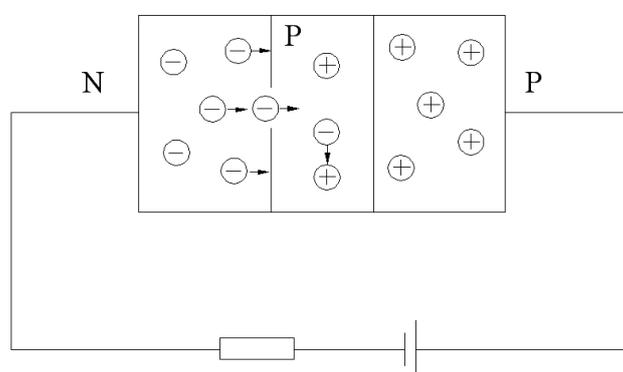


图 3.10.2 N—p—P 三层结构图

光纤通讯系统中对光源器件在发光波长、电光效率、工作寿命、光谱宽度和调制性能等许多方面均有特殊要求。目前在以上各个方面都能较好满足要求的光源器件主要有半导体发光二极管（LED）和半导体激光二极管（LD），本实验采用 LED 作光源器件。光纤传输系统中常用的半导体发光二极管是一个如图 3.10.2 所示的 N—p—P 三层结构的半导体器件，中间层通常是由 GaAs（砷化镓）p 型半导体材料组成，称为有源 S 层，其带隙宽度较窄，两侧分别由 GaAlAs 的 N 型和 P 型半导体材料组成，与有源层相比，它们都具有较宽的带隙。具有不同带隙宽度的两种半导体单晶之间的结构称为异质结。在图 3.10.2 中，有源层与左侧的 N 层之间形成的是 p—N 异质结，而与右侧 P 层之间形成的是 p—P 异质结，故这种结构又称 N—p—P 双异质结构。当给这种结构加上正向偏压时，就能使 N 层向有源层注入导电电子，这些导电电子一旦进入有源层后，因受到右边 p—P 异质结的阻挡作用不能再进入右侧的 P 层，它们只能被限制在有源层与空穴复合，导电电子在有源层与空穴复合的过程中，要释放出能量，从而产生光子：

$$h\nu = E_1 - E_2 = E_g \quad (3.10.1)$$

其中 h 是普朗克常数， ν 是光波的频率， E_1 是有源层内导电电子的能量， E_2 是导电电子与空穴复合后处于价键束缚状态时的能量。两者的差值 E_g 与各层材料及其组份的选取等多种因素有关，制做 LED 时只要这些材料的选取和组份的控制适当，就可使得 LED 发光中心波长与传输光纤低损耗波长一致。

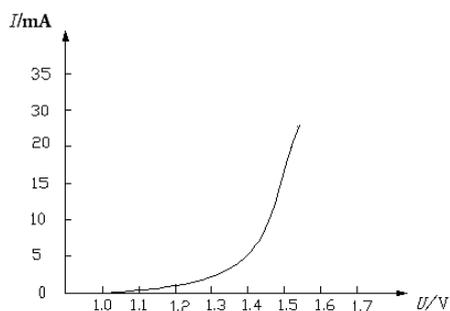


图 3.10.3 HFRB-1424 型 LED 的正向伏安特性

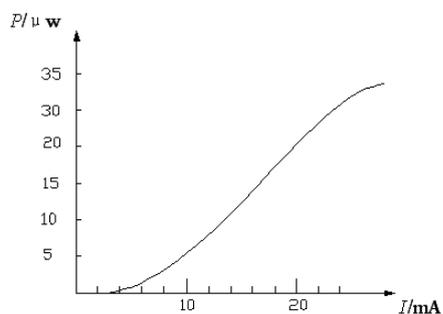


图 3.10.4 HFRB-1424 型 LED 的电光特性

本实验采用的 HFBR-1424 型半导体发光二极管的正向伏安特性如图 3.10.3 所示，与普通的二极管相比，在正向电压大于 1V 以后才开始导通。在正常使用情况下，正向压降为 1.5V 左右。半导体发光二极管输出的光功率与其驱动电流的关系称为 LED 的电光特性，如图 3.10.4 所示。为了使传输系统的发送端能够产生一个无非线性失真、而峰—峰值又最大的光信号，使用 LED 时应先给它一个适当的偏置电流，其值等于这一特性曲线线性部分中点对应的电流值，而调制电流的峰—峰值应尽量处于这一电光特性的线性范围内。

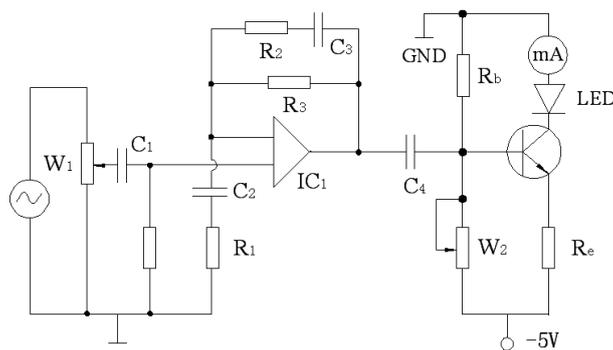


图 3.10.5 LED 的驱动和调制电路

音频信号光纤传输系统发送端 LED 的驱动和调制电路如图 3.10.5 示，以 BG1 为主构成的电路是 LED 的驱动电路，调节这一电路中的 W2 可使 LED 的偏置电流在 0—20 mA 的范围内变化。被传音频信号由 IC1 为主构成的音频放大电路放大后经电容器 C4 耦合到 BG1 基极，对 LED 的工作电流进行调制，从而使 LED 发送出光强随音频信号变化的光信号，并经光导纤维把这一信号传至接收端。

4. 半导体光电二极管的结构、工作原理及特性

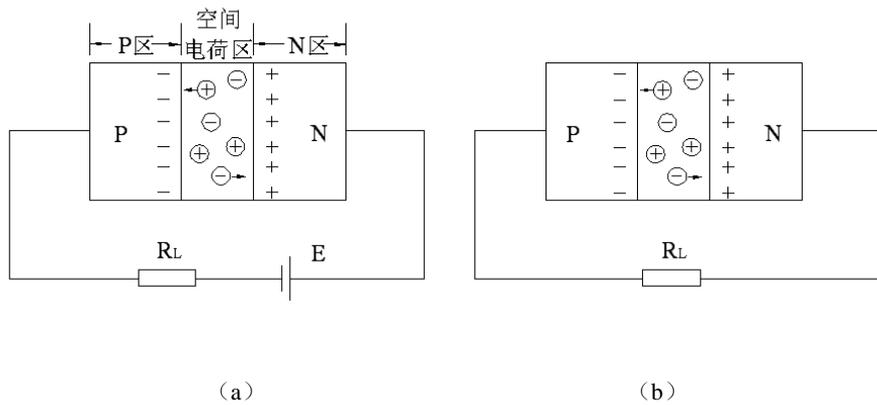


图 3.10.6 光电二极管的结构及工作方式

半导体光电二极管与普通的半导体二极管一样，都具有一个 p-n 结，光电二极管在外形结构方面有它自身特点，这主要表现在光电二极管的管壳上有一个能让光射入其光敏区的窗口、此外与普通二极管不同，它经常工作在反向偏置电压状态或无偏压状态。在反偏电压下，p-n 结的空间电荷区的势垒增高、宽度加大、结电阻增加、结电容减小，所有这些均有利于提高光电二极管的高频响应性能。无光照时，反向偏置的 p-n 结只有很小的反向漏电流，称为暗电流。当有光子能量大于 p-n 结半导体材料的带隙宽度 E_g 的光波照射到光电二极管的管芯时，p-n 结各区域中的价电子吸收光能后将挣脱价键的束缚而成为自由电子，与此同时也产生一个自由空穴，这些由光照产生的自由电子—空穴对统称为光生载流子。在远离空间电荷区（亦称耗尽区）的 p 区和 n 区内，电场强度很弱，光生载流子只有扩散运动，它们在向空间电荷区扩散的途中因复合而消失掉，故不能形成光电流。形成光电流的主要靠空间电荷区的光生载流子，因为在空间电荷区内电场很强，在此强电场作用下，光生自由电子—空穴对将以很高的速度分别向 n 区和 p 区运动，并很快越过这些区域到达电极，在外电路闭合的情况下形成光电流，光电流的方向是从二极管的负极流向它的正极，并且在无偏压短路的情况下与入照的光功率成正比，因此在光电二极管的 p-n 结中，增加空间电荷区的宽度对提高光电转换效率有着密切关系。为此目的，若在 p-n 结的 p 区和 n 区之间再加一层杂质浓度很低以致可近似为本征半导体（用 i 表示）的 i 层，就形成了具有 p—i—n 三层结构的半导体光电二极管，简称 PIN 光电二极管，PIN 光电二极管的 p-n 结除具有较宽空间电荷区外，还具有很大的结电阻和很小的结电容，这些特点使 PIN 管在光电转换效率和高频响应特性方面与普通光电二极管相比均得到了很大改善。理论分析指出，光电二极管的伏—安特性可用下式表示：

$$I = I_s (\exp(qU/KT) - 1) - I_L \quad (3.10.2)$$

普通二极管的伏—安特性表示为：

$$I = I_s (\exp(qU/KT) - 1) \quad (3.10.3)$$

式 (3.10.2) 中的 I_s 是无光照时的反向饱和电流， U 是二极管的端电压（正向电压为正，反向电压为负）， q 为电子电荷， k 为波耳兹曼常数， T 是结温，单位为 K， I_L 是无偏压状态下光照时的短路电流，它与光照时的光功率成正比 I_s 和 I_L 均是反向电流，即从光电二极管

负极流向正极的电流。根据式 (3.10.2)，光电二极管的伏安特性曲线如图 3.10.7 所示，对应图 3.10.6 (a) 所示的反偏工作状态，光电二极管的工作点由负载线 $U = -E - IR_L$ 与第三象限的伏安特性曲线交点确定。由图 3.10.7 可以看出：

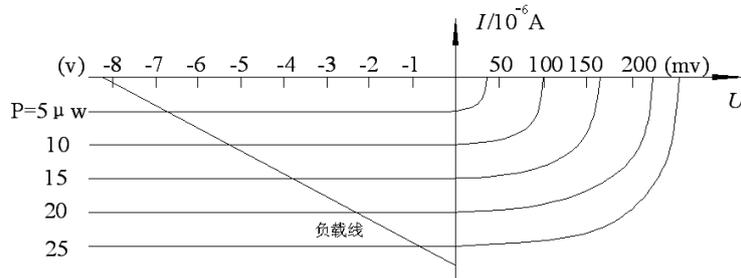


图 3.10.7 光电二极管的伏安特性曲线及负载线

第一、光电二极管既使在无偏压的工作状态下，也有反向电流流过，这与普通二极管只具有单向导电性相比有着本质的差别；

第二、反向偏压工作状态下，在外加电压 E 和负载电阻 R_L 的很大变化范围内，光电流与入照的光功率均具有很好的线性关系。

第三、在光电二极管处于开路状态情况下，光照时产生的光生载流子不能形成闭合光电流，它们只能在 p-n 结空间电荷区的内电场作用下，分别堆积在 p-n 结空间电荷区两侧的 n 层和 p 层内，产生外电场，此时光电二极管表现出有一定的开路电压。不同光照情况下的开路电压就是伏安特性曲线与横坐标轴交点对应的电压值。由图 3.10.7 可见，光电二极管开路电压与入照光功率呈非线性关系。

无偏压状态下，短路电流与入照光功率的关系称为光电二极管的光电特性，这一特性在 I-P 坐标系中的斜率：

$$Q \equiv \Delta I / \Delta P (\mu A / \mu W) \quad (3.10.4)$$

定义为光电二极管的响应度，这是表征光电二极管光电转换效率的重要参数。光电二极管的响应度 Q 值与入照光波的波长有关。本实验中采用的硅光电二极管，其光谱响应波长在 $0.4 \sim 1.1 \mu m$ 之间、峰值响应波长在 $0.8 \sim 0.9 \mu m$ 范围内。在峰值响应波长下，响应度 Q 的典型值在 $0.25 \sim 0.5 \mu A / \mu W$ 的范围内。

[实验仪器]

OFE—B 型光纤传输及光电技术综合实验仪，OPT-B 型光功率计

OFE—B 型光纤传输及光电技术综合实验仪是一种多功能实验仪器，本次实验只介绍其中与音频信号光纤传输相关的部分。

主机的前面板图如图 3.10.8 所示：

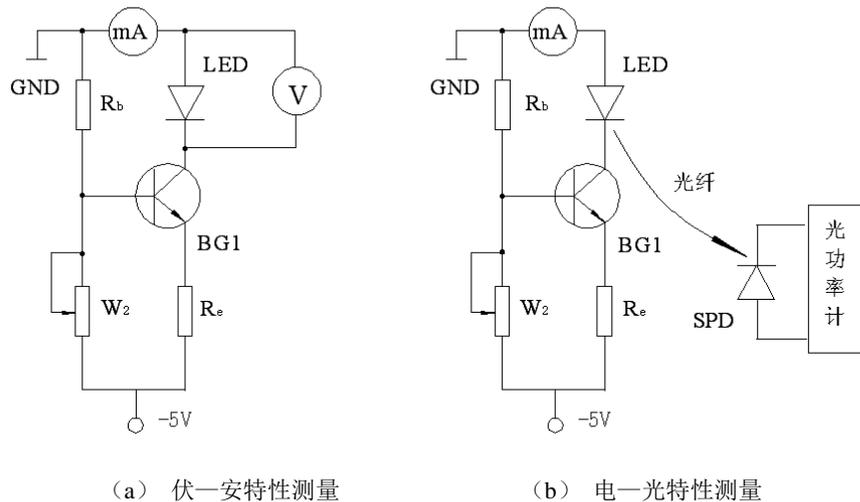


图 3.10.9 测定 LED 伏安特性和电光特性的测量原理图

(3) LED 电光特性测定

在以上连线基础上，把 SPD 插入 OFE—B 实验仪前面板 C3 插孔的电缆插头改插到光功率计的插孔中，在 LED 电流为零的情况下，调节光功率计的零点。然后，调节主机前面板 W2 使 D1 指示的 LED 工作电流从零到大改变，每增加 2 mA 记录一次光功率计的示值，直到 LED 电流为 20 mA 止。根据测量结果描绘 LED—传输光纤组件的电光特性曲线，并标出线性度较好的区间。

2. 硅光电二极管光电特性及响应度的测定

(1) 如图 3.10.10 连线。

在前面连线的基础上，把 OFE—B 实验仪前面板电压表切换开关 K₂ 掷向 SPD 一边；

(2) R_f 的测量：用数字万用表测量并记录下 I—V 变换电路插孔 L2 和 L3 之间 R_f 的电阻值（大约为 10K）；

(3) V₀ 的测量：选择数字万用表的 0—200 mV 档接至 I—V 变换电路的输出端 L3 插孔和共地端 L5 插孔；

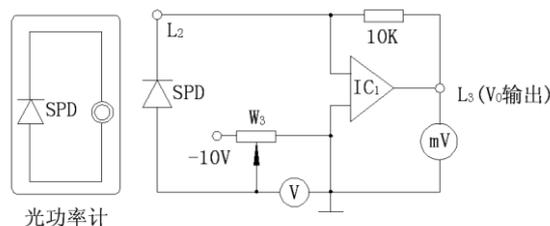


图 3.10.10 测定硅光电二极管光电特性的原理图

(4) 调节光功率计的零点；

(5) 记录 I—V 变换电路零点：在 SPD 零光照和零偏压的情况下 I—V 变换电路输出端的读数从理论上讲应为零。若不为零（这是由组成 I—V 变换的运放电路零点偏移所致），记下其读数作为零点。

(6) SPD 反向伏安特性特性的测定：在 SPD 入照光功率分别为 0、5、10、15、20 和 $25 \mu\text{W}$ 等 6 种情况下，把 SPD 电缆插头插入 OFE—B 实验仪前面板 C3 插孔，然后调节 OFE—B 实验仪前面板上的 W3 旋钮使 SPD 的反压从 0 开始逐渐增大，每增加 1V，用数字万用表 (200mV) 测量并记录一次 I—V 变换电路的输出电压 (毫伏数)。根据以上实验数据和 R_f 阻值绘制 SPD 的反向伏安特性和光电特性，并计算其响应度 Q 。

3. 语音信号光纤传输系统最佳工作点的选择

把音箱接入 OFE—B 实验仪后面板的“音箱”插孔中，并把后面板的开关切换到“模拟”一侧。语音信号源接入实验仪前面板模拟调制信号输入插孔 C1。根据以上实验数据选择语音信号光纤传输系统最佳工作点后，进行语音信号光纤传输实验。调节 OFE—B 实验仪前面板的 W1 旋钮，考察实验系统的音响效果。

[思考题]

1. 利用 SPD、I—V 变换电路和数字毫伏表，设计一光功率计。
2. 如何测定图 3.10.7 中 SPD 第四象限的正向伏安特性曲线？