

光纤特性及传输实验

在现代通信技术中，为了避免信号互相干扰，提高通信质量与通信容量，通常用信号对载波进行调制，用载波传输信号，在接收端再将需要的信号解调还原出来。不管用什么方式调制，调制后的载波要占用一定的频带宽度，如音频信号要占用几千赫兹的带宽，模拟电视信号要占用八兆赫兹的带宽。载波的频率间隔若小于信号带宽，则不同信号间要互相干扰。能够用作无线电通信的频率资源非常有限，国际国内都对通信频率进行统一规划和管理，仍难以满足日益增长的信息需求。通信容量与所用载波频率成正比，与波长成反比，目前微波波长能做到厘米量级，在开发应用毫米波和亚毫米波时遇到了困难。光波波长比微波短得多，用光波作载波，其潜在的通信容量是微波通信无法比拟的，**光纤通信就是用光波作载波，用光纤传输光信号的通信方式。**

与用电缆传输电信号相比，光纤通信具有**通信容量大，传输距离长，价格低廉，重量轻易敷设，抗干扰，保密性好**等优点，已成为固定通信网的主要传输技术，帮助我们的社会成功发展至信息社会。

【实验目的】

- 1.了解光纤通信的原理及基本特性。
- 2.测量激光二极管的伏安特性，电光转换特性。
- 3.测量光电二极管的伏安特性。
- 4.掌握频率调制传输性质。

【实验仪器】

光纤特性及传输实验仪，示波器

【实验原理】

1.光纤

光纤是由纤芯，包层，防护层组成的同心圆柱体，横截面如图 1 所示。纤芯与包层材料大多为高纯度的石英玻璃，通过掺杂使纤芯折射率大于包层折射率，形成一种**光波导效应**，使大部分的光被束缚在纤芯中传输。若纤芯的折射率分布是均匀的，在纤芯与包层的界面处折射率突变，称为**阶跃型光纤**。若纤芯从中心的高折射率逐渐变到边缘与包层折射率一致，称为**渐变型光纤**。若纤芯直径小于 $10\mu\text{m}$ ，只有一种模式的光波能在光纤中传播，称为**单模光纤**。若纤芯直径 $50\mu\text{m}$

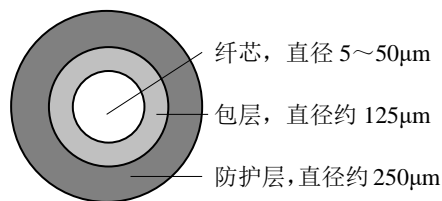


图 1 光纤的基本结构示意图

若纤芯直径 $50\mu\text{m}$

左右，有多个模式的光波能在光纤中传播，称为**多模光纤**。防护层由缓冲涂层，加强材料涂覆层及套塑层组成。通常将若干根光纤与其它保护材料组合起来构成光缆，便于工程上敷设和使用。

衡量光纤性能好坏的主要是它的**损耗特性与色散特性**。

损耗特性决定光纤传输的中继距离。光在光纤中传输时，由于材料的散射，吸收，会使光信号衰减，当信号衰减到一定程度时，就必需对信号进行整形放大处理，再进行传输，才能保证信号在传输过程中不失真，这段传输的距离叫**中继距离**，损耗越小，中继距离越长。光纤的损耗与光波长有关，通过研究发现，石英光纤在 0.85，1.30，1.55 μm 附近有三个低损耗窗口，实用的光纤通信系统光波长都在低损耗窗口区域内。

损耗用损耗系数表示。光在有损耗的介质中传播时，光强按指数规律衰减，在通信领域，损耗系数用单位长度的分贝值（dB）表示，定义为：

$$\alpha = \frac{10}{L} \lg \frac{P_0}{P_1} \quad (\text{dB/km}) \quad (1)$$

已知损耗系数，可计算光通过任意长度 L 后的强度：

$$P_1 = P_0 10^{-\frac{\alpha L}{10}} \quad (2)$$

上两式中，L 是传播距离， P_0 是入射光强， P_1 是损耗后的光强。

对于单模光纤而言，随着波长的增加，其弯曲损耗也相应增大，因此对 1550nm 波长的使用，要特别注意弯曲损耗的问题。随着光纤通信工程的发展，最低衰减窗口 1550nm 波长区的通信必将得到广泛的运用。CCITT 对 G. 652 光纤和 G. 653 光纤在 1550nm 波长的弯曲损耗作了明确的规定：

对 G. 652 光纤，用半径为 37.5mm 松绕 100 圈，在 1550nm 波长测得的损耗增加应小于 1dB；对 G. 653 而言，要求增加的损耗小于 0.5dB。



图 2 单模光纤弯曲损耗测试示意图

此处可不用扰模器，可其它东西实现光纤的弯曲也可。弯曲损耗的测量，要求在具有较为稳定的光源条件下，将几十米被测光纤耦合到测试系统中，保持注入状态和接收端耦合状态不变的情况下，分别测出松绕 100 圈前后的输出光功率 P_1 和 P_2 ，弯曲损耗可由下式

计算得出。

$$A=10\lg(P_1/P_2) \tag{3}$$

相同光纤，传输相同波长光波信号，弯曲半径不同时其损耗也必定不同，同样，对于相同光纤，弯曲半径相同时，传输不同光波信号，其损耗也不同。

由于按照 CCITT 标准，光纤的弯曲损耗比较小，在实际测试中可采用减小弯曲半径的办法提高实验效果的明显性。实验测试框图如图 3 所示。

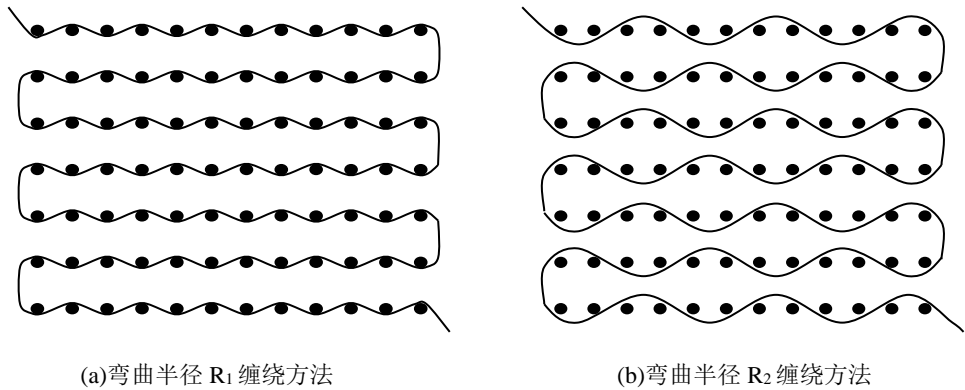


图 3 扰模器缠绕方法示意图

2.激光二极管（FP-LD）

光通信光源为半导体激光器（LD）或发光二极管（LED），**本实验采用半导体激光器。**

半导体激光二极管或简称半导体激光器，它通过受激辐射发光，是一种阈值器件。处于高能级 E_2 的电子在光场的感应下发射一个和感应光子一模一样的光子，而跃迁到低能级 E_1 ，这个过程称为**光的受激辐射**，所谓一模一样，是指发射光子和感应光子不仅频率相同，而且相位、偏振方向和传播方向都相同，它和感应光子是相干的。由于受激辐射与自发辐射的本质不同，导致了半导体激光器不仅能产生高功率（ $\geq 10\text{mW}$ ）辐射，而且输出光发散角窄（垂直发散角为 $30\sim 50^\circ$ ，水平发散角为 $0\sim 30^\circ$ ），与单模光纤的耦合效率高（约 $30\%\sim 50\%$ ），辐射光谱线窄（ $\Delta \lambda = 0.1\sim 1.0\text{nm}$ ），适用于高比特工作，载流子复合寿命短，能进行高速信号（ $>20\text{GHz}$ ）直接调制，非常适合于作高速长距离光纤通信系统的光源。

LD 和 LED 都是半导体光电子器件，其核心部分都是 P-N 结。因此其具有与普通二极管相类似的 V-I 特性，如图 4 所示：

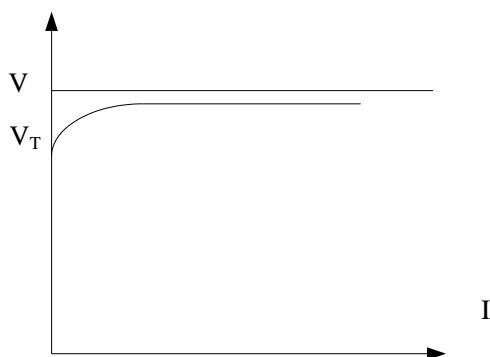


图4 LD 激光器输出 V-I 特性示意图

由于结构上的不同，LD 和 LED 的 P-I 特性曲线则有很大的差别。LED 的 P-I 曲线基本上是一条近似的直线。而 LD 半导体激光器的 P-I 曲线，如图 5 所示，可以看出有一阈值电流 I_{th} ，只有在工作电流 $I > I_{th}$ 部分，P-I 曲线才近似一根直线。而在 $I < I_{th}$ 部分，LD 输出的光功率几乎为零。

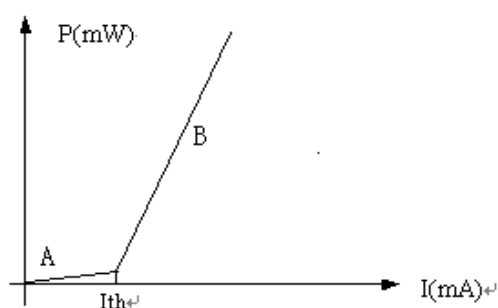


图5 LD 半导体激光器 P-I 特性示意图

阈值电流是非常重要的特性参数。图 5 中 A 段与 B 段的交点表示开始发射激光，它对应的电流就是阈值电流 I_{th} 。半导体激光器可以看作为一种光学振荡器，要形成光的振荡，就必须要有光放大机制，也即激活介质处于粒子数反转分布，而且产生的增益足以抵消所有的损耗。将开始出现净增益的条件称为**阈值条件**。一般用注入电流值来标定阈值条件，也即**阈值电流** I_{th} 。

当注入电流较小时，激活器不能实现粒子束反转，自发辐射占主导地位，激光器发射普通的荧光。随着注入电流的增加，激活器里实现了粒子束反转，受激辐射占主导地位。但当注入电流小于阈值电流时，谐振腔内的增益还不足以克服如介质的吸收、镜面反射不

完全等引起的谐振腔的损耗时，不能再腔内建立起振荡，激光器只发射较强荧光。只当注入电流大于阈值电流是才能产生功率很强的激光。当注入电流增加时，输出光功率也随之增加，在达到 I_{th} 之前半导体激光器输出荧光，到达 I_{th} 之后输出激光，输出光子数的增量与注入电子数的增量比见式（4）。

$$\eta_d = \left(\frac{\Delta P}{h\nu} \right) / \left(\frac{\Delta I}{e} \right) = \frac{e}{h\nu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta I} \quad (4)$$

$\Delta P/\Delta I$ 为图 5 激射时的斜率， h 是普朗克常数 (6.625×10^{-34} 焦耳·秒)， ν 为辐射跃迁情况下释放出的光子的频率。

P-I 特性是选择半导体激光器的重要依据。在选择时，应选阈值电流 I_{th} 尽可能小， I_{th} 对应 P 值小，而且没有扭折点的半导体激光器。这样的激光器工作电流小，工作稳定性高，消光比大，而且不易产生光信号失真。并且要求 P-I 曲线的斜率适当。斜率太小，则要求驱动信号太大，给驱动电路带来麻烦；斜率太大，则会出现光反射噪声及使自动光功率控制环路调整困难。

3. 光电二极管

光通信接收端由光电二极管完成光电转换与信号解调。光电二极管是工作在无偏压或反向偏置状态下的 PN 结，反向偏压电场方向与势垒电场方向一致，使结区变宽，无光照时只有很小的暗电流。当 PN 结受光照射时，价电子吸收光能后挣脱价键的束缚成为自由电子，在结区产生电子一空穴对，在电场作用下，电子向 N 区运动，空穴向 P 区运动，形成光电流。

光通信常用 PIN 型光电二极管作光电转换。它与普通光电二极管的区别在于在 P 型和 N 型半导体之间夹有一层没有渗入杂质的本征半导体材料，称为 I 型区。这样的结构使得结区更宽，结电容更小，可以提高光电二极管的光电转换效率和响应速度。

图 6 是反向偏置电压下光电二极管的伏安特性。无光照时的暗电流很小，它是由少数载流子的漂移形成的。有光照时，光电流取决于入射光功率。在适当的反向偏置电压下，入射光功率与饱和光电流之间呈较好的线性关系。

图 7 是光电转换电路，光电二极管接在晶体管基极，集电极电流与基极电流之间有固定的放大关系，基极电流与入射光功率成正比，则流过 R 的电流与 R 两端的电压也与光功率成正比，若光功率随调制信号变化，R 两端的电压输出解调出原调制信号。

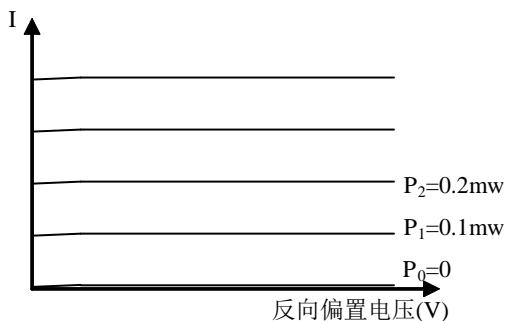


图 6 光电二极管的伏安特性

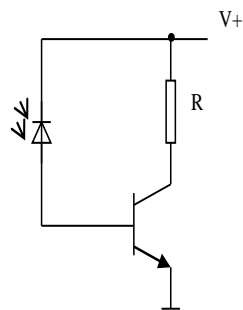


图 7 简单的光电转换电路示意图

4.光源的调制

对光源的调制可以采用内调制或外调制。**内调制**用信号直接控制光源的电流，使光源的发光强度随外加信号变化，内调制易于实现，一般用于中低速传输系统。外调制时光源输出功率恒定，利用光通过介质时的电光效应，声光效应或磁光效应实现信号对光强的调制，一般用于高速传输系统。**本实验采用内调制。**

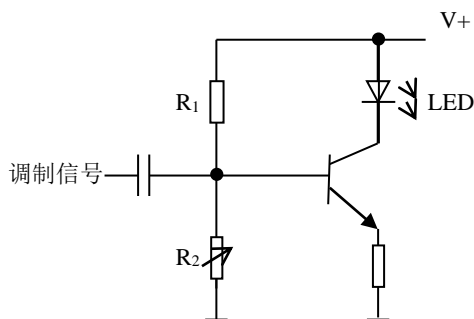


图 8 简单的调制电路示意图

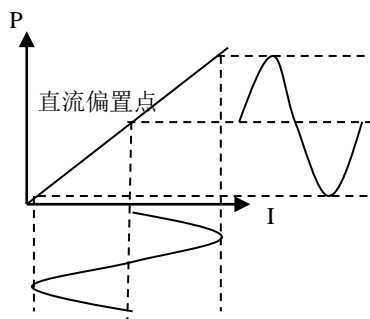


图 9 调制原理图

图 8 是简单的调制电路。调制信号耦合到晶体管基极，晶体管作共发射极连接，流过发光二极管的集电极电流由基极电流控制， R_1 、 R_2 提供直流偏置电流。由调制原理图 9 可知，由于光源的输出光功率与驱动电流是线性关系，在适当的直流偏置下，随调制信号变化的电流变化由发光二极管转换成了相应的光输出功率变化。

5.副载波调频调制

低频电磁波的辐射需要足够长的天线，且能量损失大，所以低频信号不能由天线发射。实际生活中，是利用高频无线电波作为“运输工具”，把所需传送的低频信号“装载”到高频信号上，再由天线发送出去。我们把被传送的低频信号叫做“**调制信号**”，把运载低频信号的高频信号叫做“**载波**”。使载波信号的某项参数（幅度、频率或相位）随调制信

号的变化而变化，从而将调制信号“装载”到载波上的过程，叫做**调制**。调制的目的是利用高频信号把低频信号传送到远方。到达目的地后，还必须把低频信号从高频信号中“卸”下来。这种把低频信号从高频已调波中分离出来的过程，叫做**解调**。

对副载波的调制可采用调幅，调频等不同方法。调频具有抗干扰能力强，信号失真小的优点，**本实验采用调频法**。

图 10 是副载波调制传输框图。

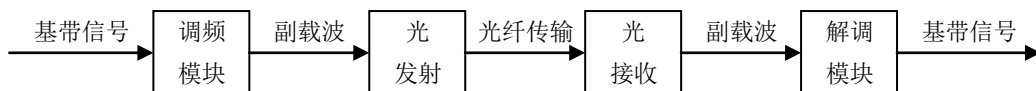


图 10 副载波调制传输框图

如果载波的瞬时频率偏移随调制信号 $m(t)$ 线性变化，即：

$$\omega_d(t) = k_f m(t) \quad (5)$$

则称为调频， k_f 是**调频系数**，代表频率调制的灵敏度，单位为 2π 赫兹/伏。

调频信号可写成下列一般形式：

$$u(t) = A \cos[\omega t + k_f \int_0^t m(t) dt] \quad (6)$$

式中 ω 为载波的角频率， $k_f \int_0^t m(t) dt$ 为调频信号的瞬时相位偏移。下面考虑两种特殊情况：

假设 $m(t)$ 为电压为 V 的**直流信号**，则（6）式可以写为：

$$u(t) = A \cos[(\omega + k_f V)t] \quad (7)$$

式（7）表明直流信号调制后的载波仍为余弦波，但角频率偏移了 $k_f V$ 。

假设 $m(t) = U \cos \Omega t$ ，则（6）式可以写为：

$$u(t) = A \cos[\omega t + m_f \sin \Omega t], m_f = \frac{k_f U}{\Omega} \quad (8)$$

其中 m_f 被称为**调制指数**。令 $A=1$ ，可以证明，已调信号包括载频分量 ω 和若干个边频分量 $\omega \pm n\Omega$ ，边频分量的频率间隔为 Ω 。任意信号可以分解为直流分量与若干余弦信号的叠加，则（7），（8）两式可以帮助理解一般情况下调频信号的特征。

【实验仪器】

光纤发射装置、光纤接收装置、光纤跳线以及示波器。

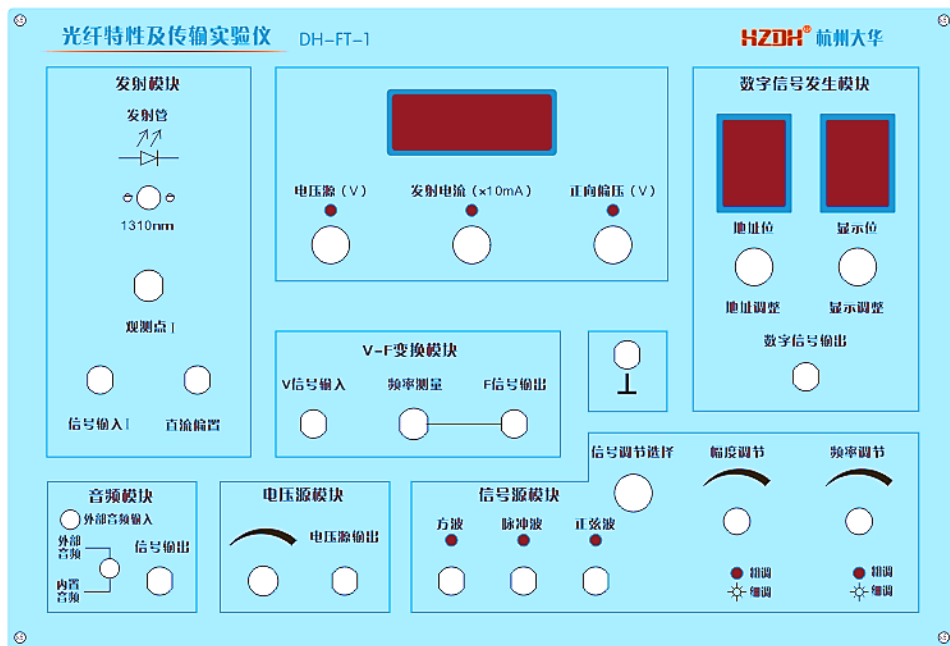


图 11 光纤发射装置面板图

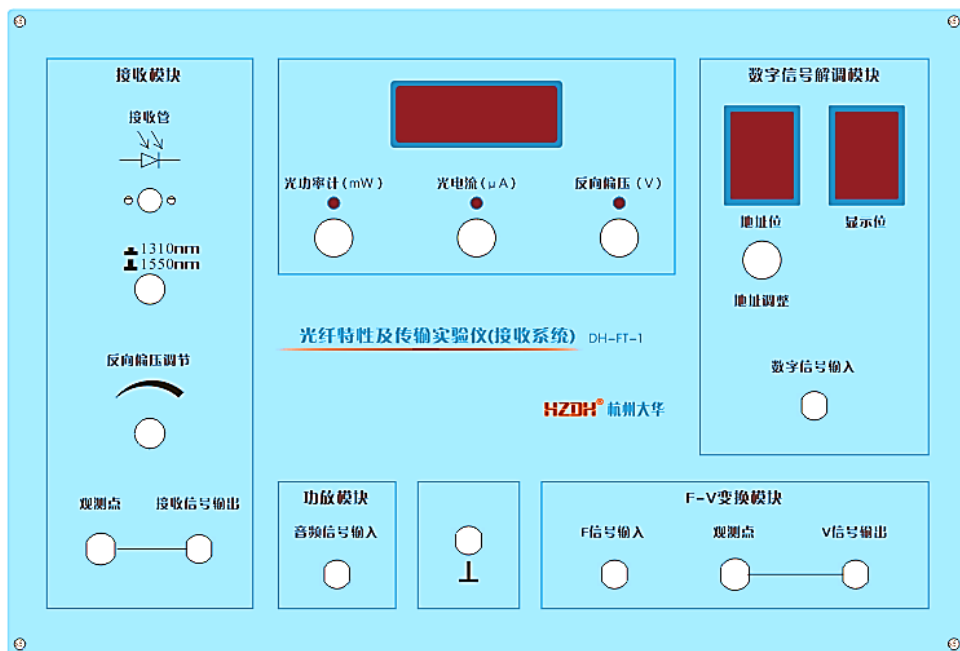


图 12 光纤接收装置面板图

光纤发射与接收装置面板如图 11 和图 12 所示。光纤发射装置可产生各种实验需要的信号，通过发射管发射出去。发出的信号通过光纤传输后，由接收管将信号传送到光纤接收装置。接收装置将信号处理后，通过仪器面板显示或者示波器观察传输后的各种信号。

发射系统中的信号源模块部分由方波信号、脉冲信号、**正弦波信号**组成。这些信号可以通过信号切换键来选择调整参数。当对应信号源的指示灯亮起时，表示可以对该信号进行幅度调节和频率调节了。调节也可以根据所需通过按压旋钮选择“粗调”和“细调”，即当调节的指示灯亮起代表**粗调**，不亮代表**细调**。

接收系统中，显示部分的“光功率计”只能调节到“1310”，“1550”则作为扩展显示（**当前验仪中**没有**设置 1550nm 波长的发射装置**）。

实验中使用的光纤为 FC-FC 光跳线（短光纤）。示波器用于观测各种信号波形经光纤传输后是否失真等特性（选做）。

【实验内容和步骤】

1.激光二极管的伏安特性与输出特性测量（**必做**）

- （1）用 FC-FC 光纤跳线将光“**发射管**”与“**接收管**”相连；
- （2）将“**电压源输出**”连接“**直流偏置**”；
- （3）按下发射机“**发射电流**”键（ $\times 10\text{mA}$ ），接收机“**光功率计**”（mW）键；
- （4）调节电压源来设定发射电流数值，如表 1，记录与发射电流相对应的光功率。再按下发射机“**正向偏压**”键，记录与发射电流对应的发射管两端电压于表 1 中。以此类推，依次改变发射电流，（**如果发射电流值不能精确达到表 1 的设定数值，只要尽量接近即可**）将 P 与 U 数据记录于表 1 中。（光功率初始几个为 0 为正常，**是负数不记录**）

表 1 激光二极管伏安特性与输出特性测量的数据

发射电流 I ($\times 10\text{mA}$)	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0
光功率 P(mW)																
正向偏压 U(V)																

2.光电二极管伏安特性的测量（**选做，对自己有更高要求的学生可自学，其他同学不用**）

- （1）连接方式同实验 1。调节发射机的电压源，使接收机光功率如表 2 所示；
- （2）调节接收装置的反向偏压调节，在不同输入光功率时，切换显示状态，分别测量光电二极管反向偏置电压与光电流，记录于表 2 中。

表 2 光电二极管伏安特性的测量数据

反向偏置电压 (V)		0	1	2	3
P=0	光电流(μA)				
P=0.1mW					
P=0.2mW					
P=0.3mW					
P=0.4mW					

以表 2 数据作光电二极管的伏安特性曲线，讨论所作曲线与图 6 所描述的规律是否符合。

3.副载波调制传输实验

(1) 观测调频电路的电压-频率关系 (**必做**)

- ①用 FC-FC 光纤跳线将光“发射管”与“接收管”相连；
- ②将发射机的“电压源输出”接入 V-F 变换模块的“**V 信号输入**”(用直流信号作调制信号)；
- ③将“**F 信号输出**”接入示波器：根据调频原理，直流信号调制后的载波角频率偏移 $k_f V$ ；

观测输入电压与输出频率之间的 V-F 变换关系；

- ④调节电压源，通过在示波器上读输出信号的周期来换算成频率。将输出频率 f_V 随电压的变化记入表 3 中。(频率 f_V 保留**两位**有效数字， ω 保留**三位**有效数字，**4 舍 6 入 5 凑偶**)

表 3 调频电路的 V-F 关系

输入电压(V)	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
输出频率 $f_V(\text{kHz})$											
角频率 $\omega(\text{kHz})$											

(2) 副载波调制传输实验 (**选做，对自己有更高要求的同学可自学，其他同学不用**)

- ①用 FC-FC 光纤跳线将光“发射管”与“接收管”相连；
- ②将“**正弦波**”接入“V 信号输入”；
- ③“**F 信号输出**”接入“**信号输入 I**”；(用副载波信号作激光二极管调制信号)
- ④将“电压源输出”接入“**直流偏置**”；
- ⑤将“**接收信号输出**”接入“**F 信号输入**”；

- ⑥将 F-V 变换模块的“观测点”接入示波器；
- ⑦调节直流偏置电压为 3V。用示波器观测基带信号（“正弦输出”与“地”之间，正弦波信号峰峰值不能太大，3V 以内），在保证正弦波不失真的前提下调节其幅度和频率到一个固定值，记录幅度和频率于表 4 中。此时接收装置接收信号输出端输出的是经光电二极管还原的副载波信号，将接收信号输出接入 F-V 变换模块 F 信号输入端，在 V 信号输出端输出经解调后的基带信号。用示波器观测经调频、光纤传输后解调的基带信号波形（F-V 变换模块的“观测点”）；将观测情况记入表 4 中；
- ⑧改变输入基带信号（正弦波）的频率和幅度，观测 F-V 变换模块输出波形，记入表 4。

表 4 副载波调制传输实验数据

基带信号		光纤传输后解调的基带信号		
幅度(V)	频率(kHz)	幅度(V)	频率(kHz)	信号失真程度
1.52	8.00			
1.52	4.00			
1.00	8.00			
3.00	8.00			

基带传输实验中，衰减会使输出幅度减小，传输过程的非线性会使信号失真。副载波传输采用频率调制，解调电路的输出只与接收到的瞬时频率有关，可以观察到衰减对输出几乎无影响，表明调频方式抗干扰能力强，信号失真小。对表 4 结果作定性讨论。

【实验数据处理】

1. 根据表 1 数据画出激光二极管的伏安特性 U-I 曲线（I 为横坐标）；讨论所画曲线与图 4 所描述的规律是否符合。
2. 根据表 1 数据画出激光二极管的输出特性 P-I 曲线（I 为横坐标）；讨论所画曲线与图 5 所描述的规律是否符合。根据曲线得出阈值电流 I_{th} 。
3. 根据表 3 数据画出输入电压 U 作横坐标，输出角频率 $\omega_v=2\pi f_v$ 为纵坐标的曲线，取 $\pi=3.14$ 。
4. 直线与纵轴的交点为副载波的角频率 ω ，直线的斜率为调频系数 k_f ，求出 ω 与 k_f ，写出过程。
5. 画出本实验核心内容思维导图。

【实验注意事项】（实验报告讨论分析中不要写这些内容）

光学器件属于昂贵易损器件，所以在实验操作过程中应加倍小心，防止光学器件的损坏，为了保证实验顺利地进行，请注意以下事项：

1. 本实验需要经常联接和断开光跳线（尾纤）与光发射器、光检测器，应轻拿轻放，使用时切忌用力过大。
2. 实验完毕后，请立即盖上机箱盖，防止灰尘进入光纤端面而影响光信号的传输。
3. 若不小心把光纤输出端的接口弄脏，需用酒精棉球进行清洗。
4. 光纤跳线接头应妥善保管，防止磕碰，使用后及时戴上防尘帽。
5. 不要用力拉扯光纤，光纤弯曲半径一般不小于 30mm，否则可能导致光纤折断。

思考题：

- 1.试说明半导体激光器发光工作原理。
- 2.环境温度的改变对半导体激光器 P-I 特性有何影响？
- 3.分析以半导体激光器为光源的光纤通信系统中，半导体激光器 P-I 特性对系统传输性能的影响。