

光电子器件与技术实验

实验 1 光电池特性测试

一. 实验目的

1. 了解光电池的工作原理和基本使用方法;
2. 掌握光电池的光电特性和伏安特性及其测试方法。

二. 实验仪器设备

光电探测原理实验箱 一台

连接导线 若干

三. 实验要求

1. 预习教材中的相关内容。
2. 阅读并熟悉本次实验的内容。
3. 设计并正确连接电路。
4. 测量并记录实验数据。
5. 实验结束将仪器归位。

四. 实验任务

1. 光电池的结构原理

光电池是一种直接将光能转换为电能的光电器件。光电池在有光线作用时实质就是电源，电路中有了这种器件就不需要外加电源。

光电池的工作原理是基于“光生伏特效应”。它实质是一个大面积的 PN 结，当光照射到 PN 结的一个面，例如 P 型面时，若光子能量大于半导体材料禁带宽度，那么 P 型区每吸收一个光子就产生一对自由电子和空穴，电子—空穴对从表面向内迅速扩散，在结电场的作用下，最后建立一个与光照强度有关的电动势。图 1.1 为硅光电池原理图。其中 (a) 结构示意图；(b) 等效电路。

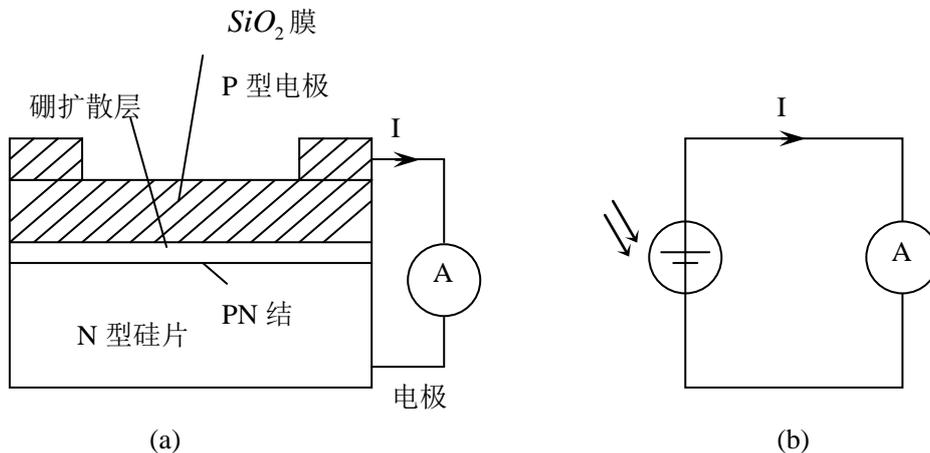


图 1.1 硅光电池 (a) 结构示意图；(b) 等效电路

2. 光电池基本特性

这里讨论光电池的光照特性，用入射光强-电流电压特性和入射光强-负载特性来描述。

入射光强-电流电压特性描述的是开路电压和短路电流随入射光强变化的规律，如下图所示

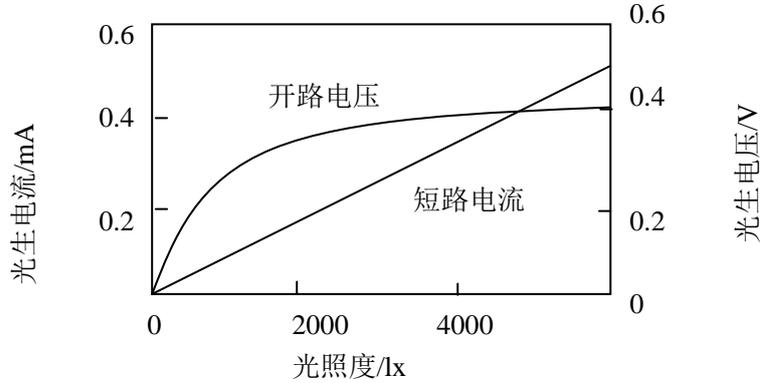
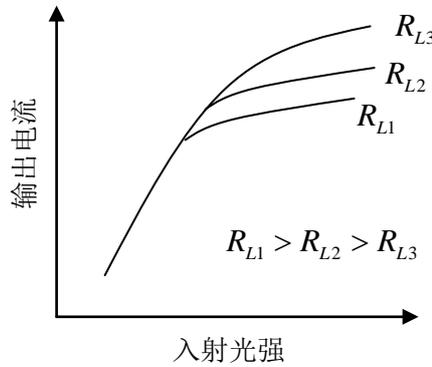


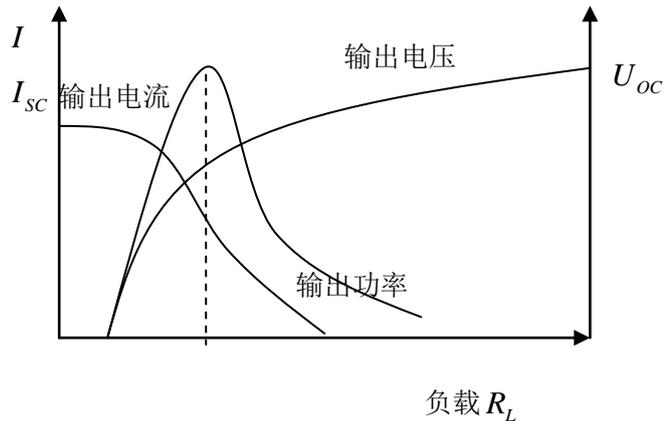
图 3.2 硅光电池的光照电流电压特性

U_{oc} 随入射光强按对数规律变化， I_{sc} 与入射光强成线性曲线。

光电池用作探测器时，通常是以电流源形式使用，总要接负载电阻 R_L ，这时电流记作 I_{LC} ，它与入射光强不成线性关系， R_L 相对光电池内阻 R_d 越大，线性范围越小，如下图所示：



入射光强-负载特性描述的是在相同照度下，输出电压、输出电流、输出功率随负载变化的规律，如下图所示：



当 $R_L \ll R_d$ 时, 可近似看做短路, 输出电流为 I_{sc} , 与入射光强成正比, R_L 越小, 线性度越好, 线性范围越大。

当 R_L 为 ∞ 时, 可近似看做开路, 输出电压为 U_{oc} 。

随着 R_L 的变化, 输出功率也变化, 当 $R_L = R_M$ 时, 输出功率最大, R_M 称最佳负载。

实验注意事项:

1. 当电压表和电流表显示为“1_”时说明超过量程, 应更换为合适量程;
2. 连线之前要保证电源关闭。

实验步骤:

1. 光电池照度-电流特性曲线

实验装置原理框图如图 3.3 所示。

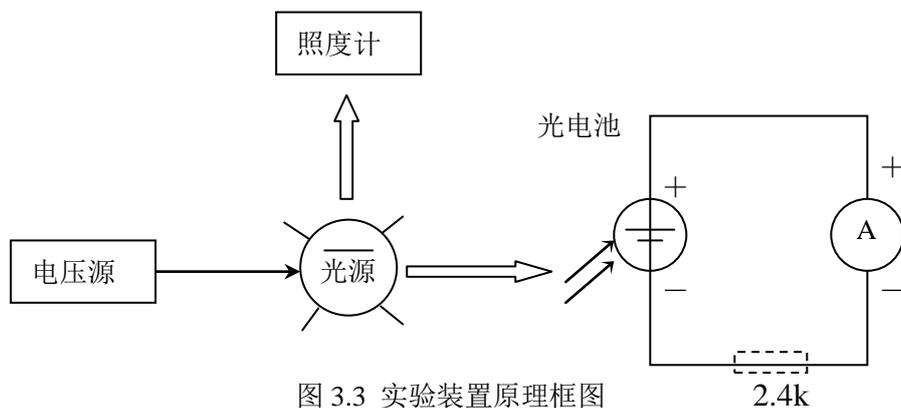


图 3.3 实验装置原理框图

分别测出下表所示光照度和负载下的光生电流。作出光照度-电流特性曲线, 并对曲线进行分析

光照度 (lx)		0	20	40	60	80	100	120	140	160
$R = 0$	光生电流 (μA)									
$R = 2.4k\Omega$	光生电流 (μA)									

2、光电池照度-电压特性测试

实验原理框图如下图

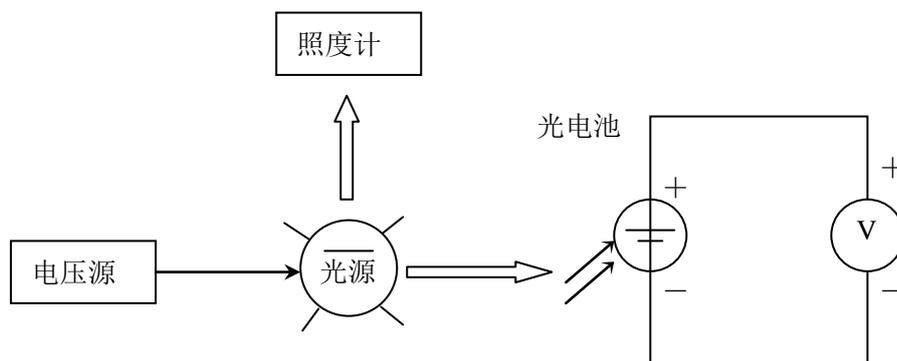


图 3.4 实验装置原理框图

分别测出下表所示光照度下的光生电压，作出光照度-开路电压特性曲线。

光照度 (lx)	0	10	30	50	100	200	300
光生电压 (mV)							

3、入射光强-负载特性测试

实验原理框图如下图。

(1) 按图连接线路，光照度取 50lx，将电压表选择 2V 档，电流表选择 $200\mu A$ 档。

(2) 分别测出负载电阻 R 为下表所示值的电流和电压。

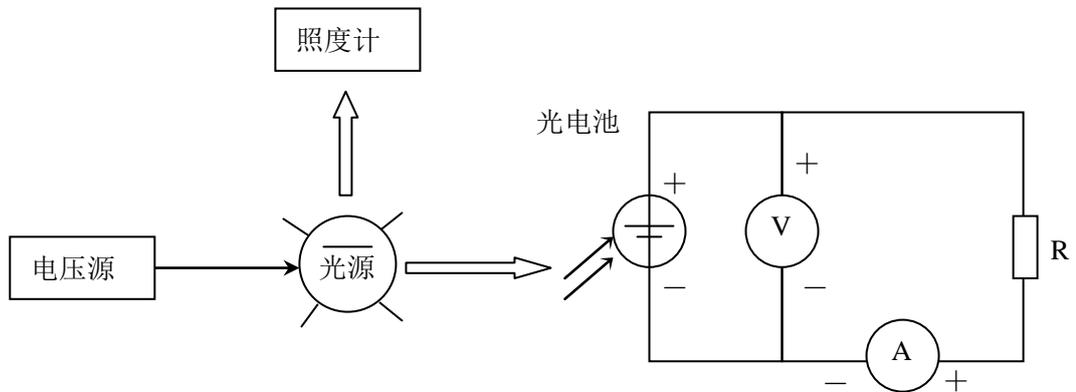


图 3.5 实验装置原理框图

负载 (Ω)	0	2.4k (R_{L1})	5.6k (R_{L2})	10k (R_{L3})	51k (R_1)	100k (R_2)
电流 (μA)						
电压 (mV)						

(3) 作出 50lx 光照度下光电池的光生电流、光生电压随负载变化的曲线。

(4) 光照度取 100lx、200lx、300lx，重复上述步骤。

(5) 作出 100lx、200lx、300lx、50lx 光照度下光生电流、光生电压负载变化的曲线，比较四条曲线的不同，并加以分析。

五. 实验报告

1. 记录数据并进行数据处理。

2. 根据实验测试记录，在坐标纸上画出光照度-电流特性曲线图，光照度-开路电压特性曲线和光电池的光生电流、光生电压随负载变化的曲线，并分析实验现象。

3. 比较光照度-开路电压和光照度-短路电流曲线的异同，并对两条曲线进行分析。

实验 2 光电二极管特性测试

一. 实验目的

- 1.了解光电二极管的工作原理和使用方法；
- 2.掌握光电二极管的光照度特性及其测试方法；
- 3.加深对光电二极管的工作原理的理解；
- 4.进一步熟悉光电二极管的基本应用；
- 5.理解光电二极管的伏安特性并掌握其测试方法。

二. 实验仪器设备

光电探测原理实验箱 一台

连接导线 若干

三. 实验要求

1. 预习教材中的相关内容。
2. 阅读并熟悉本次实验的内容。
3. 设计并正确连接电路。
4. 测量并记录实验数据。
5. 实验结束将仪器归位。

四. 实验任务

1. 光生伏特效应：

光生伏特效应是一种内光电效应。光生伏特效应是光照使不均匀半导体或均匀半导体中光生电子和空穴在空间分开而产生电位差的现象。对于不均匀半导体，由于同质的半导体不同的掺杂形成的PN结、不同质的半导体组成的异质结或金属与半导体接触形成的肖特基势垒都存在内建电场，当光照射这种半导体时，由于半导体对光的吸收而产生了光生电子和空穴，它们在内建电场的作用下就会向相反的方向移动和聚焦而产生电位差。这种现象是最重要的一类光生伏特效应。均匀半导体内没有内建电场，当光照射时，因光生载流子浓度梯度不同而引起载流子的扩散运动，且电子和空穴的迁移速率不相等，使两种载流子扩散速度的不同从而导致两种电荷分开，而出现光生电势。这种现象称为丹倍效应。此外，如果存在外加磁场，也可使得扩散中得两种载流子向相反方向偏转，从而产生光生电势。通常把丹倍

效应和光磁电效应称为体积光生伏特效应。

2. 光电二极管结构：

光电二极管的核心部分也是一个 PN 结，和普通二极管相比有很多共同之处，它们都有一个 PN 结，因此均属于单向导电性的非线性元件。但光电二极管作为一种光电器件，也有它特殊的地方。例如，光电二极管管壳上的一个玻璃窗口能够接收外部的光照；光电二极管 PN 结势垒区很薄，光生载流子的产生主要在 PN 结两边的扩散区，光电流主要来自扩散电流而不是漂移电流；又如，为了获得尽可能大的光电流，PN 结面积比普通二极管要大得多，而且通常都以扩散层作为受光面，因此，受光面上得电极做的很小。为了提高光电转换能力，PN 结的深度较普通二极管浅。图 2.1 为光电二极管外形图 (a)、结构简图 (b)、符号 (c) 和等效电路图 (d)。

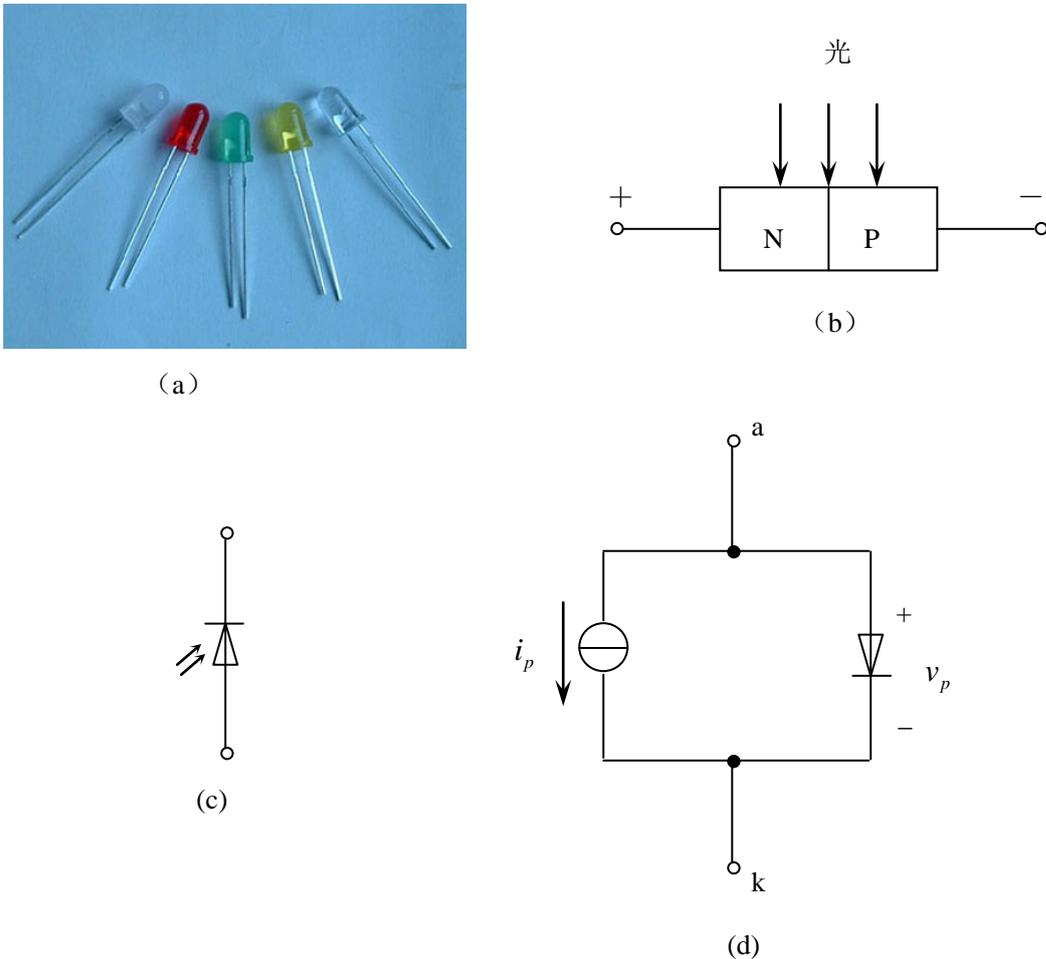


图 2.1 (a) 光电二极管外形图、(b) 结构简图、(c) 符号、(d) 等效电路图

光电二极管在电路中一般是处于反向工作状态（见图 2.2，图中 E 为反向偏置电压），在没有光照射时，反向电阻很大，反向电流很小（一般小于 0.1 微安），这个反向电流称为

暗电流；当光照射在 PN 结上，光子打在 PN 结附近，使 PN 结附近产生光生电子和光生空穴对，称为光生载流子。它们在 PN 结处的内电场作用下作定向运动，形成光电流。光的照度越大，光电流越大。如果在外电路上接上负载，负载上就获得了电信号。因此光电二极管在不受光照射时处于截止状态，受光照射时处于导通状态。

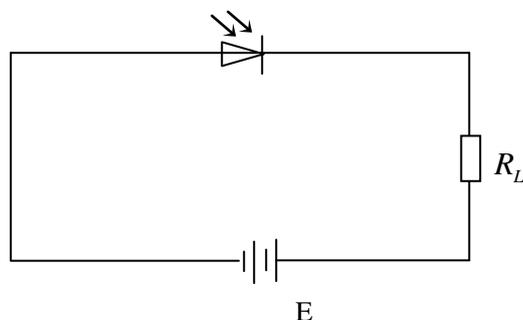


图 2.2 光电二极管反向工作状态

随着光电子技术的发展，光信号在探测灵敏度、光谱响应范围及频率特性等方面的要求越来越高，为此，近年来出现了许多性能优良的光伏探测器，如硅、锗光电二极管、PIN 光电二极管、雪崩光电二极管（APD）等。

光电二极管目前多采用硅和锗制成，但锗器件暗电流温度系数远大于硅器件，工艺也不如硅器件成熟，虽然它的响应波长大于硅器件，但实际应用尚不及后者广泛。下面着重介绍硅光电二极管的结构。

普通 PN 接硅光电二极管存在表面漏电流，为了减小表面漏电流，在器件的 SiO_2 表面保护层中间扩散一个环形 PN 结，该环形结称为环极。在有环极的硅光电二极管中，通常有三根引出线：环极、前极和后极。通常环极接电源正极，后极接电源负极，前极通过负载接电源正极，如图 2.3。由于环极电位高于前极，在环极形成阻挡层阻止表面漏电流流过，可使得负载的漏电流很小（小于 $0.05\mu A$ ）。若不使用环极也可将其断开作为空脚。

硅光电二极管的封装可采用平面镜和聚焦透镜作入射窗口。采用凸透镜有聚光作用，有利于提高灵敏度。由于聚焦位置与入射光方向有关，因此能够减小杂散背景光的干扰，但也引起灵敏度随入射光方向而变化。所以在实际使用中入射光的对准是值得注意的问题。采用平面镜作窗口，虽然没有对准问题但要受到背景杂散光的干扰，在具体使用时，视系统的要求而定。

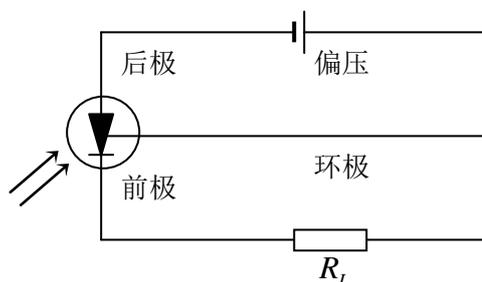


图 2.3 电极连接示意图

3. 光电二极管的基本特性:

(1) 伏安特性

光电二极管就是一个 p-n 结, 根据固体物理对 p-n 结的研究, 无光照时, p-n 结上的电压 U 和通过它的电流的伏安关系为

$$I = I_D(e^{qU/kT} - 1) \quad (1)$$

式中 I_D 为 p-n 结的反向饱和电流, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 为玻尔兹曼常数, T 为热力学温度, q 为电子电量。

有光照时, 产生光生电流 I_p

$$I_p = q\eta \frac{\Phi_{e,\lambda}}{h\nu} \quad (2)$$

式中 η 为量子效率, $\Phi_{e,\lambda}$ 为辐功率。

这两部分电流方向相同, 则总电流 I 为

$$I = I_D(e^{qU/kT} - 1) + I_p \quad (3)$$

下图表示光照 p-n 结的伏安特性,

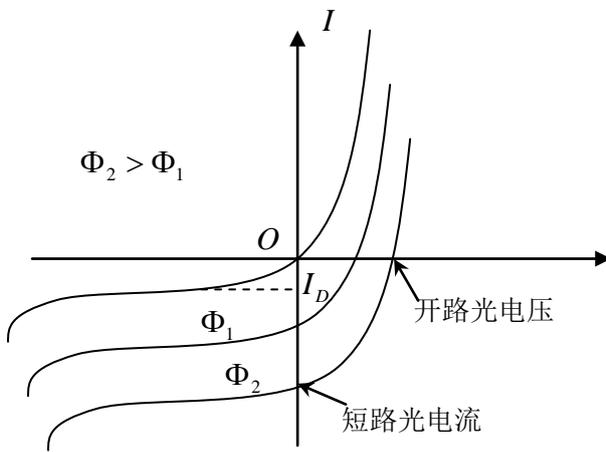


图 2.4 p-n 结的伏安特性

有光照时, 相对于无光照曲线向下平移, 光照越强, 曲线越往下平移, 光电流越大。图中第一象限为 p-n 结加正向偏压状态, 此时 p-n 结暗电流 I_D 远大于光生电流, 作为探测器工作在这个区域是没有意义的。第三象限为 p-n 结加反偏压状态, 此时 p-n 结暗电流数值很小, 远小于光生电流 I_p , 光伏探测器输出的总电流 $I \approx I_p$, 光伏探测器多工作在这个区域。

由图可见, 在低反压下电流随电压变化比较明显, 这是因为反向偏压增加使耗尽层加宽, 结电场增强, 使结区光的吸收率和光生载流子的收集效率增大。当反向偏压进一步增加, 光生载流子的收集已达到极限, 光电流趋于饱和。这时, 光电流与外加反向偏压几乎无关, 而仅取决于入射光功率。

图中还标注了开路电压和短路电流的定义。由式 (3) 可以求得光伏探测器的输出电压

$$U = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_p - I}{I_D} - 1\right) \quad (4)$$

在 p-n 结开路时(即外负载电阻 $R_L \rightarrow \infty$), 光伏探测器的输出电压称为开路电压 U_{oc} , 这时经外回路负载 R_L 上的总电流 $I = 0$, 在式 (4) 中, 将 $I = 0$ 代入, 可得开路电压的表达式

$$U_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_p}{I_D} - 1\right) \quad (5)$$

若将 p-n 结短路 (即 $U = 0$), 由式 (2) 可得短路电流 I_{sc} 为

$$I_{sc} = I_p = \frac{q\eta}{h\nu} \Phi_{e,\lambda} \quad (6)$$

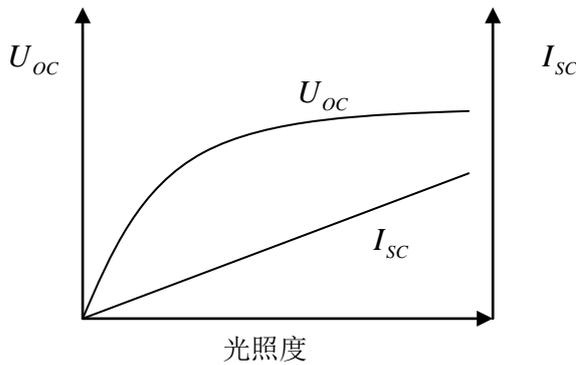


图 2.5 U_{oc} 和 I_{sc} 随光强变化曲线

U_{oc} 和 I_{sc} 是光伏探测器的两个重要参数, 其数值可以从伏安特性曲线上得到; 由式 (5)、(6) 可看出, 两者都随光强增大而增大, 但 I_{sc} 随光强增大线性上升, 而 U_{oc} 则按对数规律增加, 如下图所示。

(2) 光谱特性

光伏探测器对不同波长的光的灵敏度是不同的, 这是因为光子的能量 $hf = \frac{c}{\lambda}$ 必须大于或等于禁带宽度 E_g , 光子才能被吸收产生电子-空穴对, 不同半导体材料具有不同的 E_g , 因此对光的波长具有选择性, 除与材料有关外, 还与具体结构有关。下图给出了硅、锗材料光电二极管的光谱响应特性, 硅光电二极管最佳响应波长在 $0.8 \sim 1.0 \mu m$; 锗材料能响应到 $1.7 \mu m$ 。图

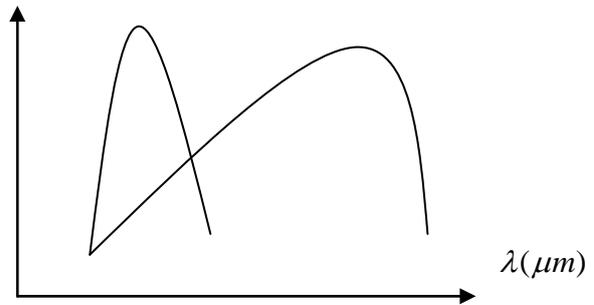


图 2.6 硅、锗材料光电二极管光谱响应曲线

b 显示了由硅、硒材料制成的光电池的光谱响应特性曲线。

(3) 光照特性

光电二极管在一定负偏压下，当入射光的强度发生变化时，通过光电二极管的电流随之变化，在较小负载电阻下，光电流和照度成线性关系。如右图所示。

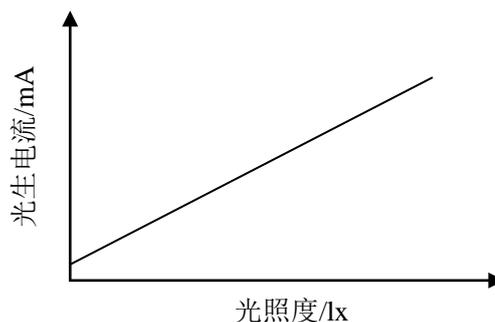


图 2.7 光电二极管光照特性曲线

(4) 暗电流

当没有光照时，光电二极管的反向饱和电流称为暗电流。

实验步骤如下：

1、光电二极管反向伏安特性的测量

实验装置原理框图如图 2.8 所示。

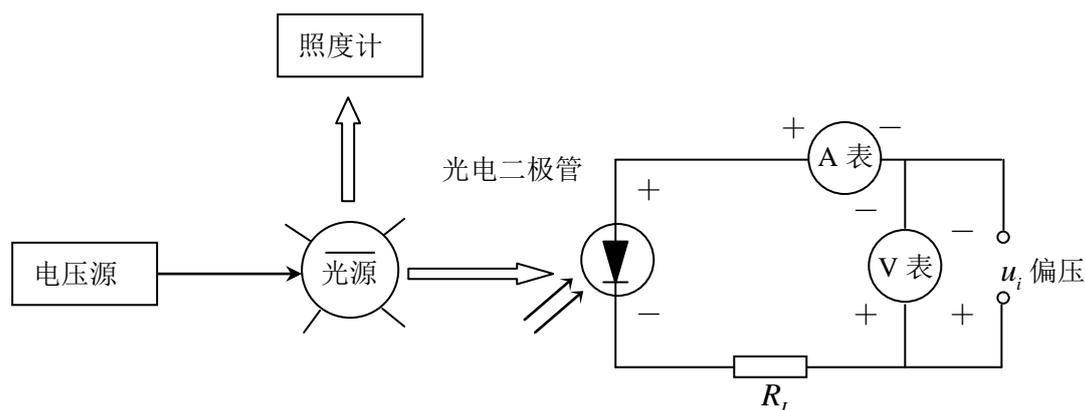


图 2.8 实验装置原理框图

(1) 负载 R_L 选择 $R_{L1} = 2.4K$ 。将“光电二极管偏置电压输入+”端与电流表“+”端用导线连接，电流表“—”端与 R_{L1} 任一端连接， R_{L1} 另一端与“光电二极管偏置电压输入—”端相连，此时光电二极管偏压为零。

(2) 电流表档位调节至 $20\mu A$ 档，“光照度调节”旋钮逆时针调节至最小值位置。打开电源开关，顺时针调节该旋钮，使照度值为 $50lx$ ，记下此时电流表读数。关闭电源，拆掉电流表“—”端与 R_{L1} 之间的连线。

(3) 电压表调到 $20V$ 档，“幅度调节”旋钮逆时针调至最小值位置。将“直流电源 $0\sim 12V$ ”端与 R_{L1} 连接，将“直流电源”另一端（接地端）与电流表“—”端连接。再将电压表“+”

端与“直流电源 0~12V”端连接，“直流电源”接地端与电压表“-”端相连。

(4) 打开电源开关，调节“幅度调节”旋钮，直至电压表显示为 2.00V 为止，记下光电二极管所加反向偏压为 2V 时电流表的读数。

(5) 重复步骤 4，分别记下反向偏压为 4V、6V、8V 和 10V 时的电流表读数，关闭电源。

(6) 重复上述步骤。分别测量光电二极管在 100lx、200lx 和 300lx 照度下，不同偏压下的光生电流值，并分别作出伏安特性曲线。比较四条伏安特性曲线有什么不同。

(7) 实验完毕，拆除所有连线。将“幅度调节”和“光照度调节”旋钮都逆时针旋到底。

电流 照度	偏压	-2	-4	-6	-8	-10
50lx						
100lx						
200lx						
300lx						

2、光电二极管在-6V 偏压下光照特性测量

(1) 照上图连接线路，负载 R_L 选择 $R_{L1} = 2.4k\Omega$ ，电流表档位调节至 $20\mu A$ 档。

(2) 调节“幅度调节”旋钮，使电压表指示为 6 伏。

(3) 将光源、照度计、光电二极管插入实验箱相应孔中。

(4) 将“光照度调节”旋钮逆时针调节至最小值，测-6V 偏压下的电流，即为暗电流。

(5) 分别测出光照度为 25lx、50lx、100lx、150lx、200lx、250lx、300lx 时的电流值。

(6) 绘出光电二极管的光照特性曲线。

光照度 (lx)	0	25	50	100	150	200	250	300
电流 (μA)								

五. 实验报告

1. 根据实验测试记录，在坐标纸上画出各伏安特性曲线图和光照特性曲线，并分析实验现象。
2. 分析并比较四条伏安特性曲线的区别，分析区别产生的原因。

实验3 LD/LED的P-I-U特性曲线测试

一. 实验目的

1. 通过测量 LD 半导体激光器阈值电流、LED 发光二极管和 LD 半导体激光器的输出功率-电流 (P-I) 特性曲线和电压-电流(U-I)特性曲线。
2. 计算阈值电流 (I_{th}) 和外微分量子效率。
3. 对 LED 发光二极管和 LD 半导体激光器工作特性有个基本了解。

二. 实验仪器设备

- 1、YSLD3125 型半导体激光二极管 (带尾纤出, FC 型接口)
- 2、YSLED3215 型发光二极管
- 3、ZY606LD/LED 电流源
- 4、光功率计
- 5、万用表

三. 实验要求

1. 预习教材中的相关内容。
2. 阅读并熟悉本次实验的内容。
3. 设计并正确连接电路。
4. 测量并记录实验数据。
5. 实验结束将仪器归位。

四. 实验任务

1、激光器一般知识

激光器是使工作物质实现粒子数反转分布产生受激辐射，再利用谐振腔的正反馈，实现光放大而产生激光振荡的。激光，其英文 LASER 就是 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (受激辐射的光放大) 的缩写。

激光的本质是相干辐射与工作物质的原子相互作用的结果。尽管实际原子的能级是非常复杂的，但与产生激光直接相关的主要是两个能级，设 E_U 表示较高能级， E_L 表示较低能

级。原子能在高低能级间跃迁，在没有外界影响时，原子可自发的从高能级跃迁到低能级，并伴随辐射一个频率为

$$\nu = (E_u - E_l)/h$$

的光子，这过程称为自发辐射。

若有能量为 $h\nu \geq E_u - E_l$ 的光子作用于原子，会产生两个过程，一是原子吸收光子能量从低能级跃迁到高能级，同时在低能级产生一个空穴，称为受激跃迁或受激吸收，此激发光子消失；二是原子在激发光子的刺激下，从高能级跃迁到低能级，并伴随辐射一个频率

$$\nu = (E_u - E_l)/h$$

的光子，这过程称为受激辐射。

受激辐射激发光子不消失，而产生新光子，光子增加，而且产生的新光子与激发光子具有相同的频率、相位和偏振态，并沿相同的方向传播，具有很好的相干性，这正是我们所需要的。

受激辐射和受激吸收总是同时存在的，如果受激吸收超过受激辐射，则光子数的减少多于增加，总的效果是入射光被衰减；反之，如果受激辐射超过受激吸收，则入射光被放大。实现受激辐射超过受激吸收的关键是维持工作物质的原子粒子数反转分布。所谓粒子数反转分布就是工作物质中处于高能级的原子多于处于低能级的原子。所以原子的粒子数反转分布是产生激光的必要条件。

实现粒子数反转可以使受激辐射超过受激吸收，光在工作介质中得到放大，产生激光。但工作介质的增益都不足够大，若使光单次通过工作介质而要产生较强的光，就需要很长的物质，实际上这是十分困难，甚至是不可能的。于是就想到了用光学谐振腔进行光放大。所谓光学谐振腔，实际上是在激光器两端，面对面地装两块反射镜，如下图所示：

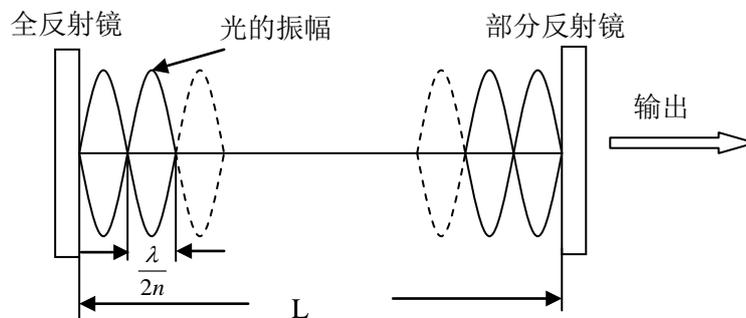


图 3.1 光学谐振腔结构图

一块几乎全反射，一块为部分反射，激光可透过部分反射镜射出。被反射回到工作介质的光，可在工作介质中多次往返，设往返次数为 m ，则有效长度为：

$$L_{\text{eff}} = 2mL \quad (m=1, 2, 3, 4\dots)$$

L 为工作介质的实际长度。

由于谐振腔内工作介质存在吸收，反射镜存在透射和散射，而且只有沿轴线方向的光才被放大，因此光受到一定损耗，当增益和损耗相当时，在谐振腔内建立起稳定的激光振荡。即一个激光器， m 有一个确定的值。

谐振腔的另一个作用是选模，光在谐振腔内反射时，反射波将和入射波发生干涉，为了能在腔内形成稳定的振荡，必须满足相干相长的条件，也就是沿腔的纵向（轴线方向）形成驻波的条件，这个条件是：

$$L = q \frac{\lambda}{2n} \text{ 或 } \lambda = \frac{2nL}{q}$$

式中， λ 为波长， n 是工作介质的折射率， $q=1, 2, 3, 4, \dots$ ，为某一整数，为驻波波幅的个数，它表征了腔内纵向光场的分布，称为激光的纵模， $q=1$ 称为单纵模激光器， $q \geq 2$ 称为多纵模激光器。每个驻波的频率是不一样的，第 q 个驻波的频率：

$$\nu_q = q \frac{c}{2L}$$

以上两式都说明，虽然由于导带和价带是由许多连续能级组成的有一定宽度的能带，两个能带中不同能级之间电子的跃迁会产生许多不同波长的光波，但只有符合激光振荡的相位条件的那些波长存在，不符合激光振荡的相位条件的那些波长的光将衰减掉，这些波长取决于激光器工作物质的纵向长度 L 。

多纵模激光器输出 q 个波长的光，但幅度不一样，幅度最大的称为主模，其余的称为边模。

2、半导体激光器的结构

半导体是由大量原子周期性有序排列构成的共价晶体，由于邻近原子的作用，电子所处的能态扩展成能级连续分布的能带，如下图（a）所示，能量低的能带称为价带，能量高的能带称为导带，导带底的能量 E_u 和价带顶的能量 E_l 之间的能量差 $E_u - E_l = E_g$ 称为禁带宽度或带隙，不同的半导体材料有不同的带隙。本征半导体中导带和价带被电子和空穴占据的几率是相同的，N 型半导体导带被电子占据的几率大，P 型半导体价带被空穴占据的几率

大。如下图 (b)、(c)所示。

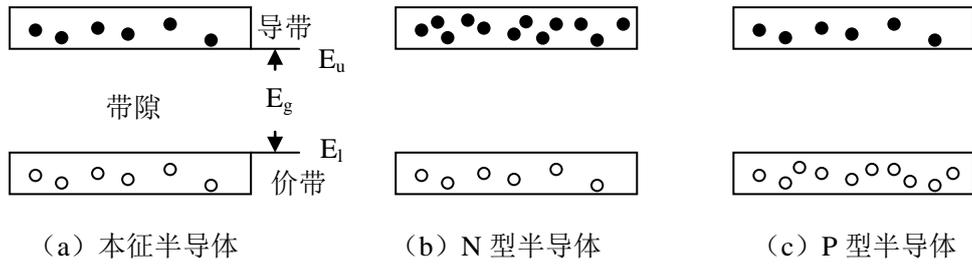


图 3.2 半导体激光器的电子和空穴分布

半导体激光器的结构多种多样，基本结构是下图所示的双异质结平面条形结构。这种结构由三层不同类型半导体材料构成，中间层通常为厚度为 $0.1 \sim 0.3\mu\text{m}$ 的窄带隙 P 型半导体，称为有源层，作为工作介质，两侧分别为具有较宽带隙的 N 型和 P 型半导体，称为限制层。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。有源层与右侧的 N 层之间形成的是 P-N 异质结，而与左侧的 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，简称 DH 结构。

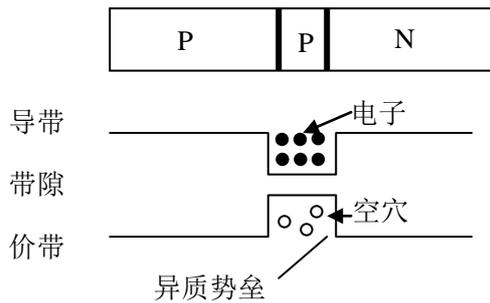


图 3.3 半导体激光器的基本结构

施加正向偏压后，就能使右侧的 N 层向有源层注入电子，左侧的 P 层向有源层注入空穴，但由于左侧的 P 层带隙宽，导带的能态比有源层高，对注入电子形成势垒，注入到有源层的电子不可能扩散到 P 层，同理，注入到有源层的空穴也不可能扩散到 N 层。这样，注入到有源层的电子和空穴被限制在 $0.1 \sim 0.3\mu\text{m}$ 的有源层内，形成了粒子数的反转分布。

前后两个晶体解理面作为反射镜构成谐振腔。

给半导体激光器施加正向偏压，即注入电流是维持有源层介质的原子永远保持粒子数的反转分布，自发辐射产生的光子作为激发光子诱发受激辐射，受激辐射产生的更多新光子作为新的激发光子诱发更强的受激辐射。

3、半导体激光器的主要特性

(1) 输出电压特性

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 U-I 特性曲线，如下图所示：

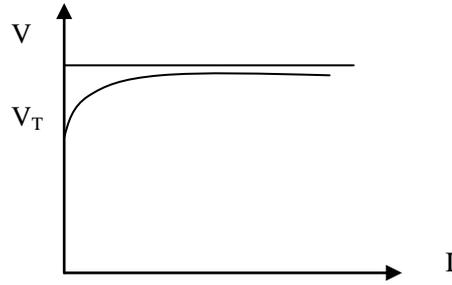


图 3.4 激光器输出 V-I 特性曲

由 U-I 曲线我们可以计算出 LD/LED 总的串联电阻 R 和开门电压 U_T 。

(2) 输出光功率特性

激光器光功率特性通常用输出光功率与激励电流 I 的关系曲线，即 P-I 曲线表示。

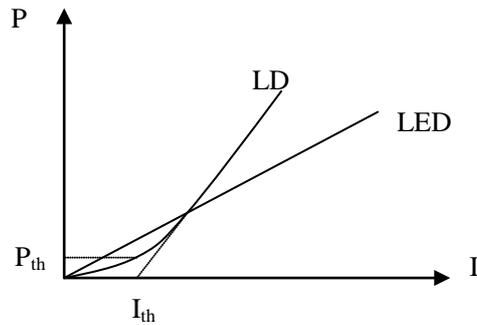


图 3.5 LD/LED 的 P-I 特性曲线

在结构上，由于 LED 与 LD 相比没有光学谐振腔。因此，LD 和 LED 的功率-电流关系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。从图 5 中可以看出 LD 的 P-I 曲线有一阈值电流 I_{th} ，只有在工作电流 $I_f > I_{th}$ 部分，P-I 曲线才近似一根直线。而在 $I_f < I_{th}$ 部分，LD 输出的光功率几乎为零。

给半导体激光器注入电流，就是给激光器有源层半导体工作介质注入能量，对价带上的载流子（电子）进行激发，当注入电流较小时，导带和价带间载流子不能形成反转分布，这时从导带上跃迁到价带上的载流子主要以自发辐射为主，产生的是荧光，即非相干光。当注入电流达到一定值时，导带和价带间载流子才能形成反转分布，产生受激辐射，激光器才有激光（即相干光）输出，这个一定值成为阈值电流。阈值电流以后，随着注入电流的增大，导带和价带间粒子数差值增大，激光增益系数增大，输出功率增加，并与注入电流近似成线性关系，如下式所示：

$$P = P_{th} + (I_f - I_{th}) \cdot \frac{\eta_D hf}{e}$$

式中 I_f 为注入电流， $h = 6.628 \times 10^{-34} J \cdot s$ 为普朗克常数， $f = \frac{c}{\lambda}$ 为入射光频率， $c = 3.0 \times 10^8 m/s$ 为光速， λ 为入射光波长， e 为电子电量， η_D 为外微分量子效率， I_{th} 为阈值电流， P_{th} 为阈值功率。

根据 P-I 曲线可以求出激光器的阈值电流 I_{th} 和外微分量子效率 η_D ：将 P-I 曲线的线性部分作直线与横坐标相交，交点处的电流即为激光器的阈值电流；曲线线性部分的斜率为 $\frac{\eta_D hf}{e}$ ，由曲线求得斜率，可计算 η_D

实验注意事项：

(1) 通电之前，电流源确保“粗调”“细调”旋钮在最小值位置。这样可防止冲击电流损坏 LD。

(2) 确认 LD 或 LED 已经插接良好后，打开电源开关。此时电源输出为零，LD 或 LED 尚未发光。

(3) 恒功测量：将切换开关拨到恒功档，顺时针缓慢调节输出功率“粗调”旋钮，LD 射出激光。改调“细调”旋钮，可将 LD 输出调至要求的数值（用一台光功率计来测量 LD 的输出功率）。通过 I_{op} 显示窗口可以读出输出电流值，通过 I_m 显示窗口可以读出探测电流值。

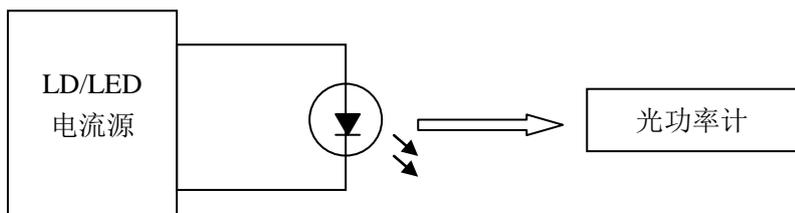
注意：LED 内部没有探测器，故不能用恒功档测试，只能用恒流档进行测试。

(4) 恒流测量：将切换开关拨到恒流档，该方式下“细调”旋钮无效， I_m 窗口显示读数无效。只需要调节输出功率“粗调”旋钮即可，通过 I_{op} 显示窗口可以读出输出电流值。

实验步骤如下：

激光器测试实验装置如下

1、按图连接线路，连接图如下。



2、因 YSLD3125 型半导体激光器为 Pointer 型，将电流源“DVD、Pointer”管切换钮置于 Pointer，恒功恒流切换置于恒功，“粗调”和“细调”置于最小。开启电流源，缓慢调

节电流旋钮使电流由 $0mA$ 逐渐增加到 $18mA$ ，每隔 $3mA$ 记录 LD 的电压值和光功率值，绘制 P-I 曲线和 U-I 曲线。切记电流最大不能超过 $40mA$ ，否则会损坏激光器!! 注意：LD 为静电敏感元件，因此操作者不要用手直接接触激光器引脚以及与引脚连接的任何测试点和线路，以免损坏激光器。

表 1 LD 的 P-I-U 实验测试数据

I (mA)	0	3	6	9	12	15	18
U (V)							
P (μW)							

3、开启 LED 的驱动电源（恒流档测量），缓慢调节“粗调”旋钮逐渐增加工作电流，使电流由 $0mA$ 逐渐增大到 $30mA$ ，每隔 $5mA$ 记录 LED 的电压值和光功率值。绘制 LED 的 P-I 曲线和 U-I 曲线。

表 2 LED 的 P-I-U 实验测试数据

I (mA)	0	5	10	15	20	25	30
U (V)							
P (μW)							

4、通过 P-I 曲线的线性部分作直流与横坐标相交，交点处的电流值即为激光器的阈值电流，计算外微分量子效率 η_D 。

注意：插拔激光器之前，务必先把输出功率“粗调”旋钮调到最小，然后关闭电源开关，这是因为带电插拔 LD 会造成 LD 的劣化。

五. 实验报告

1. 在坐标纸上作出 YSLED3215 型发光二极管的 U-I 曲线和 P-I 曲线。
2. 在坐标纸上做出 YESLD3125 型半导体激光器的 U-I 曲线和 P-I 曲线，并确定出阈值电流和外微分量子效率。
3. 回答串联电阻 R 对于 LD/LED 的应用性能有何影响？

4. 为什么 LD/LED 的输出特性有较大差异?