

光电探测原理实验

[实验目的]

- 1、了解光照度基本知识、光照度测量基本原理，学会光照度的测量方法。
- 2、了解光电二极管和光电池的工作原理和使用方法
- 3、掌握光电二极管和光电池的光照特性及其测试方法
- 4、理解光电二极管和光电池的的伏安特性并掌握其测试方法

[实验仪器]

- 1、光电探测原理实验箱
- 2、光照度计
- 3、光电二极管和光电池
- 4、光源

[实验原理]

1、光照度基本知识

(1) 光照度是光度计量的主要参数之一，而光度计量是光学计量最基本的部分。光度量是限于人眼能够见到的一部分辐射量，是通过人眼的视觉效果去衡量的，人眼的视觉效果对各种波长是不同的，通常用 $V(\lambda)$ 表示，定义为人眼视觉函数或光谱光视效率。因此，光照度不是一个纯粹的物理量，而是一个与人眼视觉有关的生理、心理物理量。

光照度是单位面积上接收的光通量，因而可以导出：由一个发光强度 I 的点光源，在相距 L 处的平面上产生的光照度与这个光源的发光强度成正比，与距离的平方成反比，即：

$$E = I / L^2$$

式中：E——光照度，单位为 Lx ；

I——光源发光强度，单位为 cd ；

L——距离，单位为 m 。

(2) 光照度计的结构

光照度计是用来测量照度的仪器，它的结构原理如图 1.1。

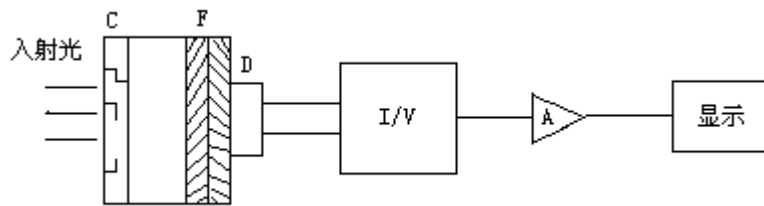


图 1 光照度计结构图

图中 D 为光探测器，图 1.2 为典型的硅光探测器的相对光谱响应曲线；C 为余弦校正器，在光照度测量中，被测面上的光不可能都来自垂直方向，因此照度计必须进行余弦修正，使光探测器不同角度上的光度响应满足余弦关系。余弦校正器使用的是一种漫透射材料，当入射光不论以什么角度射在漫透射材料上时，光探测器接收到的始终是漫射光。余弦校正器的透光性要好；F 为 $V(\lambda)$ 校正器，在光照度测量中，除了希望光探测器有较高的灵敏度、较低的噪声、较宽的线性范围和较快的响应时间等外，还要求相对光谱响应符合视觉函数 $V(\lambda)$ ，而通常光探测器的光谱响应度与之相差甚远，因此需要进行 $V(\lambda)$ 匹配。匹配基本上都是通过给光探测器加适当的滤光片（ $V(\lambda)$ 滤光片）来实现的，满足条件的滤光片往往需要不同型号和厚度的几片颜色玻璃组合来实现匹配。当 D 接收到通过 C 和 F 的光辐射时，所产生的光电信号，首先经过 I/V 变换，然后经过运算放大器 A 放大，最后在显示器上显示出相应的信号定标后就是照度值。

（3）照度测量的误差因素

- 1) 照度计相对光谱响应度与 $V(\lambda)$ 的偏离引起的误差。
- 2) 接收器线性：也就是说接收器的响应度在整个指定输出范围内为常数。
- 3) 疲劳特性：疲劳是照度计在恒定的工作条件下，由投射照度引起的响应度可逆的暂时的变化。
- 4) 照度计的方向性响应。
- 5) 由于量程改变产生的误差：这个误差是照度计的开关从一个量程变到邻近量程所产生的系统误差。
- 6) 温度依赖性：温度依赖性是用环境温度对照度头绝对响应度和相对光谱响应度的影响来表征。
- 7) 偏振依赖性：照度计的输出信号还依赖于光源的偏振状态。
- 8) 照度头接收面受非均匀照明的影响。

2、光生伏特效应和光伏探测器的原理

光生伏特效应对应是光照使半导体产生光生电子和空穴，这些电子和空穴在某

种“力”的作用下向相反的方向移动和积聚而产生电位差的现象。使电子和空穴向相反的方向移动的“力”可以是同质半导体由于不同的掺杂形成的 p—n 结、不同质的半导体组成的异质结或金属和同质半导体接触形成的肖特基结的内建电场，也可以是磁场等。下面以 p—n 结为例说明光生伏特效应的原理。其原理如下图所示

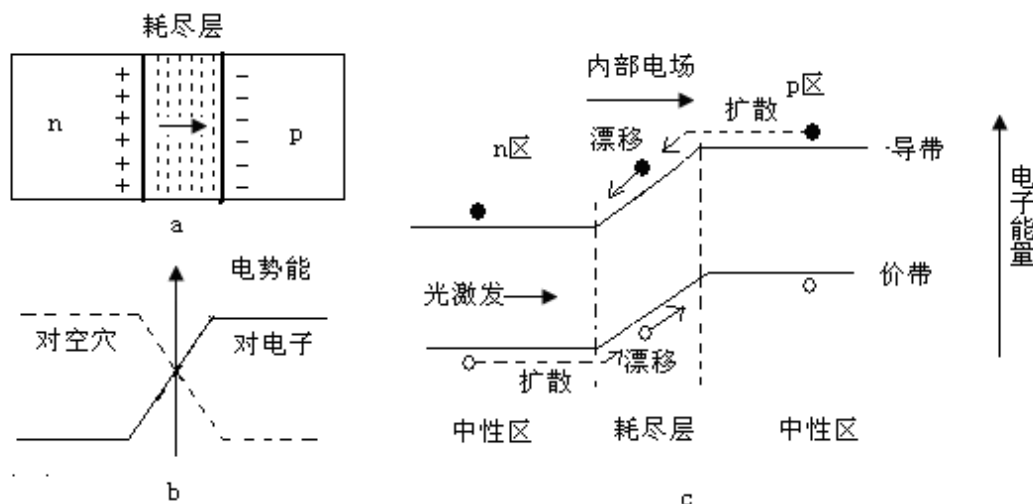


图2 光生伏特效应原理图

如图a所示，未光照时，P区的多数载流子空穴和n区的多数载流子电子，由于浓度差会向对方扩散，结果在接触面附近形成正负离子组成的空间电荷层及相应的由n区指向P区的内建电场，该电场阻止两边的载流子的扩散，但使电子和空穴产生与扩散运动方向相反的漂移运动，最后达到热平衡，形成一个稳定的内建电场 $E_{内}$ 。内建电场存在的区域称作耗尽层。从能量的角度看，内建电场 $E_{内}$ 在耗尽层形成一个势垒，电子在n区具有较低的势能，在P区具有较高的势能，空穴则相反，如图b所示，最终使能带发生倾斜。n区的电子和P区的空穴要想从一区进入另一区都需要提供能量。

当有入射光作用时，如果光子的能量大于或等于带隙 ($hf \geq E_g$)，在耗尽层区、n区和P区都会发生受激吸收，即价带的电子吸收光子的能量跃迁到导带形成光生电子--空穴对。若电子--空穴对在耗尽层内，由于内部电场的作用，电子向N区运动，空穴向P区运动，形成漂移电流。若电子--空穴对在耗尽层两侧没有电场的中性区，由于热运动，部分光生电子和空穴通过扩散运动可能进入耗尽层，然后在电场的作用下，形成与漂移电流相同方向的电流，称为扩散电流。漂移电流和扩散电流的总和即为光生电流。若外电路开路，则光生的电子和空穴分别在N区和P区积累，形成电动势，这就是光生伏特效应。若外电路闭合，N

区过剩的电子通过外电路流向 P 区，同样，P 区的空穴流向 N 区，便形成了光生电流。当入射光变化时，光生电流随之变化，从而将光信号转换成电信号。

这种由 PN 结构成，在入射光作用下，由于受激吸收过程产生的电子--空穴对的运动，在闭合电路中形成光生电流的器件，就是简单的光电二极管（PD）。

这种简单的光电二极管（PD），由于 PN 结耗尽层只有几微米，大部分光入射光被中性区吸收，中性区内的电子和空穴是靠扩散运动形成电流的，一方面它形成电流的几率小，即转换效率低，另一方面响应速度也慢。为了改善这种情况，使用 PD 管时，总是施加适当的反向偏压，即 N 区加正电压，P 区加负电压，外加电压与内部电场方向相同，从而增大了耗尽层宽度，减小了中性区的宽度，从而提高了转换效率和响应速度。

利用光伏效应制作的光伏探测器种类繁多，如普通光电二极管（PD）、PIN 光电二极管、雪崩光电二极管（APD）、光电三极管、异质结光电二极管、金属—半导体光电二极管、量子阱光探测器等。本实验只讨论普通光电二极管（PD）和光电池。

3、光电二极管的结构和特性参数

（一）光电二极管的结构

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的多，而且通常都以扩散层作为受光面，因此，受光面上的电极做的很小。为了提高光电转换能力，PN 结的深度较普通二极管浅。图 3 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）。

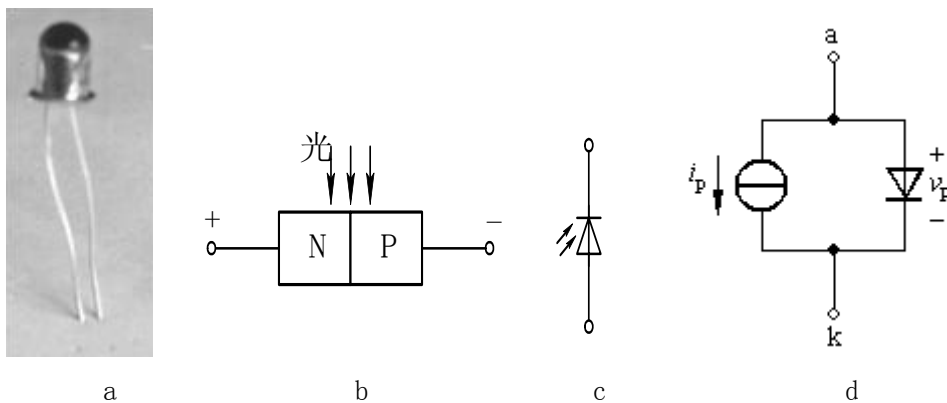


图 3 光电二极管

光电二极管在电路中一般是处于反向工作状态，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。

（二）光电二极管的特性参数

这里仅就与实验有关的参数简单说明。

（1）伏安特性

光电二极管（PD）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 V 和通过它的电流的伏安关系为

$$I_D = I_{SO} (e^{qV/KT} - 1) \quad (1)$$

式中 I_{SO} 为 p-n 结的反向饱和电流， $k = 1.381 \times 10^{-23} J/K$ 为波尔兹曼常数， T 为热力学温度， q 为电子电荷量。

有光照时，产生光生电流 I_s

$$I_s = q\eta \frac{P}{h\nu} \quad (2)$$

式中 η 为量子效率， P 为光功率。

这两部分电流方向相同，则总电流 I 为

$$I = I_{SO} (e^{qV/KT} - 1) + I_s \quad (3)$$

下图表示光照 P—N 结的伏安特性，

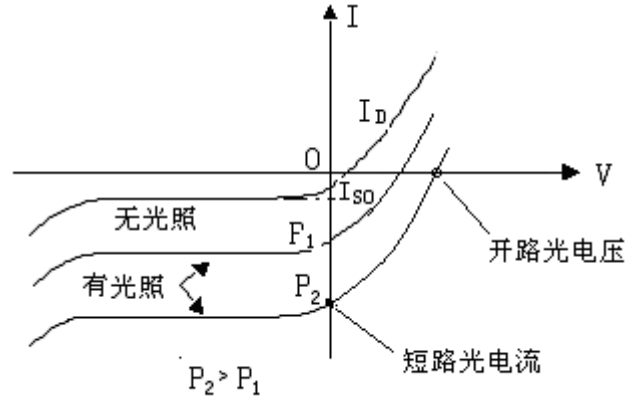


图 4 P-N 结的伏安特性

有光照时，相对于无光照曲线向下平移，光照越强，曲线愈往下平移，光电流越大。图中第一象限为P—N结加正偏压状态，此时P—N结暗电流 I_D 远大于光生电流，做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 $I_D=I_{SO}$ ，数值很小，远小于光生电流 I_S ，光伏探测器输出的总电流 $I = I_{SO} + I_S \approx I_S$ ，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。

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

$$V = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_S - I}{I_{SO}} - 1\right) \quad (4)$$

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 V_{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

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_S}{I_{OS}} - 1\right) \quad (5)$$

若将 P—N 短路（即 $V=0$ ），由式（2）可得短路电流 I_{SC} 为

$$I_{SC} = I_S = \frac{q\eta}{h\nu} P \quad (6)$$

V_{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 V_{oc} 则按对数规律增加，如下图所示。

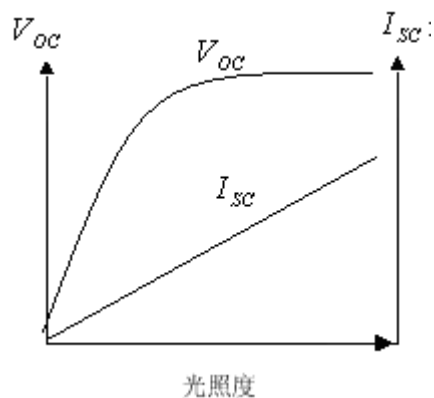


图 5 V_{oc} 和 I_{sc} 随光强变化曲线

（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 $hf = \frac{c}{\lambda}$ 必须大于或等于带隙 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 b 显示了由硅、硒材料制成的光电池的光谱响应特性曲线。

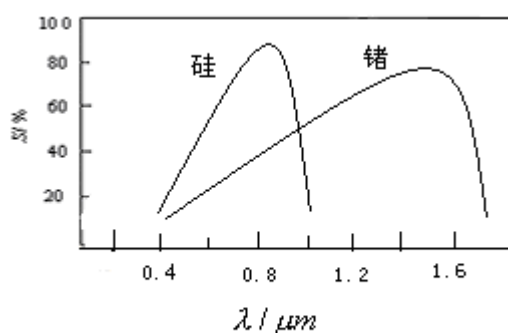
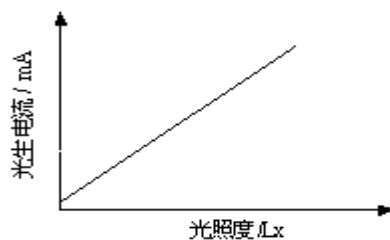


图 6 硅、锗材料光电二极管 光谱响应曲线

（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。如下图所示



(4) 暗电流

当没有光照射时，光电二极管的反向饱和电流 I_D 称为暗电流。

4、光电池的结构和特性参数

(一) 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”的，它实质上是一个大面积的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的禁带宽度，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4.1为硅光电池原理图。其中(a)结构示意图；(b)等效电路。

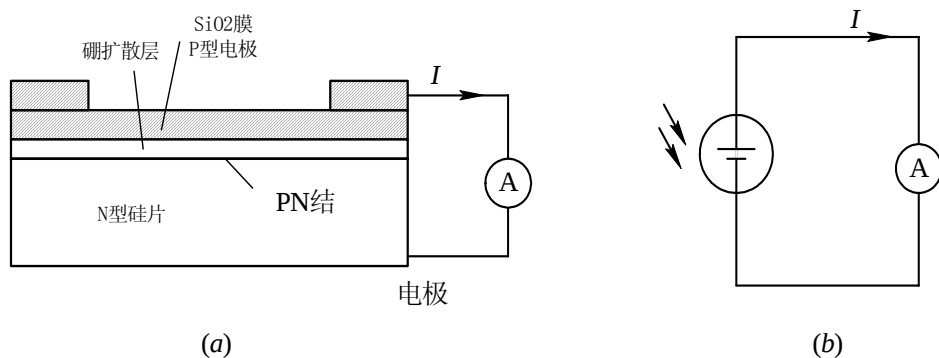


图 7 硅光电池原理图

(二) 光电池的特性参数

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 V_{oc} 和短开路电流 I_{sc} 随入射光强变化的规律，如下图所示。

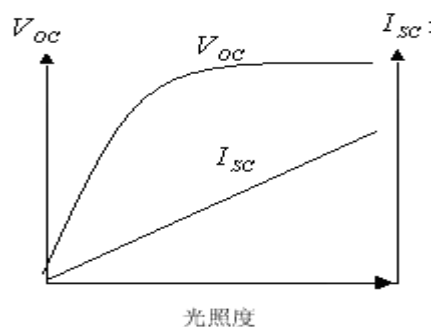
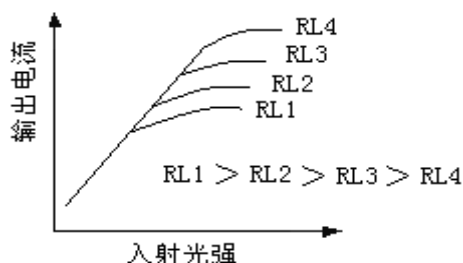


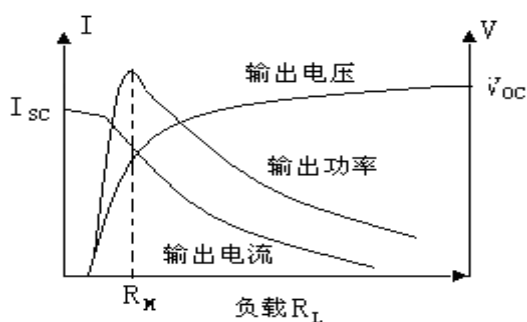
图8 光电池的光照特性曲线

V_{oc} 随入射光强按对数规律变化, I_{sc} 与入射光强成线性关系。

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 V_{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。

[实验内容]

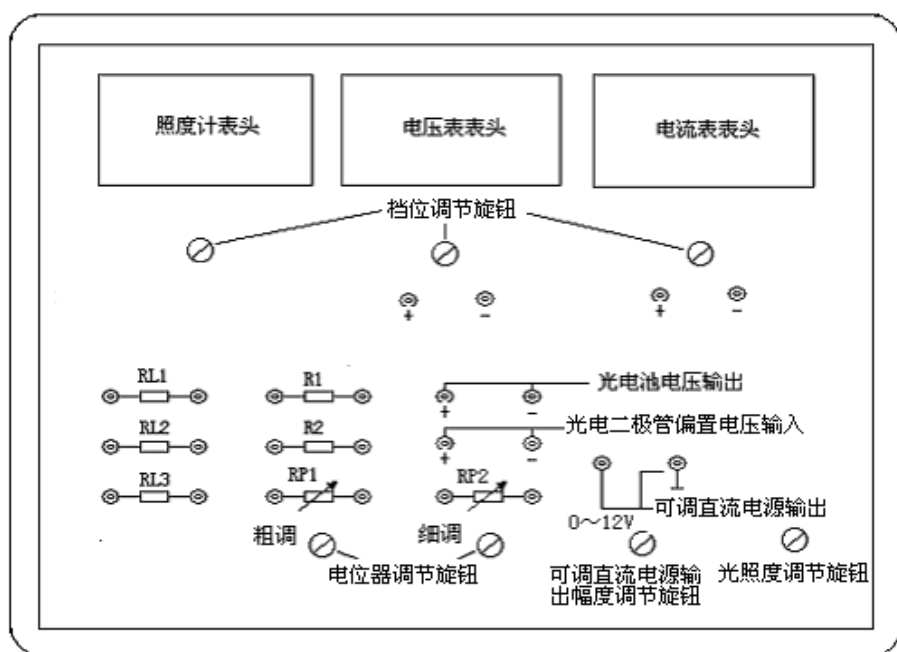
- 1、光电二极管和光电池的输出光电流与入射光的照度的关系测量。
- 2、光电二极管和光电池的伏安特性测试。
- 3、光电二极管和光电池的暗电流测试。

[仪器简介]

所用主要仪器为光电探测原理实验箱，实验箱配备有 0~12V 可调的直流电压源，可为光电二极管提供可以调节的偏置电压、 $20L_x$ ~2000 L_x 照度计用来测量照度、200mV~20V 电压表和 20 μ A~200mA 电流表、亮度可调 12V/5W 的卤素灯作为光源、探测器为通光口径 $\Phi 5$ 的硅光电二极管和光敏直径为 $\Phi 6$ 的光电池。各表头显示单元和各种调节单元都放在面板上，而光源、照度计探头、硅光电池和硅光电二极管均在箱外，可用引线连接到面板上，面板上还配有电阻 RL1、RL2、RL3、R1 和 R2，阻值分别为 2.4 K Ω 、5.6 K Ω 、10 K Ω 、51K Ω 和 100 K Ω ，可供光电池和光电二极管作为负载。

实验箱还配备 10K 粗调电位器 RP1 和 47K 多圈精密细调电位器 RP2，可供学生配合其它元件自己动手搭建实验之用。

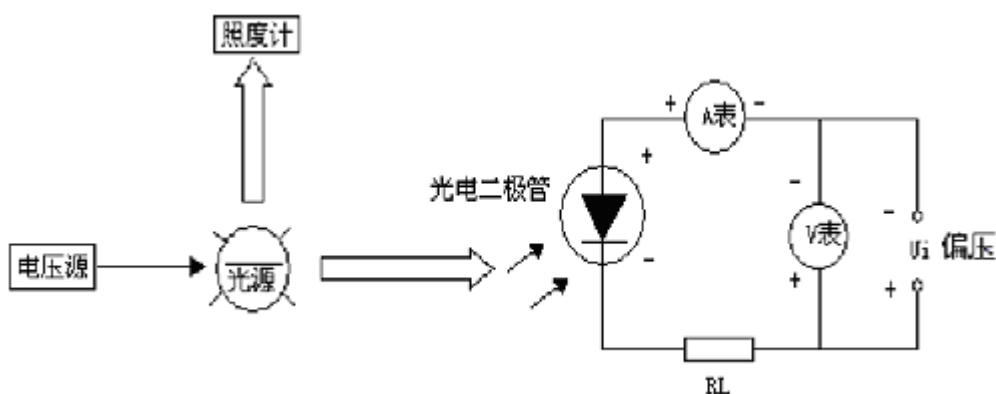
面板操作示意图：



[实验步骤]

- 1、光电二极管反向伏安特性的测量

实验原理框图如下：



(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，顺时针调节照度调节旋钮，使照度值为 $50Lx$ ，记录此时电流表读数。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 $0-12V$ ”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 $0-12V$ ”端相连，“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。

(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。

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，载 R_L 选择 $R_{L1}=2.4K$ ，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

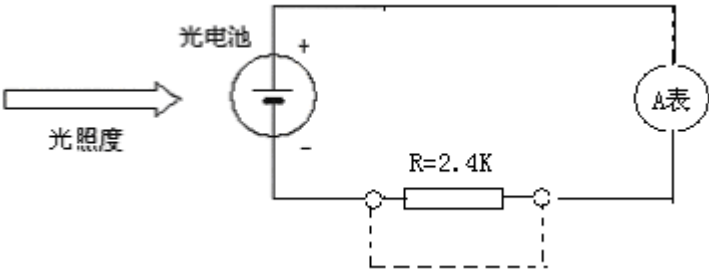
为暗电流值。

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

(6) 绘出光电二极管的光照特性曲线。

3、光电池照度—电流特性测试

实验原理框图如下图

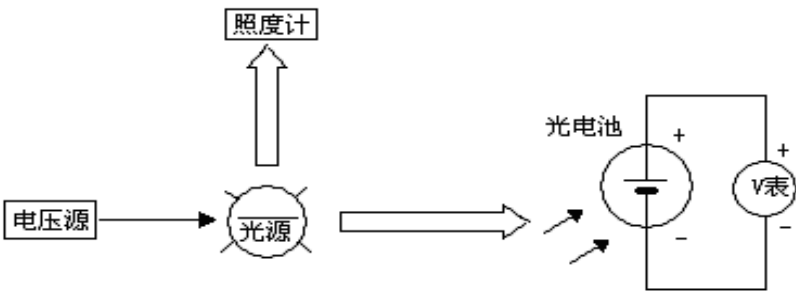


分别测出下表所示光照度和负载下的光生电流。作出光照度—电流特性曲线，并对曲线进行分析。

光照度 (Lx)		0	20	40	60	80	100	120	140	160
R=0	光 生 电 流 (μ A)									
R=2.4K	光 生 电 流 (μ A)									

4、光电池照度—电压特性测试

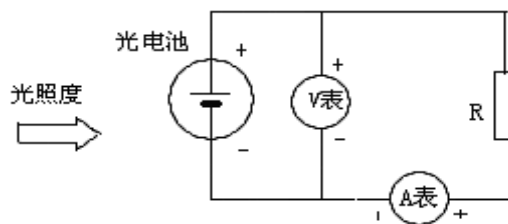
实验原理框图如下图



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)							

5、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 $200\mu\text{A}$ 档。

(2) 分别测出负载电阻 R 为下表所示值的电流和电压。

负载 (Ω)	0	2.4 K (RL1)	5.6 K (RL2)	10 K (RL3)	51 K (R1)	100 K (R2)
电流 (μA)						
电压 (mV)						

(2) 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。

(3) 光照度取 100Lx 、 200Lx 、 300Lx , 重复上述步骤。

(4) 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。

[实验报告要求]

- 1、分析光电二极管的光照特性, 根据实验测试记录, 在坐标纸上画出光电二极管 -6V 偏压下的照度—电流曲线图。
- 2、分析光电二极管的伏安特性, 根据实验测试记录, 在坐标纸上画出光电二极管反向伏安特性曲线。
- 3、根据实验测试记录, 在坐标纸上画出光电池的光照度—电流特性曲线图, 并分析实验现象。
- 4、根据实验测试记录, 在坐标纸上画出光电池的光照度—开路电压特性曲线图, 并分析实验现象。
- 5、根据实验测试记录, 在坐标纸上画出光电池的光生电流、光生电压随负载变化的曲线, 并分析实验现象。