

实验 7 光电探测实验—硅光电池特性测试

【实验目的】

- 1、学习掌握硅光电池的工作原理
- 2、学习掌握硅光电池的基本特性
- 3、掌握硅光电池基本特性测试方法
- 4、了解硅光电池的基本应用

【实验内容】

- 1、硅光电池短路电路测试实验
 - 2、硅光电池开路电压测试实验
 - 3、硅光电池光电特性测试实验
 - 4、硅光电池伏安特性测试实验
 - 5、硅光电池负载特性测试实验
 - 6、硅光电池光谱特性测试实验
- 设计实验 1：MPPT 设计实验（PWM 控制器）

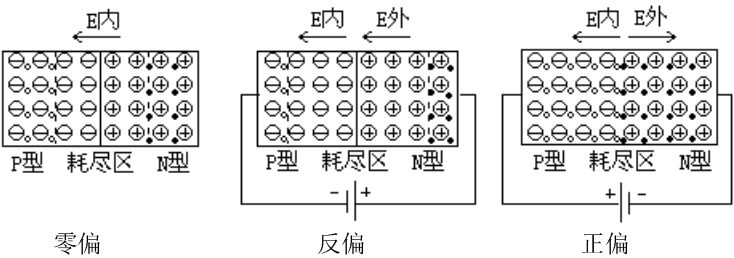
【实验仪器】

- | | |
|---------------|----------|
| 1、光电探测器特性测试平台 | 1 套 |
| 2、光通路组件 | 1 只 |
| 3、示波器 | 1 台 |
| 4、三相电源线 | 1 根 |
| 5、实验线材 | （红、黑各若干） |

【实验原理】

1、硅光电池的基本结构

目前半导体光电探测器在数码摄像、光通信、太阳电池等领域得到广泛应用，硅光电池是半导体光电探测器的一个基本单元，深刻理解硅光电池的工作原理和具体使用特性可以进一步领会半导体 PN 结原理、光电效应理论和光伏电池产生机理。



1
图 7-1. 半导体 PN 结在零偏、反偏、正偏下的耗尽区

图 7-1 是半导体 PN 结在零偏、反偏、正偏下的耗尽区，当 P 型和 N 型半导体材料结合时，由于 P 型材料空穴多电子少，而 N 型材料电子多空穴少，结果 P 型材料中的空穴向 N 型材料这边扩散，N 型材料中的电子向 P 型材料这边扩散，扩散的结果使得结合区两侧的 P 型区出现负电荷，N 型区带正电荷，形成一个势垒，由此而产生的内电场将阻止扩散运动的继续进行，当两者达到平衡时，在 PN 结两侧形成一个耗尽区，耗尽区的特点是无自由载流子，呈现高阻抗。当 PN 结反偏时，外加电场与内电场方向一致，耗尽区在外电场作用下变宽，使势垒加强；当 PN 结正偏时，外加电场与内电场方向相反，耗尽区在外电场作用下变窄，势垒削弱，使载流子扩散运动继续形成电流，此即为 PN 结的单向导电性，电流方向是从 P 指向 N。

2、硅光电池的工作原理

硅光电池是一个大面积的光电二极管，它被设计用于把入射到它表面的光能转化为电能，因此，可用作光电探测器和光电池，被广泛用于太空和野外便携式仪器等的能源。

光电池的基本结构如图 7-2，当半导体 PN 结处于零偏或反偏时，在它们的结合面耗尽区存在一内电场，当有光照时，入射光子将把处于价带中的束缚电子激发到导带，激发出的电子空穴对在内电场作用下分别飘移到 N 型区和 P 型区，当在 PN 结两端加负载时就有一光生电流流过负载。流过 PN 结两端的电流可由式 1 确定

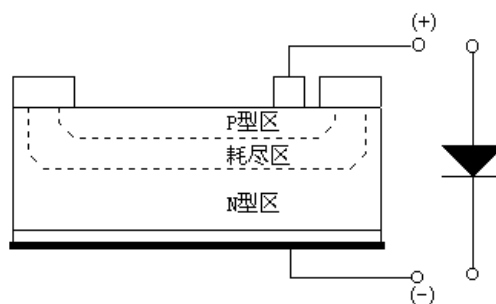


图 7-2 光电池结构示意图

式 (1) 中 I_s 为饱和电流， V 为 PN 结两端电压， T 为绝对温度， I_p 为产生的光电流。从式 (1) 中可以看到，当光电池处于零偏时， $V=0$ ，流过 PN 结的电流 $I=I_p$ ；当光电池处于反偏时（在本实验中取 $V=-5V$ ），流过 PN 结的电流 $I=I_p-I_s$ ，因此，当光电池用作光电转换器时，光电池必须处于零偏或反偏状态。光电池处于零偏或反偏状态时，产生的光电流 I_p 与输入光功率 P_i 有以下关系：

$$I = I_s \left(e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right) + I_p \quad (1)$$

$$I_p = RP_i \quad (2)$$

3、硅光电池的基本特性

(1) 短路电流

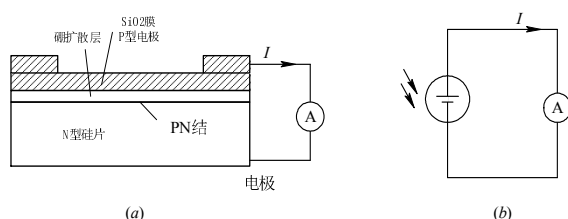


图 7-3 硅光电池短路电流测试

如图 7-3 所示，不同的光照的作用下，毫安表如显示不同的电流值。即为硅光电池的短路电流特性。

(2) 开路电压

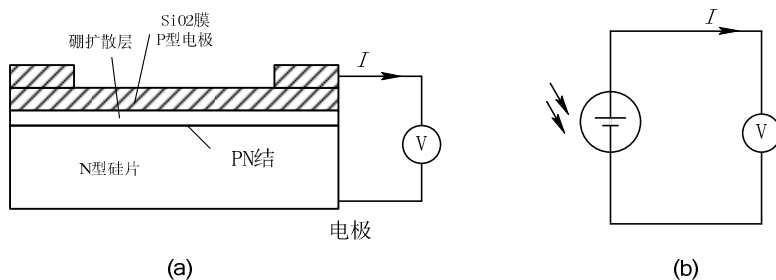


图 7-4 硅光电池开路电压测试

如图 7-4 所示，不同的光照的作用下，电压表如显示不同的电压值。即为硅光电池的开路电压特性。

(3) 光照特性

光电池在不同光照度下，其光电流和光生电动势是不同的，它们之间的关系就是光照特性，如图 7-5。

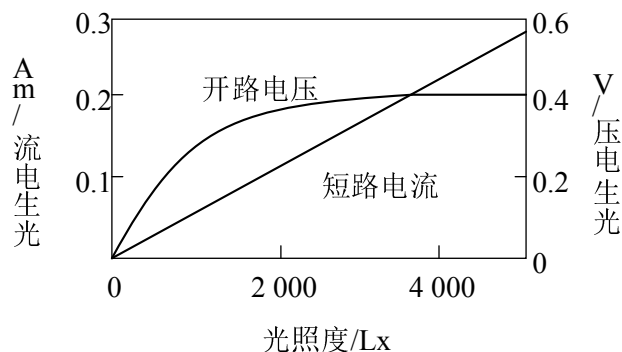


图 7-5 硅光电池的光照电流电压特性

(4) 伏安特性

如图 7-6，在硅光电池输入光强度不变时，测量当负载一定的范围内变化时，光电池的输出电压及电流随负载电阻变化关系曲线称为硅光电池的伏安特性。

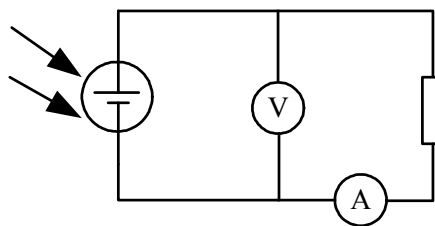


图 7-6 硅光电池的伏安特性测试

(5) 负载特性(输出特性)

光电池作为电池使用如图 7-7 所示。在内电场作用下，入射光子由于内光电效应把处于价带中的束缚电子激发到导带，而产生光伏电压，在光电池两端加一个负载就会有电流流过，当负载很小时，电流较小而电压较大；当负载很大时，电流较大而电压较小。实验时可改变负载电阻 R_L 的值来测定硅光电池的负载特性。

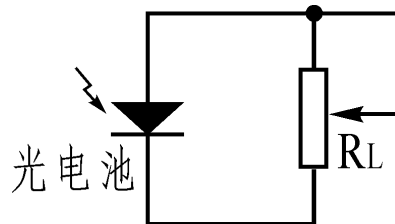


图 7-7 硅光电池负载特性的测定

在线性测量中，光电池通常以电流形式使用，故短路电流与光照度（光能量）呈线性关系，是光电池的重要光照特性。实际使用时都接有负载电阻 R_L ，输出电流 I_L 随照度（光通量）的增加而非线性缓慢地增加，并且随负载 R_L 的增大线性范围也越来越小。因此，在要求输出的电流与光照度呈线性关系时，负载电阻在条件许可的情况下越小越好，并限制在光照范围内使用。光电池光照与负载特性曲线如图 7-8 所示。

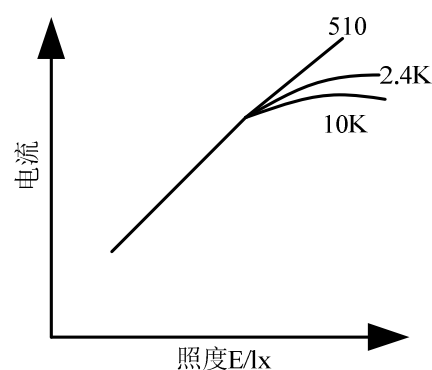


图 7-8 硅光电池光照与负载特性曲线

(5) 光谱特性

一般光电池的光谱响应特性表示在入射光能量保持一定的条件下，光电池所产生短路电流与入射光波长之间的关系。一般用相对响应表示，实验中硅光电池的响应范围为 400~1100nm，峰值波长为 800~900nm，由于实验仪器所提供的波长范围为 400~650nm，因此，实验所测出的光谱响应曲线呈上升趋势，如图 7-9 所示硅光电池频率特性曲线。

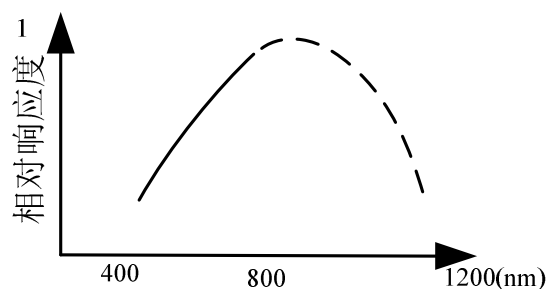


图 7-9 硅光电池的光谱曲线

【注意事项】

- 1、使用电压表和电流表时，应选择合适量程；
- 2、连线之前保证电源关闭。

【实验内容与步骤】

1、硅光电池短路电流特性测试

实验装置原理框图如图 7-10 所示。

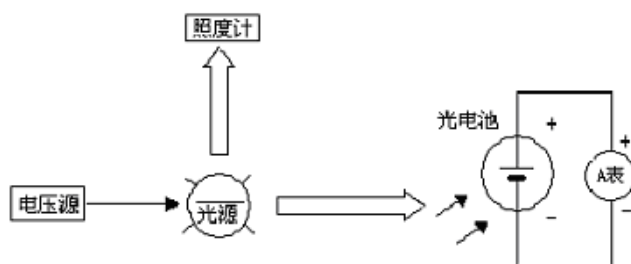


图 7-10 硅光电池短路电流特性测试

(1) 组装好光通路组件，将照度计显示表头与光通路组件照度计探头输出正负极对应相连（红为正极，黑为负极），将光源调制单元与光通路组件光源接口使用彩排数据线相连。

(2) “光照度调节”调到最小，连接好光照度计，光源输出调至最小，打开照度计，此时照度计的读数应为 0。

(3) “光源驱动单元”的双掷开关应位于“静态”。实验需要选用白光。

(4) 按图 7-10 所示的电路连接电路图。

(5) 打开电源顺时针调节照度调节旋钮，使照度值依次为下表中。

的光照度值，分别读出电流表读数，填入下表，关闭电源。

表 7.1 硅光电池短路电流特性数据表

光照度 (L_x)	0	100	200	300	400	500	600	700	800
光生电流 (μA)									

(6) 上表中所测得的电流值即为硅光电池相应光照度下的短路电流。

(7) 实验完毕，关闭电源，拆除所有连线。

2、硅光电池开路电压特性测试

实验装置原理框图如图 7-11 所示。

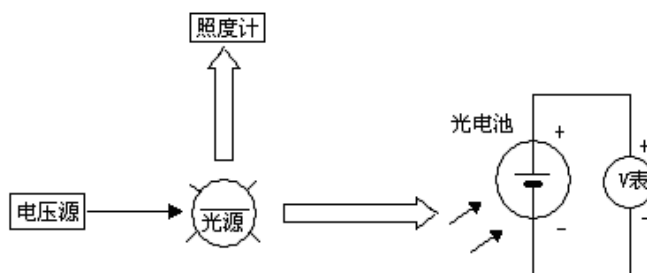


图 7-11 硅光电池开路电压特性测试

(1) 组装好光通路组件，将照度计显示表头与光通路组件照度计探头输出正负极对应相连（红为正极，黑为负极），将光源调制单元与光通路组件光源接口使用彩排数据线相连。

(2) “光照度调节”调到最小，连接好光照度计，光源输出调至最小，打开照度计，此时照度计的读数应为 0。

(3) “光源驱动单元”的双掷开关应位于“静态”。实验选用白光。

(4) 按图 7-11 所示的电路连接电路图

(5) 打开电源顺时针调节照度调节旋钮，使照度值依次为下表中的光照度值，分别读出电压表读数，填入下表，关闭电源。

表 7.2 硅光电池开路电流特性数据表

光照度 (L_x)	0	10	20	50	100	200	300	400	500	600	700	800
光生电压 (mV)												

(4) 将“光照度调节”旋钮逆时针调节到最小值位置后关闭电源。

(5) 上表中所测得的电压值即为硅光电池相应光照度下的开路电压。

(6) 实验完毕，关闭电源，拆除所有连线。

3、硅光电池光照特性

(1) 根据实验 1 和 2 所调试的实验数据，作出如图 7-5 所示的硅光电池的光照电流电压特性曲线。

(2) 改变不同光照度的取值，重复实验 1 和实验 2，并作出相应硅光电池的光照电流电压特性曲线。

4、硅光电池伏安特性

实验装置原理框图如图 7-12 所示。

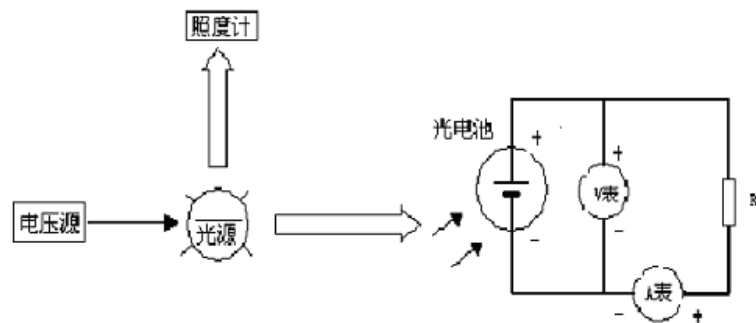


图 7-12 硅光电池伏安特性测试

(1) 组装好光通路组件，将照度计显示表头与光通路组件照度计探头输出正负极对应相连（红为正极，黑为负极），将光源调制单元与光通路组件光源接口使用彩排数据线相连。

(2) “光照度调节”调到最小，连接好光照度计，光源输出调至最小，打开照度计，此时照度计的读数应为 0。

(3) “光源驱动单元”的双掷开关应位于 “静态”。实验选用白光。

(4) 电压表档位调节至 2V 档，电流表档位调至 200uA 档，将 “光照度调节” 旋钮逆时针调节至最小值位置。（注意：若电流表无法满足测量、应如何用万用表测量电流）

(5) 按图 7-12 所示的电路连接电路图，R 取值为 200 欧，打开电源顺时针调节照度调节旋钮，增大光照度值至 800Lx。记录下此时的电压表和电流表的读数填入下表；

(6) 关闭电源，将 R 分别换为下表中的电阻值，重复上述步骤，分别记录电流表和电压表的读数，填入下表。

表 7.3 硅光电池伏安特性数据表 1

电阻	200	2K	5.1K	7.5K	10K	15K	20K	25K	51K	200K
电流										
电压										

(7) 改变光照度为 100Lx、300Lx，重复上述步骤，将实验结果填入下表。

表 7.4 硅光电池伏安特性数据表 2 (100Lx)

电阻	200	2K	5.1K	7.5K	10K	15K	20K	25K	51K	200K
电流										

电压										
----	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

表 7.5 硅光电池伏安特性数据表 3 (300Lx)

电阻	200	2K	5.1K	7.5K	10K	15K	20K	25K	51K	200K
电流										
电压										

(8) 根据上述实验数据，在同一坐标轴中作出三种不同条件下的伏安特性曲线，并进行分析。

(9) 实验完毕，关闭电源，拆除所有连线。

5、硅光电池光谱特性测试

当不同波长的入射光照到光电二极管上，光电二极管就有不同的灵敏度。本实验仪采用高亮度 LED（白、红、橙、黄、绿、蓝、紫）作为光源，产生 400~630nm 离散光谱。

光谱响应度是光电探测器对单色入射辐射的响应能力。定义为在波长 λ 的单位入射功率的照射下，光电探测器输出的信号电压或电流信号。即为

$$\mathfrak{R}_v(\lambda) = \frac{V(\lambda)}{P(\lambda)} \quad \text{或} \quad \mathfrak{R}_i(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{P(\lambda)} \quad (3)$$

式中， $P(\lambda)$ 为波长为 λ 时的入射光功率； $V(\lambda)$ 为光电探测器在入射光功率 $P(\lambda)$ 作用下的输出信号电压； $I(\lambda)$ 则为输出用电流表示的输出信号电流。

本实验所采用的方法是基准探测器法，在相同光功率的辐射下，则有

$$\mathfrak{R}(\lambda) = \frac{UK}{U_f} \mathfrak{R}_f(\lambda) \quad (4)$$

式中， U_f 为基准探测器显示的电压值，K 为基准电压的放大倍数， $\mathfrak{R}_f(\lambda)$ 为基准探测器的响应度。取在测试过程中， U_f 取相同值，则实验所测测试的响应度大小由 $\mathfrak{R}(\lambda) = U \mathfrak{R}_f(\lambda)$ 的大小确定。下图为基准探测器的光谱响应曲线。

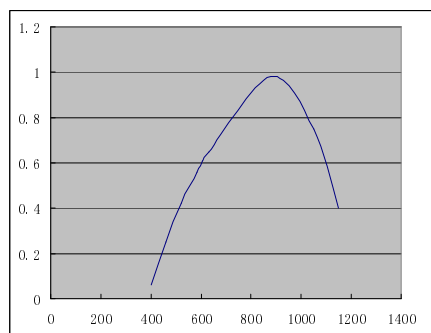


图 7-13 基准探测器的光谱响应曲线

(1) 组装好光通路组件，将照度计显示表头与光通路组件照度计探头输出正负极对应相连（红为正极，黑为负极），将光源调制单元与光通路组件光源接口使用彩排数据线相连。

(2) “光源驱动单元”的双掷开关应位于“静态特性”。

(3) 按如图 7-11 连接电路图。

(4) 打开电源，缓慢调节光照度调节电位器到最大，依次选用各颜色光源，记下照度计读数最小时照度计的读数 E 作为参考。

(5) 选择某颜色光源缓慢调节电位器直到照度计显示为 E ，将电压表测试所得的数据填入下表；

(6) 重复操作步骤 (5)，分别测试出橙，黄，绿，蓝，紫在光照度 E 下电压表的读数，填入下表。

表 7.6 硅光电池光谱特性测试数据表

波长 (nm)	红 (630)	橙 (605)	黄 (585)	绿 (520)	蓝 (460)	紫 (400)
基准响应度	0.65	0.61	0.56	0.42	0.25	0.06
电压 (mV)						
响应度						

(7) 根据所测试得到的数据，做出硅光电池的光谱特性曲线。

6. 硅光电池负载特性测试实验

(1) 组装好光通路组件（按图 7-12），将照度计显示表头与光通路组件照度计探头输出正负极对应相连（红为正极，黑为负极），将光源调制单元与光通路组件光源接口使用彩排数据线相连。

(2) “光照度调节”调到最小，连接好光照度计，光源输出调至最小，打开照度计，此时照度计的读数应为 0。

(3) “光源驱动单元”的双掷开关应位于“静态”。实验选用白光。

(4) 电压表档位调节至 2V 档，电流表档位调至 200 μ A 档，将“光照度调节”旋钮逆时针调节至最小值位置。（电流测量问题同上）

(5) 打开电源，顺时针调节“光照度调节”旋钮，逐渐增大光照度至 100Lx，200Lx，300Lx，400Lx，500Lx，600Lx，700Lx，800Lx，900Lx 分别记录电流表和电压表读数。

(6) 将 R 分别换为 510，1K，2K，5K，10K，20K，50K 重复上述步骤，分别记录电流表和电压表的读数，填入下表。

表 7.7 硅光电池负载特性测试数据表

电 流 光照	电 阻	510	1K	2K	5K	10K	20K	50K
100Lx								
200Lx								
300Lx								
400Lx								
500Lx								
600Lx								
700Lx								
800Lx								
900Lx								

(7) 根据上述实验所测试的数据，在同一坐标轴上描绘出硅光电池的负载特性曲线，并进行分析。

(8) 绘制输出功率三维曲面图；X-光强，Y-电阻，Z-功率。

【数据处理要求】

1. 根据所提供的表格记录实验数据；
2. 针对实验要求，使用 **MATLAB** 绘制数据表格。

【分析讨论题】

1. 实验中，部分实验由于所测电流较小，可以使用何种方法间接测量电流？
2. 分析硅光电池的内阻变化规律。
3. 如何才能获得硅光电池的最大输出功率？

【参考资料】

1. 余虹，大学物理（第二版）. 科学出版社. 2008.
2. 余虹，秦颖等，大学物理实验. 科学出版社. 2014.
3. 光电探测器特性测试综合实验仪 GCGDTC-C 使用说明书. 武汉光驰科技有限公司.