

【特别提示】

第一次实验，所有同学都预习[硅光电池特性](#)实验

第二次实验，所有同学都预习[RGB 三基色配色](#)实验

【实验要求】

1. 课前预习

- (1) 认真阅读实验讲义
- (2) 不写预习报告，完成在线测验题

请点击预习测试题链接：<https://ks.wjx.top/vj/eKvgI2q.aspx> 或扫描二维码作答



2. 实验阶段

- (1) 实验仪器：了解仪器的功能，掌握仪器的使用；轻拿轻放、爱护实验设备。
- (2) 实验数据：如实、规范记录实验数据；不得篡改、抄袭。
- (3) 数据签字：实验完毕，原始数据须经指导老师签字；并整理实验设备。
- (4) 出门测试：完成实验后，扫描实验室里提供的二维码在线填写出门测试题。

3. 实验报告

- (1) 简述实验原理、基本公式、原理图等，篇幅 1 页。
- (2) 提供原始签字实验数据。
- (3) 数据处理：本实验不用处理实验数据，不写实验报告。
- (4) 思考题：本实验不用回答思考题，不写实验报告。

硅光电池光电特性

【实验目的】

- (1) 了解硅光电池的工作原理
- (2) 理解硅光电池的基本特性
- (3) 掌握电学实验的相关知识

在光照射作用下，物质材料中电子逸出其表面形成光电流的现象通常称为外光电效应，外光电效应主要应用到光电管、光电倍增管等。而把在光照射作用下，物质吸收光子能量并激发自由电子的现象称为内光电效应，其主要包括光电导效应和光伏效应。光电导效应主要是改变物质的电导率，光敏材料（光导管）即是利用此原理制作的光电子器件；而光伏效应是指一定波长的光照射在非均匀半导体（特别是 PN 结），在内建电场作用下，半导体内部产生光电压的现象。硅光电池是一种基于光伏效应能够将光能直接转换成电能的半导体器件。它具有转换效率高、重量轻、使用安全、无污染等特点，在光电技术、自动控制、计量检测和光能利用等领域都有广泛应用。

【实验原理】

半导体 n 型掺杂和 p 型掺杂是构建半导体器件的基础，对晶体硅半导体，n 型掺杂一般是向其中引入元素周期表中第 V 主族元素，比如磷（P）、砷（As）等。以磷为例，磷具有 5 个价电子，其中的 4 个用来满足硅晶格的 4 个共价键，磷在硅中的掺杂能级离导带边非常近，只要足够的热能就能将多出的一个电子激发到导带中变成可以导电的自由电子，磷施主原子变成带正电的磷离子。P 型掺杂一般是向其中引入元素周期表中的第 III 主族的元素，比如硼（B）、镓（Ga）、铝（Al）等。以硼为例，硼原子有 3 个价电子，只能与 3 个硅原子形成共价键。硼在硅中的掺杂能级离价带顶非常近，只要有足够的热能就能将一个电子从价带激发到硼的掺杂能级上，在价带中留下可以导电的空穴，而硼受主原子变成带负电的硼离子。硅光电池是根据光伏效应而制成的将光能转换成电能的一种器件，它的基本结构就是一个 PN 结。硅光电池 PN 结的制造，一般是在 P 型硅片上扩散磷形成 N 型薄层，是 N/P 型电池。也可在 N 型硅片上扩散硼形成 P 型薄层，形成 P/N 型电池。光电池是在 N（P）型硅基底上扩散 P（N）型杂质并作为受光面，构成个 PN 结后，再经过各种工艺处理，分别在基底和光敏面上制作输出电极，涂上二氧化硅作保护膜（一方面起防潮保护作用，另一方面对入射光起抗反射作用），即成硅光电池（图 1 所示）。

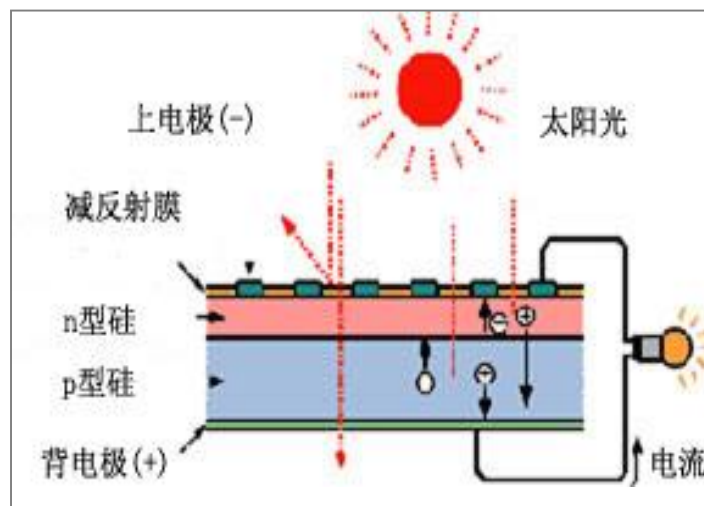


图 1 硅光电池结构

1. P-N 结偏置特性

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，使势垒削弱，使载流子扩散运动继续形成电流，这就是 PN 结的单向导电性，电流方向是从 P 指向 N。图 2 所示是半导体 PN 结在零偏、反偏、正偏下的耗尽区。

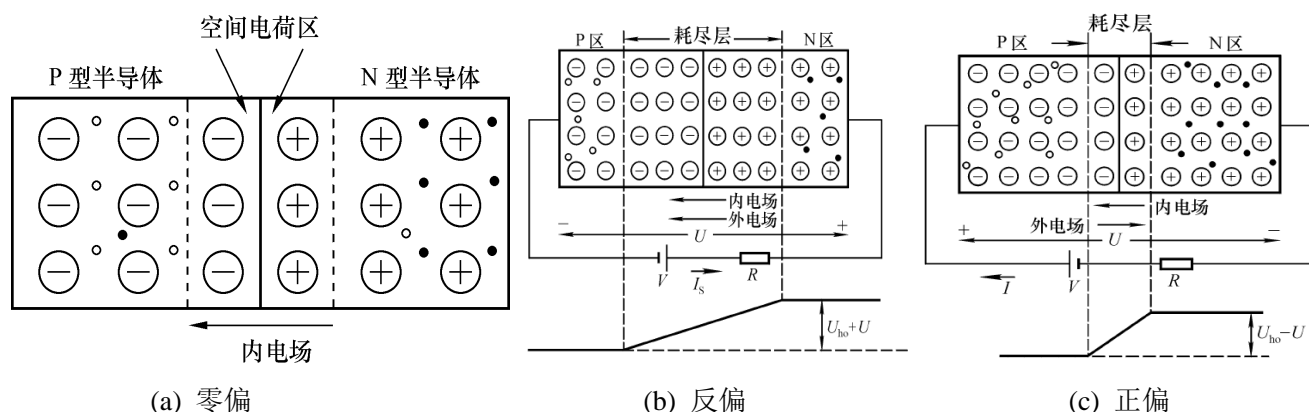


图 2 硅光电池 PN 结在零偏，反偏和正偏下的耗尽区

2. 光伏效应

当硅光电池 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，电池对光子的本征吸收和非本征吸收都产生光生载流子，但能引起光伏效应的只能是本征吸收所激发的少数载流子。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。基于光伏效应，硅光电池的应用分为两类。一类是作为能源，如把太阳光的能量转换为电能，为太阳能电池，是利用太阳能的重要元件。另一类是作为光电信号转换器，可用于光探测器。

3. 硅光电池的基本特性

(1) 伏安特性

在一定光照下，在光电池两端加一个负载就会有电流流过，当负载很大时，电流较小而电压较大；当负载很小时，电流较大而电压较小。如图 3 所示，硅光电池的伏安特性曲线由二个部分组成：

- 1) 无偏压工作状态，光电流随负载变化很大。
- 2) 反偏压工作状态，光电流与偏压、负载几乎无关（很大的动态范围内）。

伏安特性曲线在横轴上的截距为开路电压 U_{oc} ，在纵轴上的截距为短路电流 I_{sc} 。

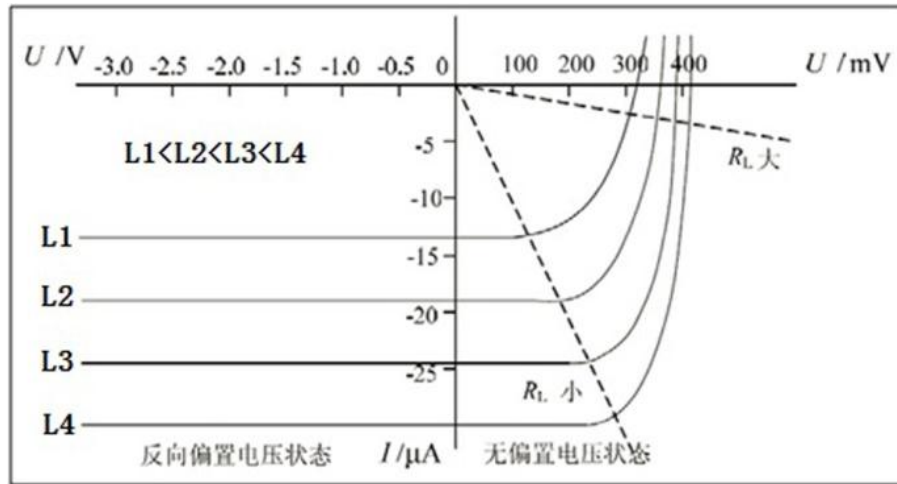


图 3 硅光电池的伏安特性曲线

(2) 照度特性

当没有光照时，硅光电池等效于普通的二极管，其伏安特性为：

$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{qU}{k_B T}\right) - 1 \right]$$

I 为流过 PN 结的电流， I_0 为反向饱和电流， q 为电子电荷， k_B 为玻尔兹曼常数， T 为绝对温度， U 是加在 PN 结两端电压。对于外加正向电压， I 随 V 指数增长，称正向电流；当外加电压为反向时，在反向击穿电压之内，反向饱和电流基本是个常数。

当有光照时，入射光子把处于价带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逸到 N 型区和 P 型区，当在 PN 结两端加负载时就有光生电流流过负载，流过 PN 结两端的电流：

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qU}{k_B T}\right) - 1 \right]$$

式中 I_{ph} 是与入射光的强度成正比的光生电流，其比例系数与负载电阻的大小及硅光电池的结构特性有关。

当硅光电池在短路状态时 ($U=0$)，短路电流为： $I_{sc} = I_{ph}$

当硅光电池在开路状态时 ($I=0$)，开路电压为： $U_{oc} = \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right)$

短路电流 I_{sc} 和光照强度 L 成正比，开路电压 U_{oc} 与光照强度 L 的对数成正比。图 4 是在一定光照范围内 I_{sc} 和 U_{oc} 随 L 的变化关系。在线性测量中，光电池通常以电流形式使用，故 I_{sc} 与 L 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 L 的增加而非线性缓慢地增加，并且随 R_L 的增大线性范围也越来越小。因此，在要求输出的 I_L 与 L 呈线性关系时， R_L 在条件许可的情况下越小越好，并限制在光照范围内使用。

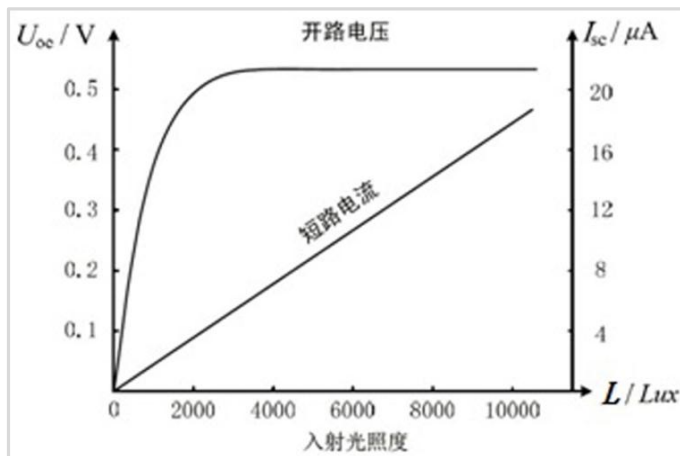


图 4 硅光电池的光照特性曲线

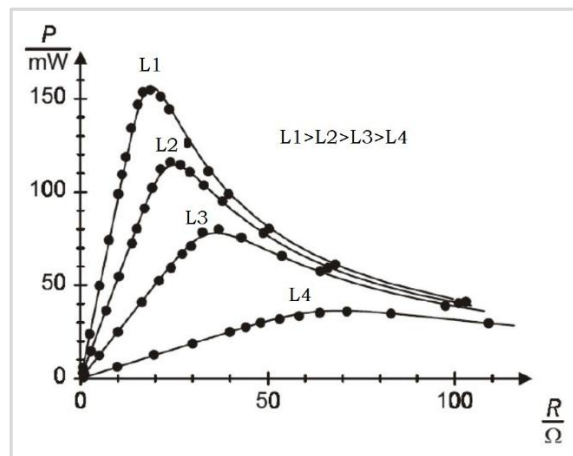


图 5 硅光电池的输出特性曲线

(3) 输出特性

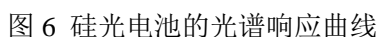
硅光电池负载 R_L 上的电压降 U 和通过 R_L 的电流之积称为硅光电池的输出功率 P 。在一定的照度下，不同 R_L 有不同的输出功率 P ，输出功率达到最大值 P_m 时的负载电阻 R_m 称为最佳负载电阻。此时能量转换效率最高，且 R_m 随光强而变化。当 $R_L = R_m$ 时： $P_m = U_m I_m$ ，式中 U_m 和 I_m 分别是最佳工作电压和最佳工作电流， P_m 为最大输出功率。硅光电池的输出特性曲线如图 5 所示。

填充因子 FF ，其定义为：
$$FF \equiv \frac{P_m}{U_{oc} I_{sc}} = \frac{U_m I_m}{U_{oc} I_{sc}}$$

FF 是表征硅光电池性能优劣的一个重要参数， FF 越大则输出功率越高，说明硅光电池对光的利用率越高。 FF 取决于入射光强、材料禁带宽度、负载电阻等。

(4) 光谱响应特性

硅光电池的光谱响应表征不同波长的光子产生电子-空穴对的能力。各种波长的单位辐射光能或对应的光子入射到硅光电池上，将产生不同的短路电流，按波长的分布求得其对应的短路电流变化曲线称为硅光电池的光谱响应曲线。通常把光谱响应的最大值取为 1，其它值作归一化处理，这样的曲线也叫相对灵敏度分布曲线。图 6 给出了典型的硅光电池光谱响应曲线。


$$K_{\lambda} = \frac{P_{\lambda}}{\eta_{\lambda} T_{\lambda} \Delta \lambda}$$

其相对灵敏度 $K_{r\lambda}$ 为 $K_{r\lambda} = \frac{K_{\lambda}}{K_m}$, K_m 为不同波长对于 K_{λ} 的最大值。

【基础内容】

(要求: 只允许使用数字万用表电压档, 说明使用的万用表的量程, 负载电阻不小于 $50\ \Omega$)

[illegible]

$d = 30\text{ cm}$ $L =$	电压 $U\text{ (V)}$											
	电流 $I\text{ (mA)}$											
	功率 $P\text{ (mW)}$											
$d = 40\text{ cm}$ $L =$	电压 $U\text{ (V)}$											
	电流 $I\text{ (mA)}$											
	功率 $P\text{ (mW)}$											
$d = 50\text{ cm}$ $L = 40\text{ lux}$	电压 $U\text{ (V)}$											
	电流 $I\text{ (mA)}$											
	功率 $P\text{ (mW)}$											

(2) 不同光照下的短路电流 I_{sc} ，开路电压 U_{oc} ；不同光照下的最大输出功率 P_m ，对应最佳负载电阻 R_m ，填充因子 FF 。

【提升内容】

1. 硅光电池开路电压与短路电流测量

测量不同光照下硅光电池的开路电压 U_{oc} 、短路电流 I_{sc} ，绘制 U_{oc} - L 、 I_{sc} - L 曲线；给出 U_{oc} - L 、 I_{sc} - L 的近似函数关系。

(要求：只允许使用数字万用表电压档，说明使用的万用表的量程)

距 离 $d\text{ (cm)}$	20	25	30	35	40	45	50
光照强度 $L\text{ (lx)}$							
开路电压 $U_{oc}\text{ (V)}$							
短路电流 $I_{sc}\text{ (mA)}$							

【进阶内容】

1. 不同负载下硅光电池输出电压与光照测量

测量不同负载 R_L 的硅光电池输出电压 U 与光照 L 的关系，绘制 U - L 曲线并分析负载对 U - L 的影响。

(要求：只允许使用数字万用表电压档，说明使用的万用表的量程)

	距 离 $d\text{ (cm)}$	20	25	30	35	40	45	50
	光照强度 $L\text{ (lx)}$							
100 Ω	输出电压 $U\text{ (V)}$							
	输出电流 $I\text{ (mA)}$							
1000 Ω	输出电压 $U\text{ (V)}$							
	输出电流 $I\text{ (mA)}$							
5000 Ω	输出电压 $U\text{ (V)}$							
	输出电流 $I\text{ (mA)}$							

10000 Ω	输出电压 U (V)							
	输出电流 I (mA)							

【高阶内容】

1. 反向偏压下硅光电池的电流与光照测量

反向偏压状态下，测量硅光电池的电流 I 与光照 L 的关系，绘制 I - L 曲线，给出近似函数关系。

（要求：只允许使用数字万用表电压档，说明使用的万用表的量程）

距 离 d (cm)	20	25	30	35	40	45	50
光照强度 L (lx)							
电压 U (V)							
电流 I (mA)							

【思考题】

1. 光电池在工作时为什么要处于零偏或反偏？
2. 当增加光照强度，硅光电池的哪些参数发生变化？

【注意事项】

1. 暗伏安特性测量时，输入电压勿过大，以免损坏光电池。
2. 溴钨灯需预热 5 分钟，勿随意调整其工作电流或电压。
3. 测量电池光照特性时，务必关闭照明光源。