

## 实验 4 半导体光伏效应实验

本实验以单晶硅太阳能电池为例，通过实验让学生了解太阳能光伏电池的机理，学习和掌握测量短路电流的方法和技巧，以及光电转换的基本参数测量。

### 一、实验目的

- 1、初步了解太阳能电池机理
- 2、测量太阳能电池开路电动势、短路电流、内阻和光强之间关系
- 3、在恒定光照下测量光电流、输出功率与负载之间关系

### 二、实验原理

在 P 型半导体上扩散一薄层施主杂质而形成的 p-n 结(如图 1)，由于光照，在 A、B 电极之间出现一定的电动势。在有外电路时，只要光照不停止，就会源源不断地输出电流，这种现象称为光伏效应。利用它制成的元器件称之为太阳能电池。光伏效应最重大的应用是可以将阳光直接转换成电能，是当今世界众多国家致力研究和开拓应用的课题。

从光伏效应的机理可知，太阳能电池输出的电流  $I_L$  是光生电流  $I_p$  和在光生电压  $V_p$  作用下产生的 p-n 结正向电流  $I_F$  之差，即  $I_L = I_p - I_F$ 。根据 p-n 结的电流和电压关系

$$I_F = I_S \left( e^{\frac{qV_p}{kT}} - 1 \right)$$

式中  $V_p$  是光生电压， $I_S$  为反向饱和电流，所以输出电流

$$I_L = I_p - I_S \left( e^{\frac{qV_p}{kT}} - 1 \right) \quad (1)$$

此即光电流表达式。通常  $I_p \gg I_S$ ，上式括号内的 1 可忽略。

对于太阳能电池有外加偏压时，(1) 式应改为

$$I'_L = I_L + I = I_L + I_S \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (2)$$

上式中  $I_S \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$ ，就是 p-n 结在外加偏压  $V$  作用下的电流。图 2 中的 (a) (b) 两条曲线分别表示无光照和有光照时太阳能电池的 I-V 特性，由此可知，太阳能电池的伏安特性曲线相当于把 p-n 结的伏安特性曲线向下平移，它在横轴与纵轴的截距分别给出了  $V_{oc}$  和  $I_{sc}$ 。

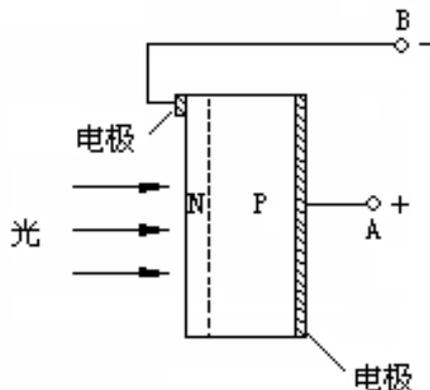


图 1 光伏效应结构示意图

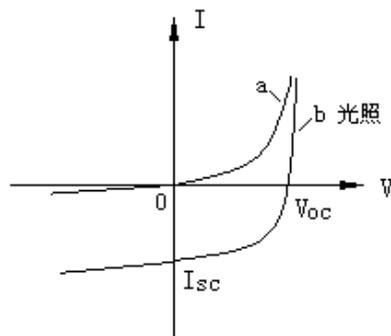


图 2 太阳能电池的伏安特性

实验表明：在  $V=0$  情况下，当太阳能电池外接负载电阻  $R_L$ ，其输出电压和电流均随  $R_L$  变化而变化。只有当  $R_L$  取某一定值时输出功率才能达到最大值  $P_m$ ，即所谓最佳匹配阻值  $R_L = R_{LB}$ ，而  $R_{LB}$  则取决于太阳能电池的内阻  $R_i = \frac{V_{OC}}{I_{SC}}$ 。因  $V_{OC}$  和  $I_{SC}$  均随光照强度的增强而增大，所不同的是  $V_{OC}$  与光强的对数成正比， $I_{SC}$  与光强(在弱光下)成正比，所以  $R_i$  亦随光强度变化而变化。如图 3 所示。 $V_{OC}$ 、 $I_{SC}$  和  $R_i$  都是太阳能电池的重要参数，最大输出功率  $P_m$  和  $V_{OC}$  与  $I_{SC}$  乘积之比

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (3)$$

FF 是表征太阳能电池性能优劣的指标，称为填充因子。FF 越大，太阳能电池的转换效率就越高。FF 最大值约为 0.75—0.85。

太阳能电池的等效电路(如图 4)，在一定负载电阻  $R_L$  范围内可以近似地视为一个电流源  $I_{ps}$  与内阻  $R_i$  并联，和一个很小的电极电阻  $R_s$  串联的组合。

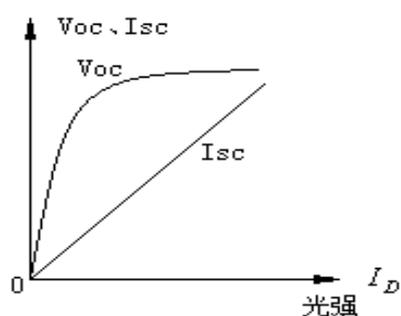


图 3 开路电动势、短路电流与光强关系曲线

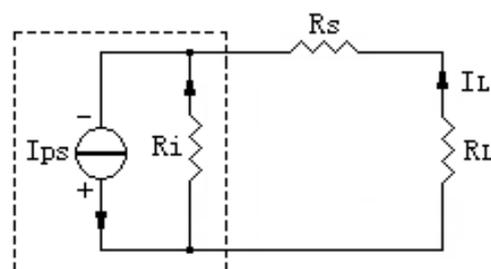


图 4 太阳能电池等效电路

#### 四、实验方法

##### 1、光强调节与强度的表示

本实验所用光源为 LED(发光二极管)，根据 LED 的输出功率与驱动电流呈线性关系，利用改变 LED 的静态工作电流确定光强的相对值。仪器设定 LED 的工作电流调节范围为 0-20mA，对应显示器上的数值为 0-2000。也可用“归一”法表示光强，即设  $J_m$  为最大光强， $J$  为改变后的光强，则  $J/J_m$  为无量纲的相对光强。

##### 2、标尺的设定

为了调节光源与光电池的间距和试样表面光照的均匀度，设置了水平及垂直方向可调的标尺。选择三色发光管中任一颜色光源，接通 LED 驱动电源，调节  $I_D$  指示为 1000 左右，功能切换开关置  $V_{OC}$  档。将水平标尺调到 10mm 左右；再调垂直标尺，使开路电压  $V_{OC}$  达到最大值，并保持该状态直至该颜色光源的所有实验完毕为止。由于三色 LED 的发光中心不在同一点，所以对不同颜色光源，都应按照上述方法重新调试垂直标尺。

##### 3、LED 驱动电流源粗调和细调旋钮的使用

$I_D$  的调节通过粗调和细调旋钮来实现。细调旋钮只在  $I_D$  输出较高时起作用，如  $I_D$  显示为 1900 时，最后一位“0”可能会跳动，这时可通过调节细调旋钮使其稳定。

## 五、实验内容

### 1、测量开路电动势 $V_{oc}$ 与光强 $I_D$ 的关系

测量线路如图 5 所示。将功能切换开关打到 $V_{oc}$ 档，然后将面板上 $V_{oc}$  (毫伏表)正、负输入端与 PV 装置的太阳能电池正、负输出端对应连接。按实验所需光源颜色，接通 LED 驱动电源。并调节标尺找到实验最佳工作状态。

调节 $I_D = 0$  (即将粗调和细调旋钮旋至最小)，此时由于 PV 装置不完全密封 (如导线的入口处)，可能有光线漏进装置中，使得 $V_{oc}$ 显示不为 0。

调节 $I_D$ 测量不同光强下，太阳能电池的开路电动势 $V_{oc}$ 。将数据记入表 1，并绘制 $V_{oc} \sim I_D$ 曲线，说明其关系。

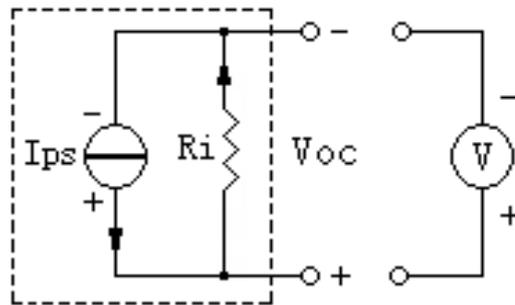


图 5 测量开路电压 $V_{oc}$ 线路图

表 1

$I_D$	$V_{oc}$ (mV)			ID	$V_{oc}$ (mV)		
	R	G	B		R	G	B
0	175	176	176	350	215	201	208
5	176	177	177	400	218	202	210
10	176	178	178	500	223	205	214
20	178	179	178	600	226	207	217
30	181	182	182	700	231	209	222
50	185	184	185	800	233	211	226
100	193	188	191	1000	243	216	230
150	199	192	197	1200	248	218	232
200	205	195	200	1400	251	220	234
250	209	197	203	1600	252	221	235
300	213	199	205	1800	253	222	237

## 2、短路电流 $I_{sc}$ 的测量

测量线路图如图 6 所示。将功能切换开关打到  $I_{sc}$  档(注：在开启“DC 0-1V 电源”前请先确认  $I_0$  旋钮旋转到最小处，以防在瞬间接通时  $U_s$  处于较大值，损坏太阳能电池)；调节 DC 0-1V 电源  $U_s$  输出，使微安表读数  $I_0$  为 10.00-18.00 $\mu$ A (建议取 10.00 $\mu$ A)。

在某一光强  $I_D$  下，改变可调电阻  $R$ ，使流过检流计 (G) 的电流  $I_G$  为零。此时 AB 两点之间和 AC 两点之间的电压应相等，即  $V_{AB} = V_{AC}$ 。因而  $IR = I_0 r_0$ ，即短路电流

$$I_{sc} = I = \frac{I_0 r_0}{R} \quad (r_0 \text{ 为微安计内阻, 为 } 10\text{K}\Omega)$$

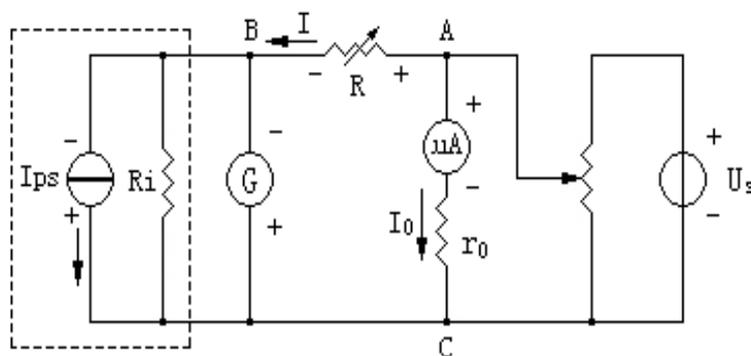


图 6 测量短路电流  $I_{sc}$  线路图

测量不同红光光强下，短路电流  $I_{sc}$  与光强  $I_D$  的关系，将数据记入表2，并绘制  $I_{sc} \sim I_D$  曲线，说明其关系。

表2

$I_D$	$R(\text{K}\Omega)$	$I_{sc} (\mu\text{A})$
100		
150		
200		
300		
400		
500		
600		
700		
800		
1000		
1200		
1400		
1600		

3、按下式求出太阳能电池的内阻  $R_i$ ，并绘制  $R_i \sim I_D$  曲线（自拟表格），说明其关系。

$$R_i = \frac{V_{OC}}{I_{SC}}$$

4、流过负载电流  $I_L$  与负载两端电压  $V_L$  关系测量

选择红光光源进行实验。

测量线路如图 7 所示。 $R^*$  为实验仪上标示的  $I_L$  取样电阻，为  $10\text{ K}\Omega$ ； $r_L$  为电阻箱；将  $I_L$  取样电阻  $R^*$ （正、负记号端）与  $I_L$ （微安表）正、负端对应连接，功能切换开关打到  $I_L$  档。

太阳能电池在恒定光照下（取  $I_D$  约为 1000），测量在不同负载电阻  $R_L$  时流过的电流  $I_L$  与输出电压  $V_L = I_L(r_L + R^*)$ ，将数据记入表 3，并绘制  $I_L \sim V_L$  曲线。

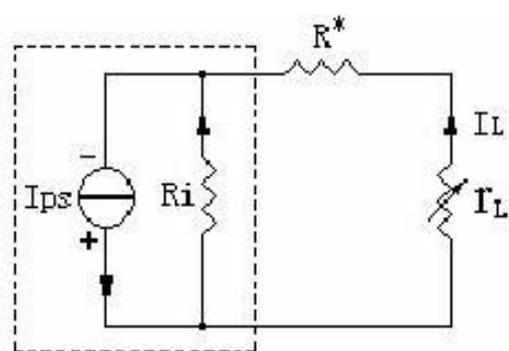


图 7 负载特性测量线路图

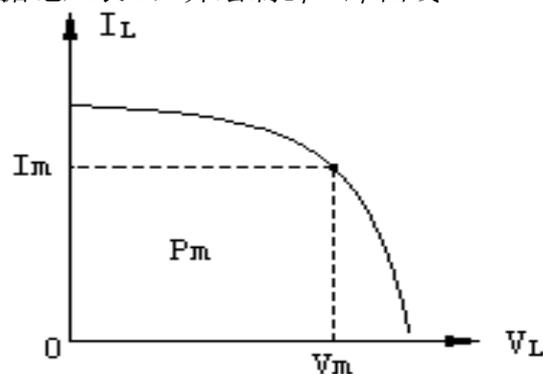


图 8 光电流与负载电阻两端电压关系曲线

计算不同负载电阻下输出功率  $P$ ，即  $P = V_L I_L$ ，并绘出  $P \sim R_L$  曲线，说明其关系，确定  $P_m$  时的  $R_{LB}$  及填充因子  $FF = \frac{P_m}{V_{OC} I_{SC}}$ 。

表 3

$R^* + r_L$ (K $\Omega$ )	$I_D =$		
	$I_L$ ( $\mu\text{A}$ )	$V_L$ (mV) = $I_L(R^* + R_L)$	$P(\times 10^{-9}\text{ W}) = V_L I_L$
10			
15			
20			

30			
40			
50			
60			
70			
80			
90			
100			
150			
200			
250			
300			
400			
500			
600			
700			
800			
900			
1000			

## 六、思考题

1. 你能设想如何实现高电压大电流的阳光发电方案吗？
2. 测量  $I_{sc}$  时，若  $I_G$  不为零，如何根据  $I_G$  的正、负号，确定增减 R 阻值，如  $I_G$  为负是加大 R 还是减小 R？
3. 为什么图 2 曲线 b 相对于曲线 a 是向下而不是向上平移？
4. 分析当太阳能电池作为光控制器件使用时，应如何选择偏压方向？

## 七、注意事项

因为突然给 LED 光源施加或断掉一个大的冲击电流，会烧毁 LED 光源，所以，在给 LED 接通或断掉驱动电源前，务必将电流都调节为 0，也即，将实验箱上的  $I_D$  调节旋钮逆时针旋转到底。

\*注：

如英国瓦特麦德公司研制的太阳能电风扇，风扇系统由长 1 米高 0.5 米的太阳能电池板（55 瓦）、逆变器等部件组成，逆变器将 DC 电源转换为 AC 110 伏供电扇使用，该系统除平时对自身供电外，多余的电能可对蓄电池充电，以供太阳能供电系统受光照发生变化时使用。又如美国通用公司制造的太阳能汽车，其太阳能电池板采用转换效率高达 18% 的新材料（一般硅太阳电池约为 12%），汽车时速为 75 公里。据最新报道我国在湖北宜昌经济技术开发区投资建设年产 4500—5000 吨太阳能硅材料生产基地。尤其令人振奋的是到 2008 年北京奥运村的空

调、照明的电源都将来自光伏发电。面对我国正大力发展新能源建设的前景，莘莘学子，真可谓是广阔天地大有作为！