

实验 13 硅光电池的特性及其应用

引言

随着全球对能源的需求日益增长,人类已面临着两大难题:一是地球上储量有限的燃料资源而引发的能源危机;二是以煤等化石燃料的大量燃烧所排放的 CO₂ 和 SO₂ 气体,导致的环境污染和温室效应,使人类的生存环境不断恶化。加速发展清洁而可再生的太阳能,降低温室气体排放量,已成为全球的共识。许多国家都把光伏发电作为优先发展项目,美国、希腊等国均已建成多座兆瓦级阳光电站,并启动了“屋顶光伏”计划,即以家庭为单位进行安装阳光发电。我国将在 2020 年前建成五座兆瓦级阳光电站,到本世纪中叶,太阳能发电将占整个能源供应的 30%,至本世纪末这比例将上升到 70%。专家们早在十多年前就预言:光伏是 21 世纪高新技术发展的前沿之一,预测在本世纪中叶,光伏发电将成为重要的发电技术之一,作为阳光电站的基石——太阳能电池,目前占主流的还是硅系列(单晶、多晶和非晶)太阳能电池。

本实验以单晶硅光电池为例,通过实验让学生了解硅光电池的机理,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。

二、实验目的

- 1、初步了解硅光电池机理
- 2、测量硅光电池开路电动势、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

三、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硅光电池。光伏效应最重大的应用是可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(见附录),硅光电池输出的电流 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

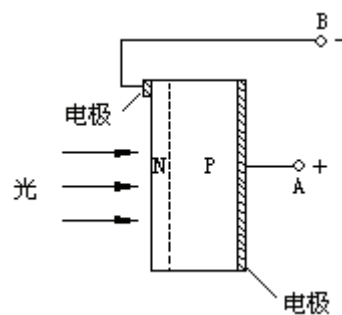


图 1 光伏效应结构示意图
(硅光电池模型)

$$I_L = I_P - I_S (e^{\frac{qV}{kT}} - 1) \quad (1)$$

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。

对于硅光电池有外加偏压时，(1) 式应改为

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

上式中 $I_S (e^{\frac{qV}{kT}} - 1)$ ，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硅光电池的 I-V 特性，由此可知，硅光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} 。

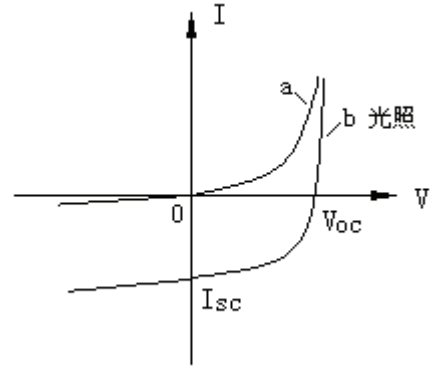


图 2 硅光电池的伏安特性

实验表明：在 $V=0$ 情况下，当硅光电池外接负载电阻 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 是表征硅光电池性能优劣的指标，称为填充因子。

硅光电池的等效电路(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。

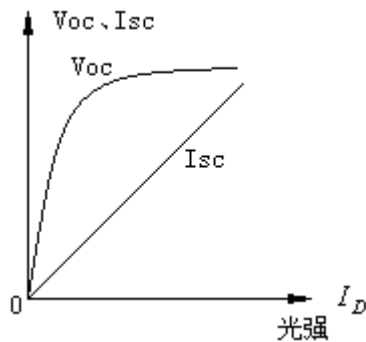


图 3 开路电动势、短路电流与光强关系曲线

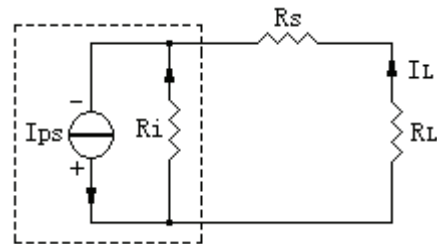


图 4 硅光电池等效电路

实验仪器

本实验仪分五个部分

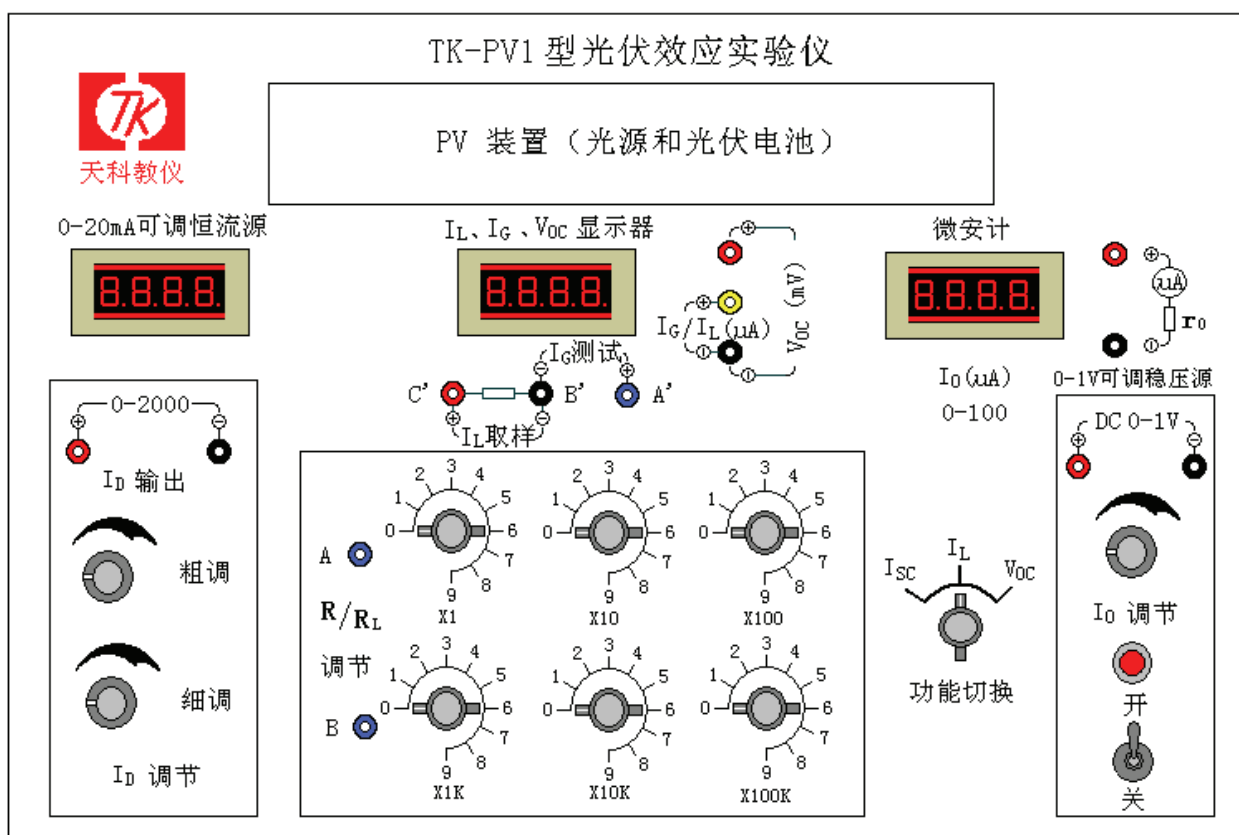


图 5 实验仪

1、PV 装置

PV 装置是一个内设光源和待测试样的暗箱，如图 6 所示。试样装在右侧箱壁，设有红、黑两个接线孔。红色对应于光生电压正极。光源装在一圆管的前端，并固定在左右、上下可调的标尺上，以调节光源与试样的距离和试样表面光照度。箱顶部设有观察窗，便于检查光源工作正常与否。逆时针水平旋动观察窗手柄为开启。注意：操作时只许轻轻水平拨动手柄，严禁朝下按压手柄。

LED 的电源输入端设有多个驱动插孔，其中黑色为电源公共端，其他红、绿、蓝接口分别对应 R、G、B 光。

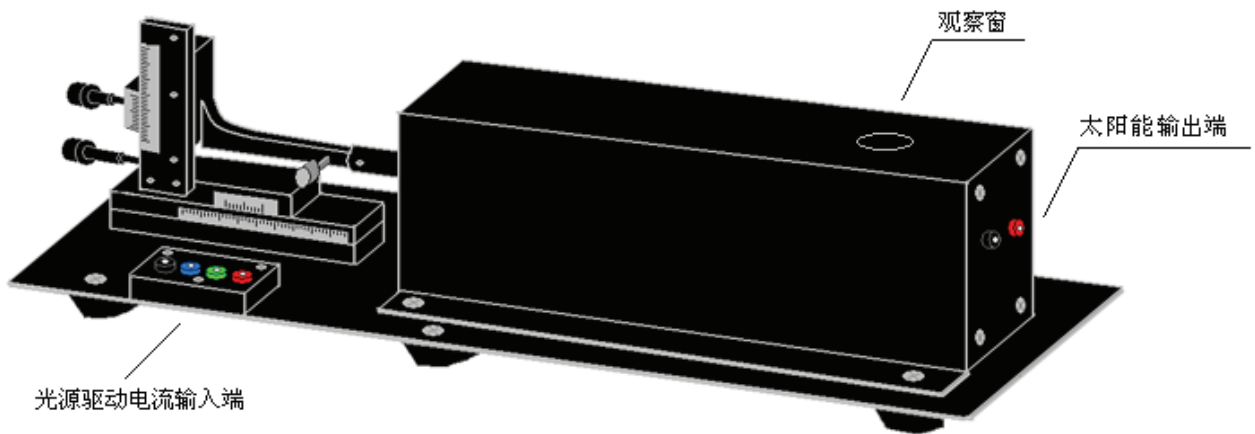


图 6 PV 装置

暗箱内三色 LED 发光管和太阳能电池示意图如图 3 所示：

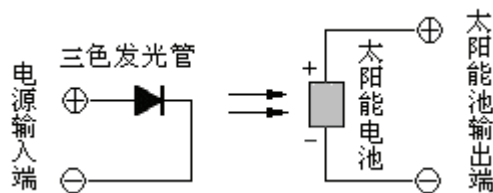


图 7 暗箱内光源与太阳能电池示意图

2、LED 驱动电流源

提供 LED 驱动电流 I_D ，由 I_D 调节和显示两部分组成，位于实验箱的左边。 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使其稳定）。 I_D 输出的红、黑两插孔分别与 PV 装置的光源驱动输入端对应连接。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。

3、功能切换开关

功能切换开关位于实验箱右边，分别有 I_{SC} 、 I_L 、 V_{OC} 三档。 I_0 （微安表）只在测量 I_{SC} 时开启，当测量 I_L 和 V_{OC} 时 I_0 （微安表）将被自动关闭。

4、DC 0~1V 稳压源

0~1V 可调电压源位于实验箱的最右边，在测量 I_{SC} 时作为外加电源。当 I_{SC} 测量结束时关闭该电源的输出。

5、电阻箱

电阻箱位于实验箱的中部，其量程为 $999.999\text{K}\Omega$ 。在测量 I_{SC} 时该电阻箱作为平衡电阻 R 使用，在测量太阳能电池输出性能实验时作为可调的外接负载 R_L 使用。

实验内容

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。

4、测量开路电动势 V_{OC} 与光强 I_D 的关系

测量线路如图 8 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)，有光线漏进装置中，使得 V_{OC} 显示不为 0，实验时应将此数值记录下来，并在数据的后继处理时将其减去。

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。

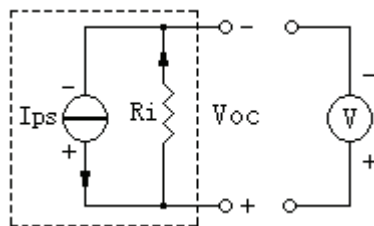


图 8 测量开路电压 V_{OC} 线路图

5、短路电流 I_{SC} 的测量

测量线路图如图 9 所示。将功能切换开关打到 I_{SC} 档；调节 DC 0-1V 电源 U_s 输出，使微安表读数 I_0 为 10.00-18.00 μA （建议取 10.00 μA ）。

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 $I R = I_0 r_0$ ，即短路电流

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

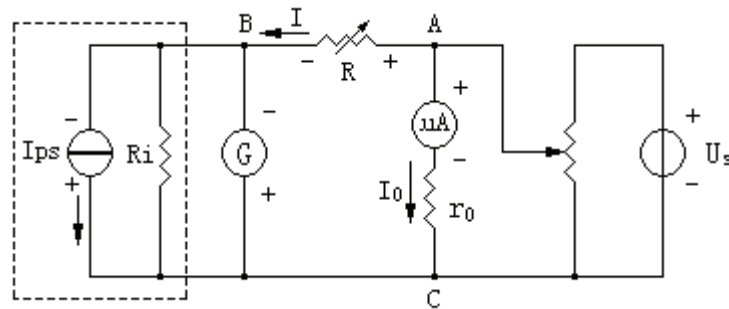


图 9 测量短路电流 I_{SC} 线路图

测量不同光强下，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。

6、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）。

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

7、流过负载电流 I_L 与负载两端电压 V_L 关系测量

选择三色 LED 中任意一种光源进行实验。

测量线路如图 10 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 $V_L = I_L R_L$ ，将数据记入表 3，并绘制 $I_L \sim V_L$ 曲线。

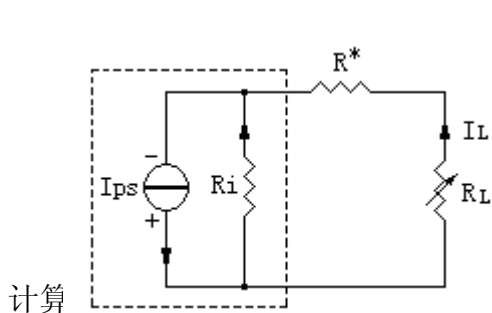


图 10 负载特性测量线路图

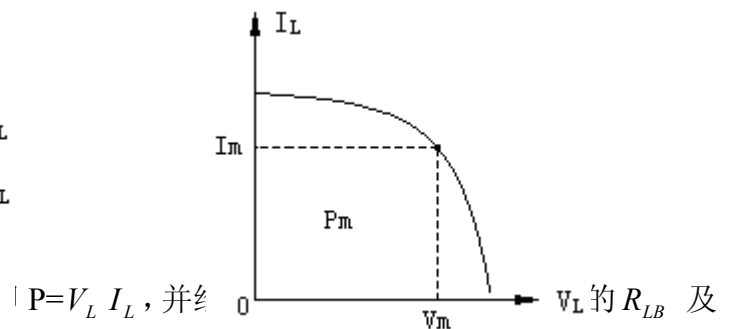


图 11 光电流与负载电阻
两端电压关系曲线

填充因子 $FF = \frac{P_m}{V_{OC}I_{SC}}$ 。

思考题

- 1、开路电压 V_{OC} 、短路电流 I_{SC} 如何随光强而变化？为什么开路电压 V_{OC} （硅）的最大值不超过 0.6V？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？并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？
- 4、试就本实验测定 I_{SC} 的方法与用图 2 伏安特性曲线确定 I_{SC} 的方法，进行讨论。