

实验六 太阳能电池伏-安特性的测量

太阳能电池(Solar Cells),也称为光伏电池,是将太阳光辐射能直接转换为电能的器件.由这种器件封装成太阳能电池组件,再按需要将一块以上的组件组合成一定功率的太阳能电池方阵,经与储能装置、测量控制装置及直流-交流变换装置等相配套,即构成太阳能电池发电系统,也称为之光伏发电系统.它具有不消耗常规能源、无转动部件、寿命长、维护简单、使用方便、功率大小可任意组合、无噪音、无污染等优点.世界上第一块实用型半导体太阳能电池是美国贝尔实验室于1954年研制的.经过人们40多年的努力,太阳能电池的研究、开发与产业化已取得巨大进步.目前,太阳能电池已成为空间卫星的基本电源和地面无电、少电地区及某些特殊领域(通信设备、气象台站、航标灯等)的重要电源.随着太阳能电池制造成本的不断降低,太阳能光伏发电将逐步地部分替代常规发电.近年来,在美国和日本等发达国家,太阳能光伏发电已进入城市电网.从地球上化石燃料资源的渐趋耗竭和大量使用化石燃料必将使人类生态环境污染日趋严重的战略观点出发,世界各国特别是发达国家对于太阳能光伏发电技术十分重视,将其摆在可再生能源开发利用的首位.因此,太阳能光伏发电有望成为21世纪的重要新能源.有专家预言,在21世纪中叶,太阳能光伏发电将占世界总发电量的15%~20%,成为人类的基础能源之一,在世界能源构成中占有一定的地位.

【实验目的】

1. 了解太阳能电池的工作原理及其应用;
2. 测量太阳能电池的伏-安特性曲线.

【实验原理】

1. 太阳能电池的结构

以晶体硅太阳能电池为例,其结构示意图如图1所示.晶体硅太阳能电池以硅半导体材料制成大面积pn结进行工作.一般采用 n^+p 同质结的结构,即在约 $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 面积的p型硅片(厚度约 $500\text{ }\mu\text{m}$)上用扩散法制作出一层很薄(厚度 $\sim 0.3\text{ }\mu\text{m}$)的经过重掺杂的n型层.然后在n型层上面制作金属栅线,作为正面接触电极.在整个背面也制作金属膜,作为背面欧姆接触电极.这样就形成了晶体硅太阳能电池.为了减少光的反射损失,一般在整个表面上再覆盖一层减反射膜.

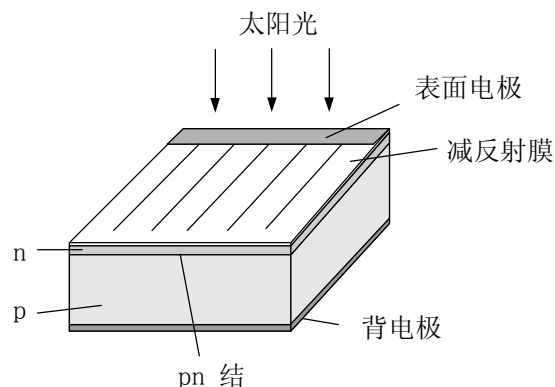


图1 晶体硅太阳能电池的结构示意图

2. 光伏效应

当光照射在距太阳能电池表面很近的pn结时,只要入射光子的能量大于半导体材料的禁

带宽度 E_g ，则在 p 区、n 区和结区光子被吸收会产生电子-空穴对。那些在结附近 n 区中产生的少数载流子由于存在浓度梯度而要扩散。只要少数载流子离 pn 结的距离小于它的扩散长度，总有一定几率扩散到结界面处。在 p 区与 n 区交界面的两侧即结区，存在一空间电荷区，也称为耗尽区。在耗尽区中，正负电荷间形成一电场，电场方向由 n 区指向 p 区，这个电场称为内建电场。这些扩散到结界面处的少数载流子（空穴）在内建电场的作用下被拉向 p 区。同样，如果在结附近 p 区中产生的少数载流子（电子）扩散到结界面处，也会被内建电场迅速被拉向 n 区。结区内产生的电子-空穴对在内建电场的作用下分别移向 n 区和 p 区。如果外电路处于开路状态，那么这些光生电子和空穴积累在 pn 结附近，使 p 区获得附加正电荷，n 区获得附加负电荷，这样在 pn 结上产生一个光生电动势。这一现象称为**光伏效应**（Photovoltaic Effect, 缩写为 PV）。

3. 太阳能电池的表征参数

太阳能电池的工作原理是基于光伏效应。当光照射太阳能电池时，将产生一个由 n 区到 p 区的**光生电流** I_{ph} 。同时，由于 pn 结二极管的特性，存在正向二极管电流 I_D ，此电流方向从 p 区到 n 区，与光生电流相反。因此，实际获得的电流 I 为

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV_D}{nk_B T}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

式中 V_D 为结电压， I_0 为二极管的反向饱和电流， I_{ph} 为与入射光的强度成正比的光生电流，其比例系数是由太阳能电池的结构和材料的特性决定的。 n 称为理想系数（ n 值），是表示 pn 结特性的参数，通常在 1~2 之间。 q 为电子电荷， k_B 为波尔茨曼常数， T 为温度。

如果忽略太阳能电池的串联电阻 R_s ， V_D 即为太阳能电池的端电压 V ，则（1）式可写为

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nk_B T}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

当太阳能电池的输出端短路时， $V=0$ ($V_D \approx 0$)，由（2）式可得到**短路电流**

$$I_{sc} = I_{ph} \quad (3)$$

即太阳能电池的短路电流等于光生电流，与入射光的强度成正比。当太阳能电池的输出端开路时， $I=0$ ，由（2）和（3）式可得到**开路电压**

$$V_{oc} = \frac{nk_B T}{q} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right) \quad (4)$$

当太阳电池接上负载 R 时, 所得的负载伏-安特性曲线如图 2 所示. 负载 R 可以从零到无穷大. 当负载 R_m 使太阳电池的功率输出为最大时, 它对应的**最大功率** P_m 为

$$P_m = I_m V_m \quad (5)$$

式中 I_m 和 V_m 分别为**最佳工作电流**和**最佳工作电压**. 将 V_{oc} 与 I_{sc} 的乘积与最大功率 P_m 之比定义为**填充因子** FF , 则

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} I_{sc}} = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (6)$$

FF 为太阳电池的重要表征参数, FF 愈大则输出的功率愈高. FF 取决于入射光强、材料的禁带宽度、理想系数、串联电阻和并联电阻等.

太阳电池的**转换效率** η 定义为太阳电池的最大输出功率与照射到太阳电池的总辐射能 P_{in} 之比, 即

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} \times 100\% \quad (7)$$

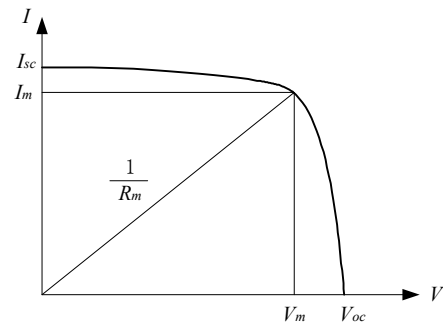


图 2 太阳电池的伏-安特性曲线

4. 太阳电池的等效电路

太阳电池可用 pn 结二极管 D 、恒流源 I_{ph} 、太阳电池的电极等引起的串联电阻 R_s 和相当于 pn 结泄漏电流的并联电阻 R_{sh} 组成的电路来表示, 如图 3 所示, 该电路为太阳电池的等效电路. 由等效电路图可以得出太阳电池两端的电流和电压的关系为

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left\{ \frac{q(V + R_s I)}{nk_B T} \right\} - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (8)$$

为了使太阳电池输出更大的功率, 必须尽量减小串联电阻 R_s , 增大并联电阻 R_{sh} .

【实验仪器】

1. 太阳能光伏组件, 功率为 5 瓦.
2. 辐射光源, 300 瓦卤钨灯.
3. 数字万用表, 2 个.
4. 可变电阻 2 个, 接线板.

【实验内容】

1. 将太阳能光伏组件，数字万用表，负载电阻通过接线板连接成回路，改变负载电阻 R ，测量流经负载的电流 I 和负载上的电压 V ，即可得到该光伏组件的伏-安特性曲线。测量过程中辐射光源与光伏组件的距离要保持不变，以保证整个测量过程是在相同光照强度下进行的。

2. 分别测量以下几种条件下光伏组件的伏-安特性曲线：

- (1) 辐射光源与光伏组件地距离为 60 cm；
- (2) 辐射光源与光伏组件地距离为 80 cm；
- (3) 辐射光源与光伏组件地距离为 80 cm，将两组光伏组件串联；
- (4) 辐射光源与光伏组件地距离为 80 cm；，将两组光伏组件并联。

3. 用坐标纸或计算机绘图软件画出不同条件下：

- (1) 光伏组件的伏-安特性曲线；
- (2) 光伏组件的输出功率 P 随负载电压 V 的变化；
- (3) 光伏组件的输出功率 P 随负载电阻 R 的变化。确定不同条件下光伏组件的短路电流 I_{sc} ，开路电压 V_{oc} ，最大功率 P_m ，最佳工作电流 I_m 、工作电压 V_m 及负载电阻 R_m ，填充因子 FF ，并将这些实验数据列在一表格内进行比较。

【注意事项】

1. 辐射光源的温度较高，应避免与灯罩接触。
2. 辐射光源的供电电压为 220V，应小心触电。

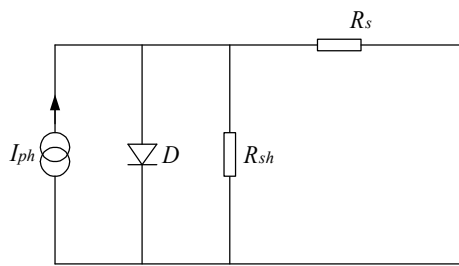


图3 太阳电池的等效电路