

**目标**

记录光伏模块（太阳能电池）与照度的函数关系特征

**实验过程**

- 测定在不同照明水平之下的光伏模块（太阳能电池）的I-U特征。
- 把测得的特征与按照单二极管模型计算得到的特征进行比较。
- 确定多种照明水平之下无荷载电压与短路电流之间的相互关系。

**概要**

光伏系统把来自于太阳光的光能转化为电能。为了达到这一目的，使用了太阳能电池，由经过适当掺杂的硅制作而成，因此与放大的光电二极管相对应。太阳能电池所吸收的光，从其晶体键上释放出载荷子，形成与p-n结正向相反方向的光电流。太阳能电池的二极管电流限制了向外部负载的电流输出。当处于所谓的无负载或者空载电压 $U_{oc}$ 状态时，由于光电电流与二极管电流恰好相互抵消，因此这一电流值为零。只有当施加的电压超过无负载电压时，电流才变为负值。当达到正电流范围时，太阳能电池可作为一个发电机运转，向外部负载输出电能。在实验中，这一发电机的电压-电流特征以照明级别的函数方式进行测量，并采用一组简单的参数进行表述。

**所需设备**

数量	描述	编号
1	SEK 太阳能 (230 V, 50/60 Hz)	1017732 or
	SEK 太阳能 (115 V, 50/60 Hz)	1017731
1	直流电源 0 - 20 V, 0 - 5 A (230 V, 50/60 Hz)	1003312 or
	直流电源 0 - 20 V, 0 - 5 A (115 V, 50/60 Hz)	1003311

**基本原理**

光伏一词，是由希腊语中的phos（光）和意大利语Volta（伏特）共同组成。这是为了纪念Allessandro Volta，他发明了第一个功能性电化学电池。光伏系统可以把从太阳光中“可无限获取又免费的”光能转化为电能，且不会产生任何CO<sub>2</sub>排放。为了达到这一目的，需要使用太阳能电池，在大部分情况下，太阳能电池是由经过适当掺杂的硅晶体制作而成，因此相当于是一个放大的光电二极管。在达到太阳能电池的外接之前，首先太阳能电池所吸收的光从其晶体键中释放出载流子（内光电效应），因为通过适当掺杂的p-n结所达成的电场，电子偏移至n-掺杂侧，空穴则偏移至p-掺杂侧（图1）。这也就是为什么产生的光电流与p-n结的正向相反，从而能够向外部负载输出电能。

光电流  $I_{ph}$  与光照水平  $\Phi$  成正比:

$$(1) \quad I_{ph} = \text{const} \cdot \Phi$$

其与正向或者传导方向上的二极管电流重合

$$(2) \quad I_D = I_s \cdot \left( \exp\left(\frac{U}{U_T}\right) - 1 \right)$$

$I_s$ : 饱和电流,  $U_T$ : 温度电压

触点之间电压  $U$  超出扩散电压  $U_D$  越多, 就会变得越强。因此, 外部荷载可获得的电流  $I$  输出受到二极管的限制:

$$(3) \quad I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_s \cdot \left( \exp\left(\frac{U}{U_T}\right) - 1 \right)$$

当处于所谓的无荷载或者空载电压  $U_{oc}$  状态时, 因为光电流与二极管电流恰好相互抵消, 因此这一电流值为零。只有当施加的电压  $U > U_{oc}$  时, 电流才变为负值。当达到正电流范围时, 太阳能电池可作为一个发电机运转, 向外部荷载输出电能。公式 (3) 表达出的就是这一发电机的 I-U 特征。由于在实际情况中, 光电流  $I_{ph}$  远高于饱和电流  $I_s$ , 因此我们可以通过公式 (3) 推导出空载电压的以下所列关系式:

$$(4) \quad U_{oc} = U_T \cdot \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s}\right).$$

如果太阳能电池的终端短路, 则电池会供应短路电流  $I_{sc}$ , 与光电流相对应, 因为按照公式 (3),  $U = 0$ 。因此, 我们得到

$$(5) \quad U_{oc} = U_T \cdot \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_s}\right) \text{ where } I_{sc} = I_{ph}$$

公式2列出了在所谓标准模型的框架中的二极管响应。此处的饱和电流  $I_s$  是一个与材料相关的变量, 取决于太阳能电池的几何形状数据以及电力学数据。针对温度电压  $U_T$ , 以下所列公式适用:

$$(6) \quad U_T = \frac{m \cdot k \cdot T}{e}$$

$m = 1 \dots 2$ : 理想因子

$k$ : 玻尔兹曼常数,  $e$ : 元电荷,  
 $T$ : 开氏温度

在对特征进行更为精准的验证情况下, 在太阳能电池边缘的泄漏电流, 以及在 p-n 结上的点状短路也会被纳入考虑, 可使用并联电阻  $R_p$  进行模拟。这样公式3就变形为

$$(7) \quad I = I_{ph} - I_s \cdot \left( \exp\left(\frac{U}{U_T}\right) - 1 \right) - \frac{U}{R_p}$$

因此, 为了能够得到范围在 20–50V 的可供有效利用的电压, 在实践中, 我们会看到多个太阳能电池以串联的方式连接在一起。采用串联的方式连接了 18 个太阳能电池, 在实验中使用照度可变的卤素灯对其进行照射, 并记录这一太阳能模块的电流–电压特征在不同光度情况下的数据。

## 评价

光伏模块的电流–电压特征 (图2) 可使用公式7进行表达, 如果不管光照度的话, 相同组参数, 即  $I_s$ 、 $U_T$  和  $R_p$  被插入, 光电流  $I_{ph}$  被选择作为光度的函数。

显然, 温度电压是公式6中预计数值的 18 倍, 因为这一模块中包含了以串联方式连接的 18 个太阳能电池。

提供了一个并联电路, 由理想电源、18 个串联连接的半导体二极管和欧姆电阻组成, 参见图3, 以获得光伏模块的等效光路图。这一电源提供了与光度相关的相反方向的电流。

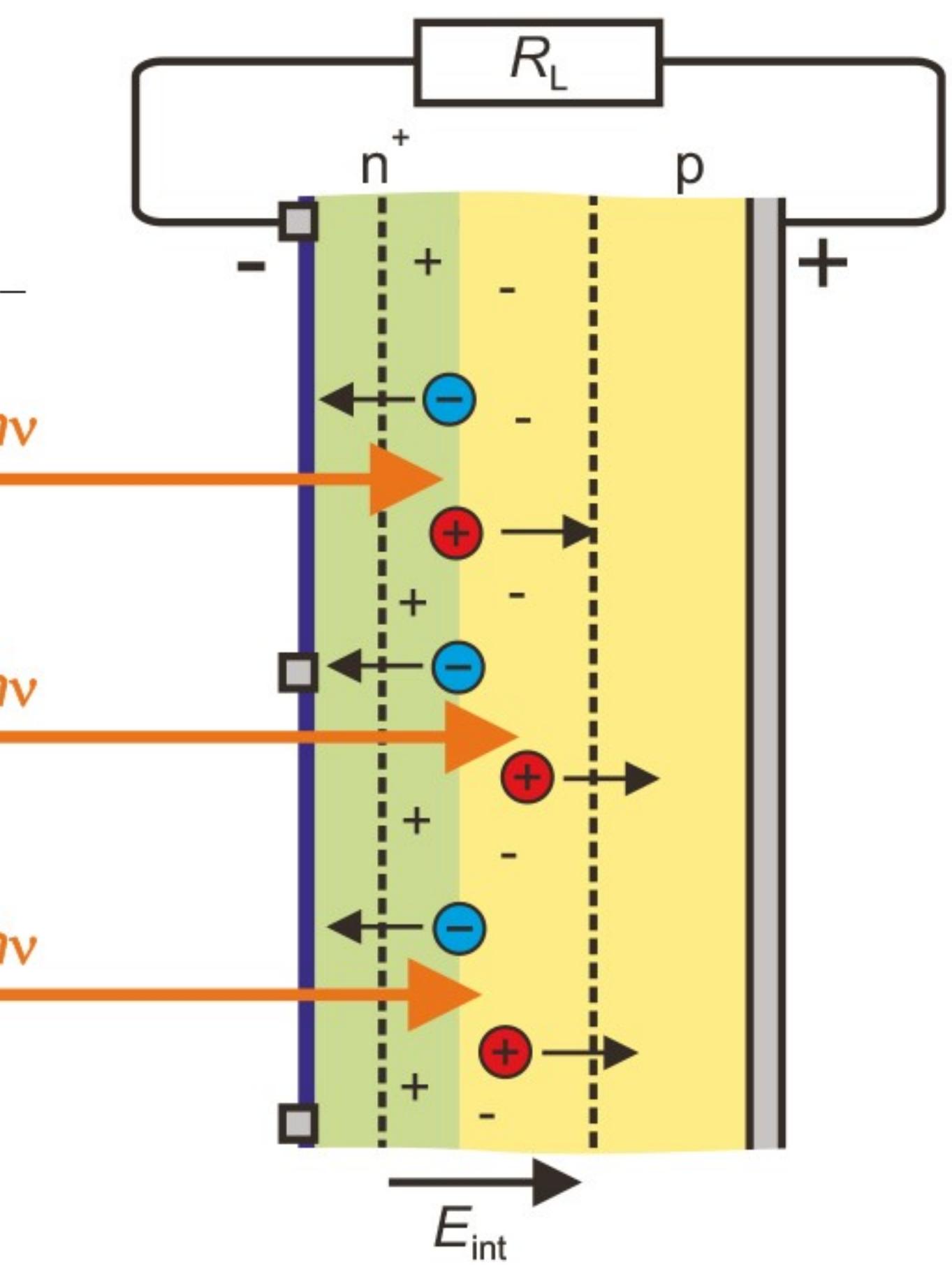


图 1: 太阳能电池作为半导体部件的示意图,  $n^+$ : 高度n-掺杂区域,  $p$ :

- ①: 因为光吸收所产生的移动空穴,
- ②: 因为光吸收所产生的自由电子,
- +: “固定”正电荷,
- : “固定”负电荷,
- $E_{int}$ : 由空间电荷差所施加的电场,  $R_L$ : 负载电阻

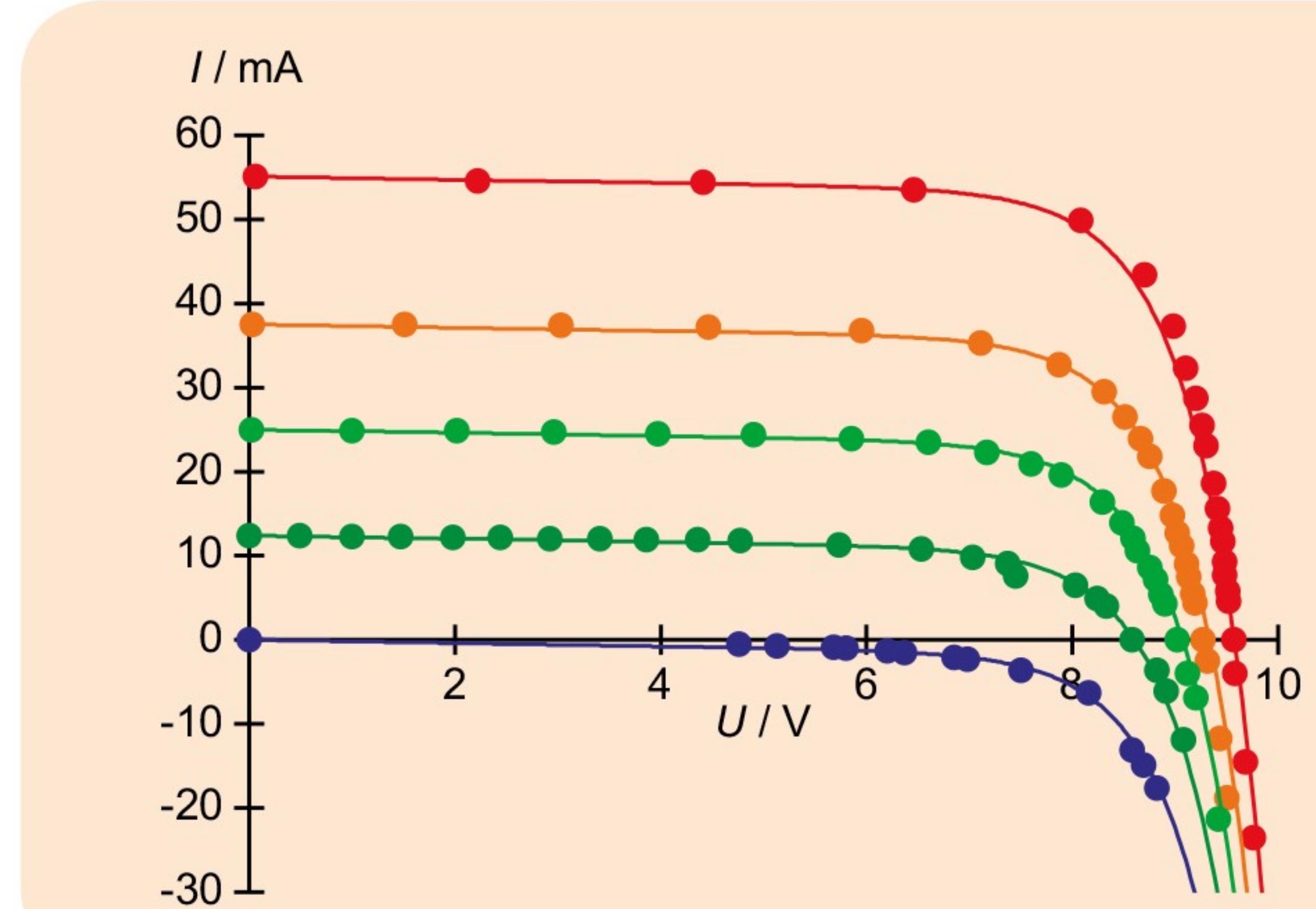


图 2: 五种不同照度条件下光伏模块的电流–电压特征

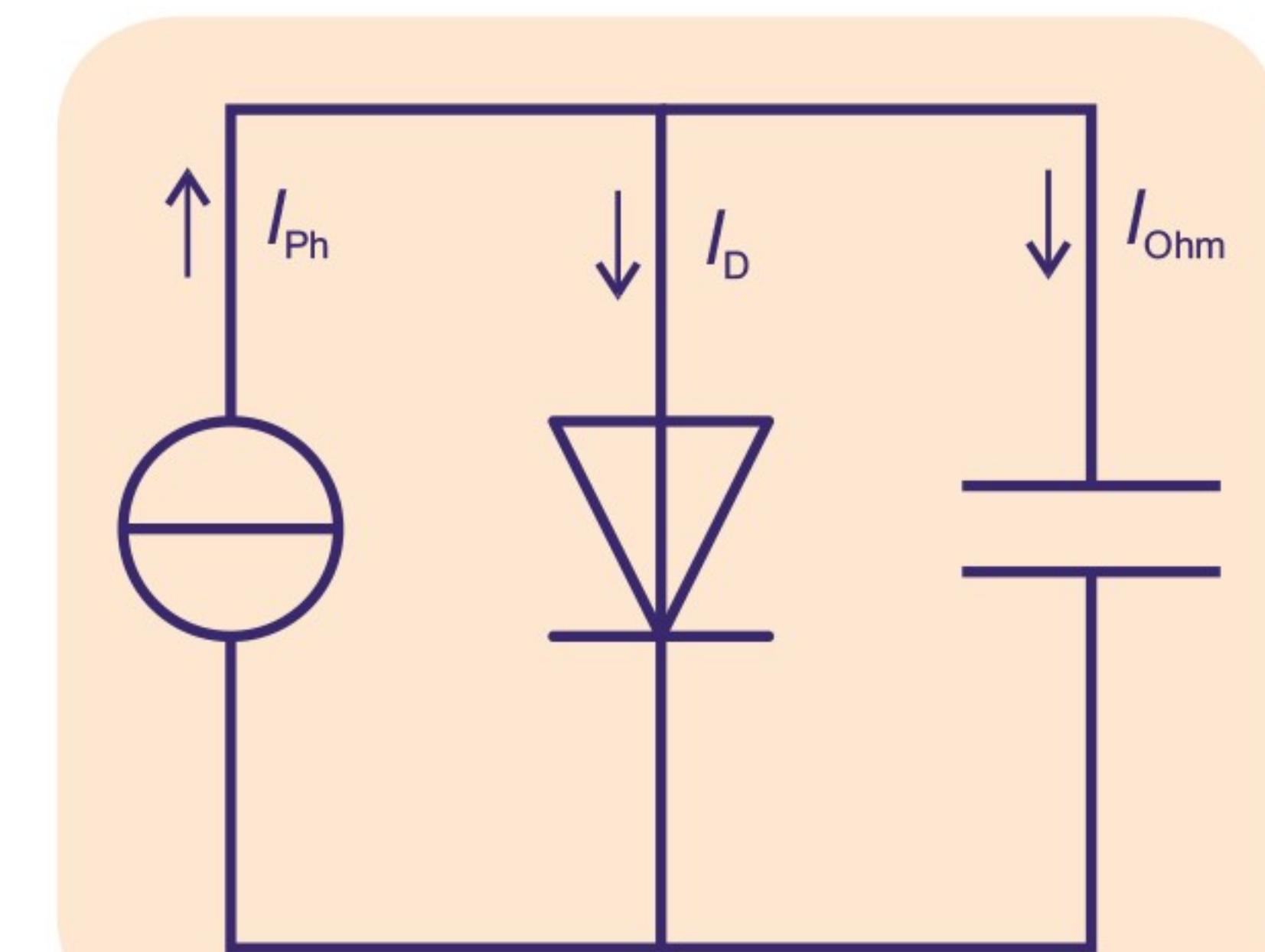


图 3: 光伏模块的等效电路图