

太阳能电池实验

公用讲义

请勿拿走

东南大学物理实验中心

太阳能电池实验

1. 知识介绍

于煤、石油、天然气等主要能源的大量消耗，能源危机已经成为世界关注的问题。为了可持续性发展，人们大量开发了诸如风能、水能等清洁能源，其中以太阳能电池作为绿色能源的开发前景较大。本实验仪器旨在提高学生对太阳能电池基本特性的认识、学习和研究。

光电池是一种特殊的半导体元件，基于光生伏特效应能够将光能直接转化为电能。光生伏特效应是指半导体在光的照射下产生电动势的现象。

太阳能电池就是根据光伏发电原理将太阳能直接转换为电能的光电池，可以为器件提供电源。太阳能电池经过串联后，进行封装保护可制成大面积的太阳电池组件，再配合上功率控制器等部件就形成光伏发电装置。

光电技术，光能利用等在很多领域得到广泛应用。最早的光电池是用掺杂的氧化硅来制作的，其它的材料有硅、硒、锗、氧化亚铜、硫化镉、砷化镓等多种。这些用于制造光电池的半导体材料分为两种基本类型，正电型（或P型态）和负电型（或N型态）。

晶体中电子的数目总是与核电荷数目相等，所以单就P型和N型半导体而言是电中性的。当P型和N型半导体结合在一起时，在这两种半导体的交界面区域里会形成一个特殊的薄层。薄层N区的电子会扩散到P区，P区的空穴会扩散到N区，这是由于P型半导体多空穴，N型半导体多自由电子。一旦扩散就形成了一个由N指向P的“内电场”，从而阻止扩散进行，达到平衡后，就形成了一个具有电势差的特殊薄层，这就是P-N结。

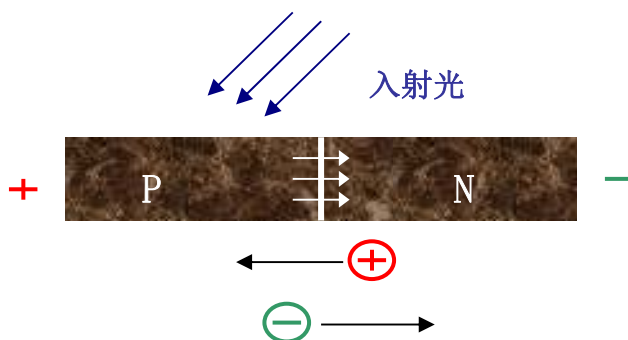


图 9-1 PN 结光生伏特效应原理图

在光电池上，光子将电子从P型和N型半导体中的共价键中激发出来，产生电子—空穴对。由于内电场作用，电子向带正电的N区运动，空穴向带负电的P区运动，在P区和N区

之间产生一个向外的电势差（图 9-1）。此时在 P 型层引出正极，在 N 型层引出负极，它们之间就会有电流通过，即利用光生伏特效应将光能被转化为电能。

光伏发电有许多优点：

太阳能取之不尽，用之不竭，基本无污染，是清洁能源；

太阳能发电几乎不受地域限制，太阳照射到的地方就可以利用太阳能发电；

光伏发电系统安全可靠、基本无噪声且维护成本低；

随着近年来微小型半导体逆变器的迅速发展，光电池的使用更加方便与快捷。

按制造太阳能电池的材料分类，可分为硅太阳能电池、化合物太阳能电池、燃料敏化太阳能电池和有机薄膜太阳能电池几种。其中硅太阳能电池（图 9-2、图 9-3）转换效率高达 10% 甚至 20% 以上，所以应用十分广泛。



图 9-2 太阳能便携式电源



图 9-3 各种型号硅光电池

2. 实验目的

- 1) 光电池负载特性的测量
- 2) 光电池开路电压随光强变化特性曲线的测量
- 3) 光电池短路电流随光强变化特性曲线的测量
- 4) 练习曲线作图实验主要内容

3. 实验原理

光电池的种类很多，但基本原理相同，下面重点介绍硅光电池。

硅光电池是在一块 N 型硅片上用扩散方法掺入一些 P 型杂质，形成 P-N 结，硅片的上表

面涂有一层防反射膜，其形状有圆形、方形、长方形，也有半圆形。当光照射到硅光电池上，在内部电场作用下，由光子产生的空穴和电子分别向 P 区和 N 区移动，使 P-N 结两端产生光生电动势。从硅光电池的 P、N 两区接出正、负极引线，就形成光电池，若光电池两端连接负载电阻，则将产生光电流。如图9-4所示。

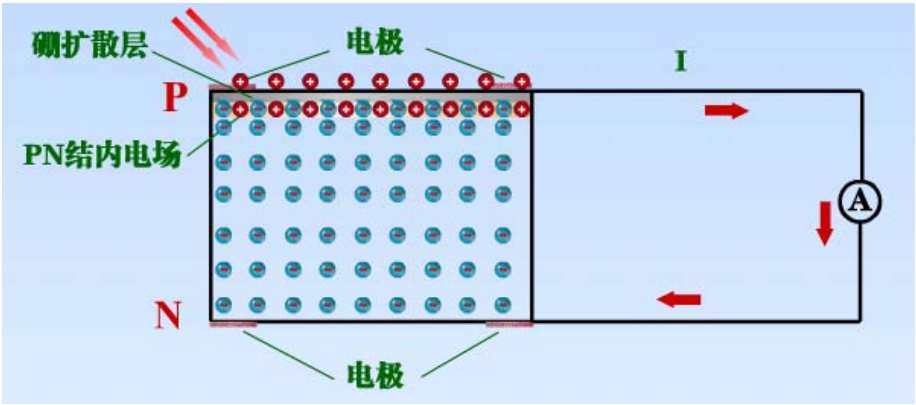


图 9-4 硅光电池的结构示意图

硅光电池的主要特性有：

1) 光谱响应特性

光谱响应是指光电池输出电讯号的大小和某个波长入射光功率之比，是光电探测器的一个重要性能指标，反应了光电探测器的灵敏度，决定了它的应用范围。制造光电池的材料不同，光谱响应峰值所对应的入射光波长是不同的，硅光电池波长在 780 nm 附近，硒光电池在 590nm 附近，更接近于人眼的灵敏度峰值。硅光电池的光谱响应波长范围为 400~1100nm，而硒光电池只能为 380~750nm，可见，硅光电池可以在很宽的波长范围内得到应用。把不同波长的光谱响应按波长排列，并画成曲线，这就是光谱响应曲线。通常是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响应度分布曲线，如图 9-5 所示是硅和硒的光谱相对响应度分布曲线。

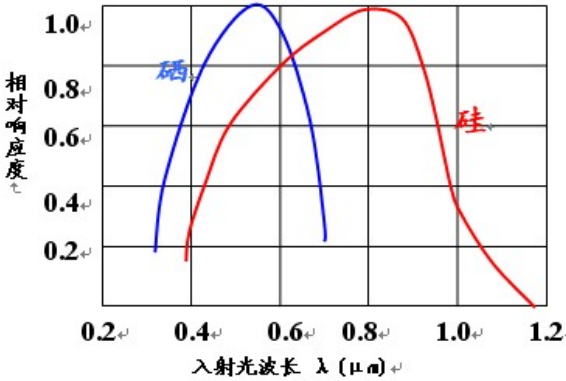


图 9-5 光谱相对响应度曲线

2) 负载特性

在一定的光强下，测量硅光电池的输出功率情况：在光电池输出端接负载电阻 R_L 时，则有对应的端电压、负载电流和输出功率。只有当 R_L 为某一定值时，光电池的输出功率达到最大，此时的阻值就是最佳匹配电阻大小，能量转换效率最高。如图 9-6 所示，在该光强下的最佳匹配电阻阻值为 2000Ω 左右。在一些实际应用中，必须考虑最佳匹配电阻的选取。

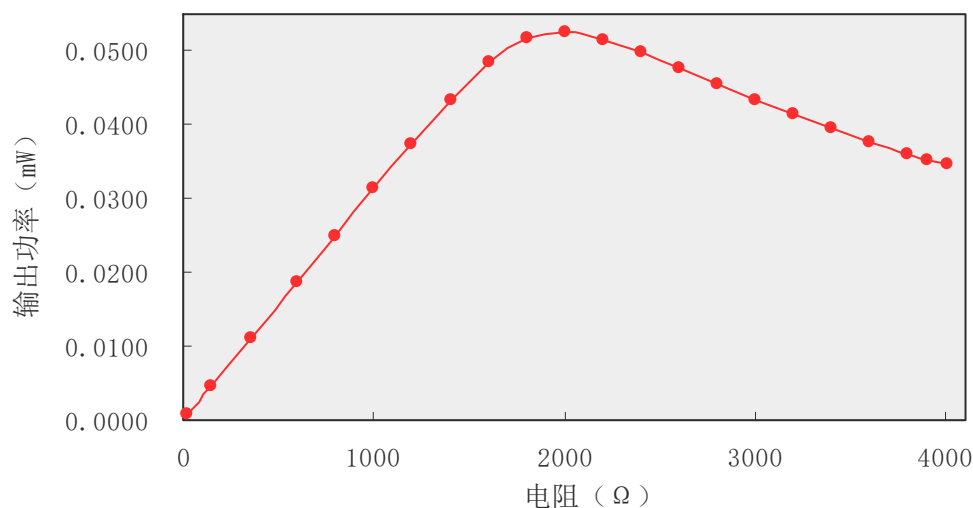


图 9-6 硅光电池负载特性曲线

3) 光电特性

光电池在不同光的照度下，其光电流和光生电动势是不同的，它们之间的关系就是光电特性。当硅光电池两端开路时，测得输出的电压为开路电压 U_{oc} ，光电池的开路电压 U_{oc} 与光强的对数成正比（图 9-7）；当输出端短路时通过光电池的电流，称短路电流 I_{sc} ，短路电流 I_{sc} 和光强成正比（图 9-8），所以为了获得好的线性响应，负载电阻应该取得小。

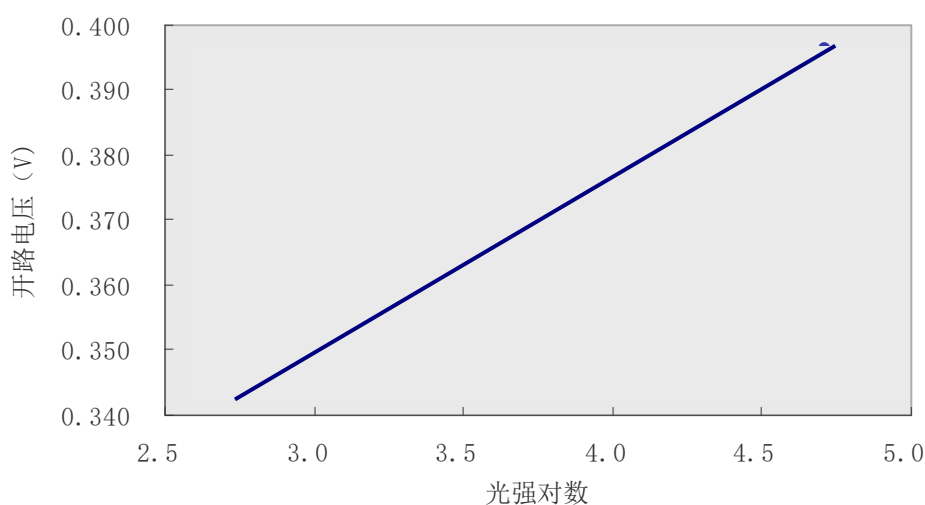


图 9-7 开路电压与光强对数成正比

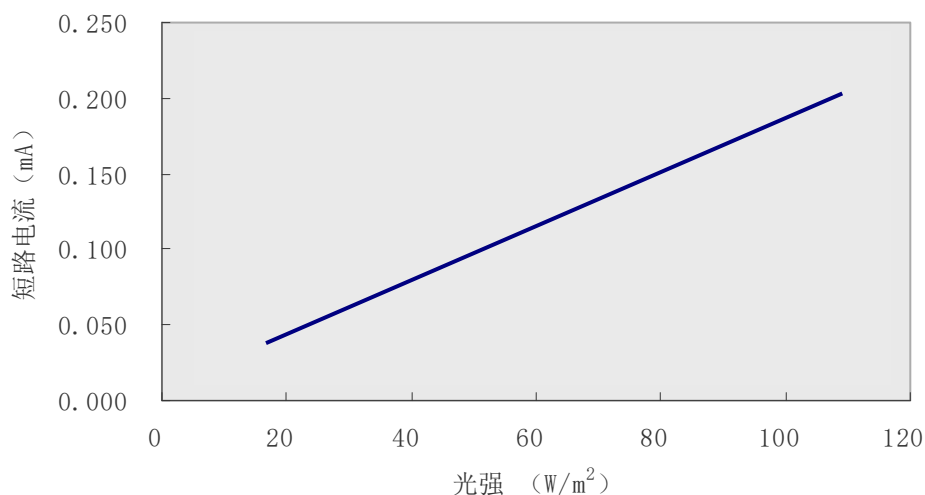


图 9-8 短路电流 I_{sc} 与光强成正比

4) 温度特性

光电池的温度特性是描述光电池的开路电压和短路电流随温度变化的特性。由于它关系到应用光电池的仪器设备的温度漂移，影响到测量精度或控制精度等重要指标，因此温度特性是光电池的重要特性之一。同常开路电压随温度升高而下降的速度较快，短路电流随温度升高而缓慢增加（图 9-9），所以在实际应用光电器件时，必须注意温度变化带来的影响。

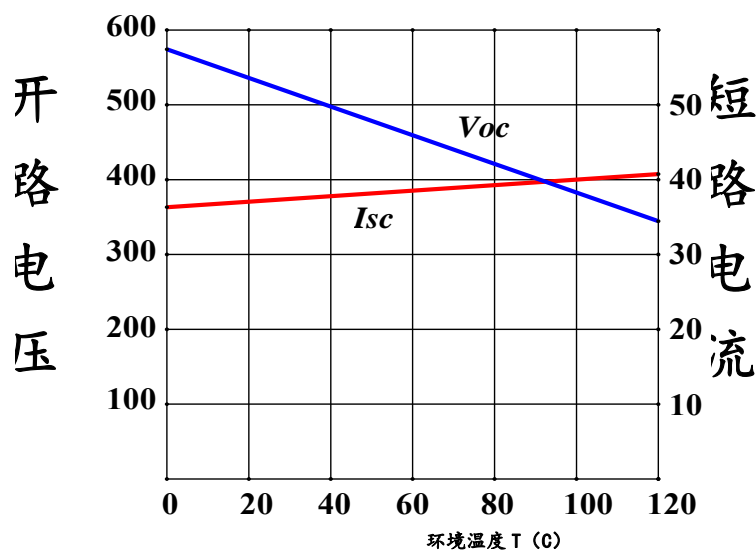


图 9-9 光电池的温度特性曲线

4. 实验仪器

整套仪器包括：太阳能电池实验仪主机、太阳能电池实验仪电机箱、4 块太阳能电池板、连线若干、60W 标准大螺口飞利浦球形长寿型白炽灯一个、挡板。



图 9-10 LB-SC 太阳能电池实验仪

特点:

本仪器采用立式结构，以防止横置光源对其他学生的影响；光源采用白炽灯，光强 5 档可调，更换方便；太阳能电池板 4 块：其中单晶硅太阳能电池、多晶硅太阳能电池各 2 块；太阳能电池开路电压最大 5V，短路电流最大 80mA，负载电阻 10K Ω 可调，加载电压 0 ~ 4V 可调；太阳能电池板俯仰可调，可模拟阳光在不同照射角度下对太阳能电池板吸收功率的影响。

注意事项:

- 1、红黑线的串并联过程中，需要将红线或黑线插入需要连接的线头的插孔。
- 2、白炽灯带高压，拆卸时需将电源关闭，不要带电插拔电源机箱后方的航空插头。

太阳能电池板分布:



1	3
2	4

1、2 号为多晶硅太阳能电池；

3、4 号为单晶硅太阳能电池；

太阳能电池板下方接线编号与 1、2、3、4 太阳能一一对应。

图 9-11 太阳能电池



图 9

图 9-12 LB-SC-1 光功率计

光功率计：

测量光功率有热学法和光电法，LB-SC-1 光功率计采用光电法，光电法具有较快的响应速度、良好的线性特性且灵敏度高、测量范围大等优点。光电法就是用光电检测光功率，实质上是测量光电检测器（即探头：光敏元件）在受光辐射后产生的微弱电流，该电流与入射到光敏面上的光功率成正比。“LB-SC-1 光功率计”可通过测得的光电流间接地得到对应的光功率，从而得到不同光强度的比值关系。

使用说明：

将“光功率计”探头放置于恒稳光源下，此时“光功率计”表头有示数显示，通过调节“调整”电位器，使表头指针指示位于可读的整数值，一般选取满偏 100 为最大光强值。改变光源光强度，通过表头示数显示来计算得到改变光强值与最大光强值得比值，即为光强比。

光强比=待测光强表头显示示数 / 最大光强表头显示示数

若选取最大光强表头为 100（满偏），即待测光强与最大光强的光强比直接读取表头示数即可。

5. 实验内容

1、测量光照状态下太阳能电池的短路电流 I_{sc} 、开路电压 U_{oc} 、最大输出功率 P_m ，最佳负载及填充因子 FF；

没有光照的情况下，太阳能作为一个二极管器件，测量在正向偏压的情况下，太阳能电池的伏安特性曲线，求出正向偏压时，电压与电流的经验公式；

3、测量太阳能电池的短路电流 I_{sc} 、开路电压 U_{oc} 与相对光强的关系，求出近似函数关系并对比开路电压和短路电流的关系；

4、测量不同角度光照下的太阳能电池板的开路电压、短路电流；

5、测量太阳能电池板的串联并联特性。

实验步骤

通过以下步骤的实验，学生可以从中了解太阳能电池的光伏特性和二极管特性。

(1) 打开电机箱电源，将控制白炽灯电源的“开灯/关灯”开关置于“开灯”，并把“亮度调节”旋钮调到最小；

(2) 将太阳能电池的插头用线连接到电机箱相同颜色的插头上（注意连接插头时要连接同一块电池板的两个插头），将“明暗状态开关”拨到“明状态”，加载电压调到 0V，“负载调节”

（调节负载电阻）旋钮逆时针调到最小，用遮光板遮住光源，此时电流表上有电流显示，这是外界光产生的光电流；

调节亮度调节旋钮将灯源亮度调到最强，将负载电阻电位器调零后，此时对应的电流为短路电流 I_{sc} ，调节电机箱上的负载电阻由最小逐渐调到 $8K\Omega$ 【注：本实验控制箱“负载调节”调节负载电阻部分采用“指针式多圈电位器”，一般调节负载电阻时，调节至 $7K\Omega$ - $8K\Omega$ 已满足实验要求，由于该电位器在最小值“0”位和最大值“ $10K\Omega$ ”位指针指示均为“0”，因此学生在实验中应尽量避免将负载电阻悬至最大值。具体使用说明和注意事项见附录部分】可以看见光电流及负载电压的变化，每调一次电阻值都要记录下对应的阻值并记录下对应的负载的电压和电流，直到电压在相邻两次到三次调电阻时都保持不变为止（保持稳定），这说明太阳能电池已经达到其开路状态，此时记录的电压即为开路电压 U_{oc} 。

把记录下的所有数据填写在表格 1 中：

表 1 最大功率曲线数据

负载电阻 $R/K\Omega$	负载电压 U/V	光电流 I/mA	功率 $P(\mu W)$

所得数据为不同负载下，太阳能电池负载的电流和电压，计算出负载电阻和功率的数值，并绘制出关系曲线，找出功率的最大值，利用公式 1 计算出太阳能电池的填充因子 FF：

$$FF = \frac{P_{\max}}{I_{sc} U_{oc}} \quad (1)$$

(4) 将“光功率计探头”置于太阳能板的中心位置，并旋转“亮度调节”旋钮使白炽灯亮度最大，此时调节“LB-SC-1 光功率计”上“调整”电位器使表头指针指示恰位于“100”即满偏位置,以此时的光强度为 100%。调节“亮度调节”旋钮，分别使光强比值为 90%、80%、70%、……、10%、0。每调节一次不同的光强比后取下探头，把负载电阻调到 8KΩ，记录下此时的开路电压，然后把负载电阻调到零，记录下此时的短路电流。

把记录下的所有数据填写在表格 2 中：

表 2 光强与太阳能输出性能关系数据

光强比值	I/mA	Uoc/V
100%		
90%		
80%		
70%		
60%		
50%		
40%		
30%		
20%		
10%		
0		

绘制 3 种关系曲线（光强比与开路电压、光强比与短路电流以及开路电压与短路电流），分析它们之间的相互关系。

（5）俯仰角测量：

将灯源亮度调到最亮，调节太阳能电池板的俯仰，每调节一次记录太阳能电池板的开路电压及短路电流，填入表 3。比较不同照射角度对太阳能电池板输出的影响，太阳能电池输出可根据开路电压、短路电流及填充因子计算得到。

表 3 太阳能电池俯仰角与输出关系数据

角度	开路电压	短路电流
0		
10		
20		
30		
40		
50		
60		

（6）串并联实验（选作）：

1、串联实验

将两个太阳能电池对应的红黑插座用插线串联起来（如图 4 用插线将左边的太阳能电池的黑插座连到右边太阳能电池的红插座上，并将剩余的两个插座与机箱上对应颜色的插座连接起来），此时重复光照状态下的测试实验，观察在最大照明状态下单个太阳能电池板的开路电压、短路电流与串联时的区别。并思考实际开路电压与理论上的不同之处。注意串联光电池应该是同一种类的。



图4 1、2号多晶串联

2、并联实验

将每个太阳能电池对应的红黑插座用插线并联起来（如图5用插线将左边的太阳能电池的插座连到右边太阳能电池相同颜色的插座上，将太阳能板上的插座与机箱上对应颜色的插座连接起来），此时重复光照状态下的测试实验，观察在最大照明状态下单个太阳能电池板的开路电压、短路电流与并联时的区别。并思考实际短路电流与理论上的不同之处。注意并联光电池应该是同一种类的。



图5 1、2号多晶并联

表 4 单晶和多晶串、并联数据

	1 号 多晶	2 号 多晶	3 号 单晶	4 号 单晶	多晶 串联	多晶 并联	单晶 串联	单晶 并联
开路电 压 V								
短路电 流 mA								

(7) 关闭白炽灯，用遮光板将太阳能电池完全盖住，将“明暗状态开关”拨到“暗状态”，这时太阳能电池处于全暗状态，并把可调电阻调到 **8K Ω** ，此时负载电压 U_2 是负载电阻两端电压，太阳能电池两端电压 U_0 等于加载电压 U_1 减去负载电压 U_2 。此时太阳能电池如同一二极管在工作，给它加正向偏压，由 0V 到 4V，并记录下太阳能电池负载电阻以及太阳能电池的正向偏压的变化，绘制表格 5 如下：

表 5 暗状态电压与电流关系数据

加载电压 U_1											
负载电压 U_2											
两端电压 U_0											
通过电流 $I(mA)$											

由数据绘制曲线，把它与二极管加正向偏压下的状态作个比较。

6、 拓展阅读

太阳能电池发展至今已有一百多年历史。早在 1839 年，法国物理学家安托石-贝克雷尔发现了光生伏特效应，制造了贝克雷尔电池，这种电池一经阳光照射，就会供给电流。1875 年，德国技师维尔纳-西门子制成第一个硒光电池，硒在光的作用下，不仅出现电阻的变化，而且在一定条件下还出现电动势，且有“阻挡层效应”，该效应是光电池的基本工作原理。1883 年，美国科学家查尔斯制造出第一个硒制太阳电池。二十世纪三十年代，硒制电池及氧化铜电池

被应用在一些对光线敏感的仪器上，例如光度计及照相机的曝光针。1946 年贝尔实验室的欧尔 (Russell Ohl) 开发出现代化的硅制太阳电池。1954 年，硅制太阳能电池的转化效率提高到 6% 左右，如何降低太阳能电池成本成为业内关心的重点。1974 年，Haynos 等人利用硅的非等方性的蚀刻特性，在太阳能电池表面的硅结晶面，蚀刻出许多类似金字塔的几何形状，有效降低了太阳光从电池表面的反射损失，太阳能电池的能源转换效率提高到 17%。

最初太阳能电池主要应用在人造卫星（图 9-13）、无人气象站等处。随着能源转换效率的提高和制作成本的降低，太阳能电池逐渐进入了人们的日常生活生产中，如太阳能汽车（图 9-14）、太阳能路灯、建造太阳能住宅（光电池作屋顶、外墙、窗户等，如图 9-15 所示）等等。此外，太阳能电池还可用于边远无电地区，为高原、海岛、边防哨所等军民生活用电的提供小型电源；为石油管道、石油钻井平台、海洋检测设备、气象、水文观测设备等提供电源等等。



图 9-13 人造卫星



图 9-14 太阳能汽车



图 9-15 太阳能房屋

1、太阳能电池填充因子（本实验选用 1 号太阳能板，实验数据仅供参考使用）

附录 指针式多圈电位器使用方法及注意事项

负载电阻的调节本仪器使用“指针式多圈电位器”，如下图所示。



一、 使用说明

- 外圈窗口示数分布：如上图中，位于该“指针式电位器”窗口内的数字表示 $1\text{K}\Omega$ 的整数倍。
- 内圈刻度分布：指针所指的两个整数之间分为 5 个小格，每一小格表示 $0.02\text{K}\Omega$ ；
- 指针指数：
 1. 指针所指的外圈窗口示数：若外圈窗口示数为“0”，则表示总电阻不足 $1\text{K}\Omega$ ，此时直接读内圈读数；若外圈窗口示数为“2”，则表示总电阻大于 $2\text{K}\Omega$ ；
 2. 指针所指的内圈示数：内圈中指针若指在整数处，此时阻值为 $0.1\text{K}\Omega$ 的整数倍。若指针指在“2”处，表示 $0.2\text{K}\Omega$ 。及内圈读数为 $0.2\text{K}\Omega$ ，总电阻需要参考外圈读数。
- 总电阻：总电阻阻值由外圈窗口内示数+内圈指针示数+指针所指的尾数。

例如：外圈窗口示数为 1，内圈指针指在 1-2 之间的第四小格刻度线上，则

$$\text{总电阻} = 1 + 0.1 + 0.02 \times 4 = 1.18\text{K}\Omega$$

二、 注意事项

本实验仪器“负载调节”调节负载电阻部分采用“指针式多圈电位器”，一般调节负载电阻时，调节至 $7\text{K}\Omega$ - $8\text{K}\Omega$ 已满足实验要求，由于该电位器在最小值“0”位和最大值“ $10\text{K}\Omega$ ”位指针指示均为“0”，为避免误操作损坏电位器，学生在实验中应尽量避免将负载电阻悬至最大值。