
太阳能电池的特性测量

一、实验简介

太阳电池(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、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, 太阳电池的研究、开发与产业化已取得巨大进步。目前, 太阳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, 如图1。随着太阳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。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地位。

二、实验原理

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(如图1)。那些在PN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, 总有一定几率的载流子扩散到结界面处。在p区与n区交界面的两侧即结区, 存在空间电荷区, 也称为耗尽区。在耗尽区中, 正负电荷间形成电场, 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)在内电场的作用下被拉向p区。同样, 在PN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拉向n区。结区内产生的电子-空穴对在内电场的作用下分别移向n区和p区。这导致在n区边界附近有光生电子积累, 在p区边界附近有光生空穴积累。它们产生一个与PN结的内建电场方向相反的光生电场, 在PN结上产生一个光生电动势, 其方向由p区指向n区。这一现象称为光伏效应(Photovoltaic effect)。

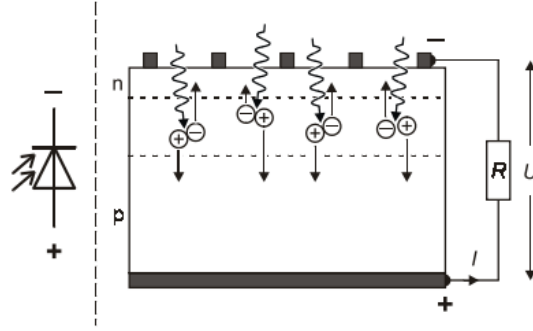


图1 太阳能电池的工作原理

太阳能电池的工作原理是基于光伏效应的。当光照射太阳电池时，将产生一个由n区到p区的光生电流 I_s 。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 为两个电流之差：

$$I = I_s(\Phi) - I_D U \quad (1)$$

如果连接一个负载电阻 R ，电流 I 可以被认为两个电流之差，即取决于辐照度 Φ 的负方向电流 I_s ，以及取决于端电压 U 的正方向电流 $I_D U$ 。

由此可以得到太阳能电池伏安特性的典型曲线(见图2)。在负载电阻小的情况下，太阳能电池可以看成是一个恒流源，因为正向电流 $I_D U$ 可以被忽略。在负载电阻大的情况下，太阳能电池相当于一个恒压源，因为如果电压变化略有下降那么电流 $I_D U$ 迅速增加。

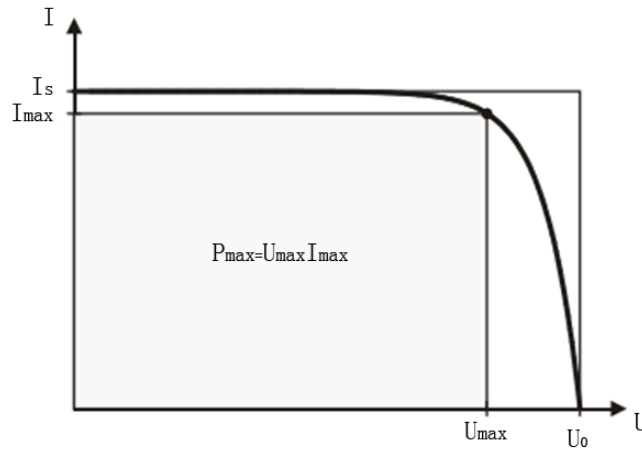


图2 在一定光照强度下太阳能电池的伏安特性(U_{\max} , I_{\max} : 最大功率点)

当太阳电池的输出端短路时，可以得到短路电流，它等于光生电流 I_s 。当太阳电池的输出端开路时，可以得到开路电压 U_0 。

在固定的光照强度下，光电池的输出功率取决于负载电阻 R 。太阳能电池的输出功率在负载电阻为 R_{\max} 时达到一个最大功率 P_{\max} ， R_{\max} 近似等于太阳能电池的内阻 R_i 。

$$R_i = \frac{U_0}{I_s} \quad (2)$$

这个最大的功率比开路电压和短路电流的乘积小(见图2)，它们之比为

$$F = \frac{P_{max}}{U_0 * I_S} \quad (3)$$

F称为填充因数。

此外，太阳能电池的输出功率

$$P = U * I \quad (4)$$

是负载电阻

$$R = \frac{U}{I} \quad (5)$$

的函数。

我们经常用几个太阳能电池组合成一个太阳能电池。串联会产生更大的开路电压 U_0 ，而并联会产生更大的短路电流 I_S 。在本实验中，把2个太阳能电池串联，分别记录在四个不同的光照强度时电流和电压特性。光照强度通过改变光源的距离和电源的功率来实现。

三、实验内容

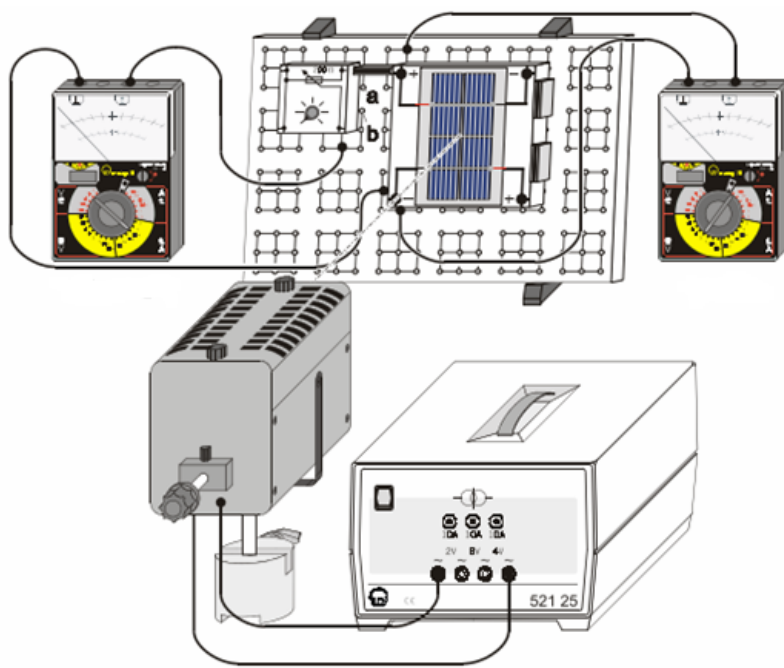


图3 实验装置图

1. 仪器调整，实验装置图如图示3所示。

(1)把太阳能电池插到插件板上，用两个桥接插头把上边的负极和下面的正极连接起来，串联起2个太阳能电池。

(2)插上电位器作为一个可变电阻，然后用桥接插头把它连接到太阳能电池上。

(3)连接电流表，使它和电池、可变电阻串联。选择测量范围：直流200mA。

(4)连接电压表使之与电池并联，选择量程：直流3V。

(5)连接卤素灯与稳压源，使灯与电池成一线，以使电池均匀受光。

2. 测量不同照度下太阳能电池的伏安特性、开路电压 U_0 和短路电流 I_s

(1)接通电路，将可变电阻器阻值调为最小以实现短路，并改变卤素灯的距离和调节电源输出功率，使短路电流大约为45mA。

(2)逐步改变负载电阻值降低电流，分别读取电流和电压值，记入表格。

(3)断开电路，测量并记录开路电压。

(4)调节电源功率，分别使短路电流约为35mA，25mA和15mA，并重复上述测量。

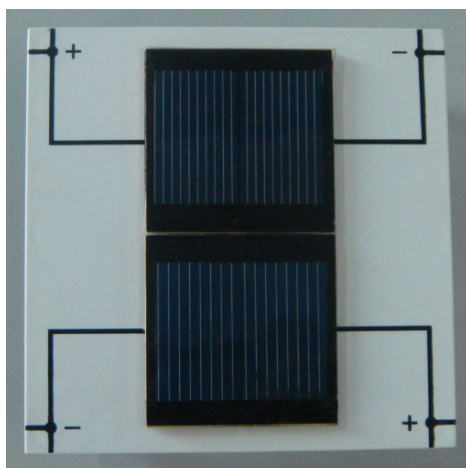
3. 在不同照度下，测定太阳能电池的输出功率 P 和负载电阻 R 的函数关系。

四、实验仪器

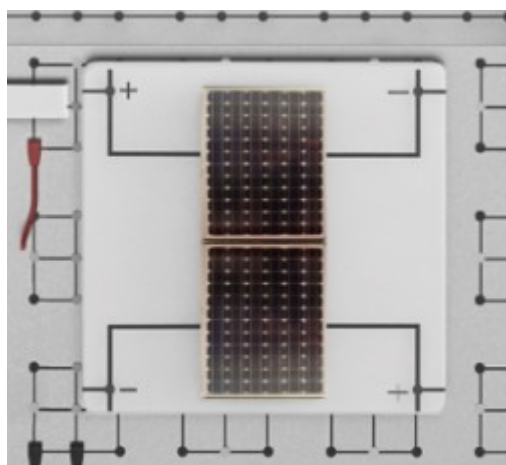
太阳能电池实验装置包括：太阳能电池两块、插件板(A4大小)、万用表两块(附带表笔)、卤素灯、电压范围为2~12V的稳压源。

1. 太阳能电池两块：

实际照片和程序中的显示：



实物照片



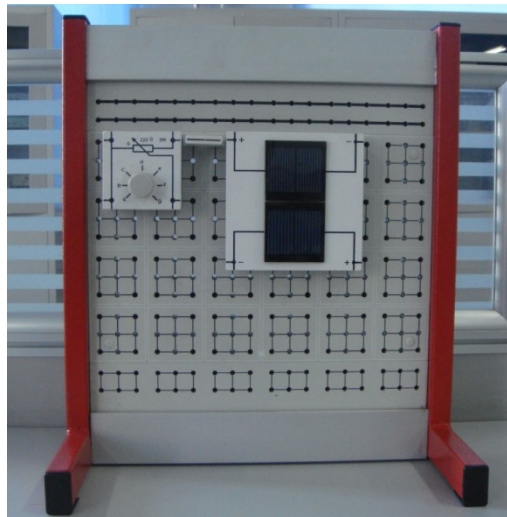
仿真仪器

操作方法：

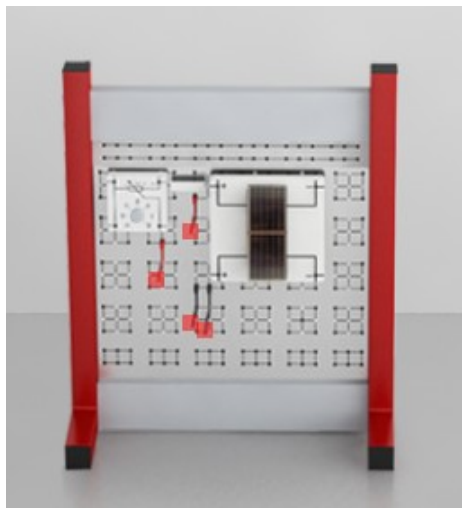
实验中仪器可以进行连线操作，标有“+”字的一端为正极，标有“-”字的一端为负极。

2. 插件板：

插件板的面板结构如下图所示。“日”字型的结构中每个插孔都是相互连通的。但任何两个“日”字型结构之间是不导通的。“田”字型的结构中每个插孔都是相互连通的。但任何两个“田”字型结构之间是不导通的。“一”字型的结构中每个插孔都是相互连通的。但两个“一”字型结构之间是不导通的。我们可以用元器件，导线和连接器等连接成我们需要的电路。



实物照片



仿真仪器

操作方法：

实验中太阳能电池板和电位器均已经默认插在插件板上，太阳能电池板与电位器之间用桥接插头串联在一起。通过选择不同的接线柱与万用表进行连接，可

以测量电池板两端的电压以及电路中流过的电流。

3. 稳压源:

实验中为卤素灯提供工作电压的装置，输出电压范围为2~12V，额定功率100W。



实物照片



仿真仪器

操作方法:

电源开关：用鼠标点击电源开关按钮，电源打开，信号提示灯亮；再次用鼠标点击电源开关按钮，电源关闭，信号提示灯灭。

调压旋钮：用鼠标左击调压旋钮，输出电压增大；用鼠标右击调压旋钮，输出电压减小。

4. 卤素灯:

实验中的光源，当接上电源后，能够发出光线，通过调节稳压电源电压值，可以使卤素灯的输出光强发生改变。



实物照片



仿真仪器

操作方法：

实验用鼠标拖动卤素灯的位置，可以改变照射光斑在太阳能电池板上的投影位置，并使电池板处于光斑中心的最大光强位置。

5. 万用表：

数字万用表是一种多用途电子测量仪器，有时也称为万用计、多用计、多用电表，或三用电表。本实验中使用的是3 位半数字万用表，如图所示：



实物照片



仿真仪器



万用表面板结构图



表笔图

(1). 仪器结构:

液晶显示器：显示仪表测量的结果，超量程时，最高位显示“1”或“-1”；

POWER电源开关：鼠标点击时，可以打开或关闭电源；

B/L背光开关：开启背光灯，约10秒后自动关闭；

三极管测试面孔：测试三极管特性的插孔，实验中无此项功能；

HOLD保持开关：按下此功能键，仪表当前所测数值保持在液晶显示器上并出现“HOLD”字样，再次按下，“HOLD”符号消失，退出保持功能状态；

档位旋钮：用于改变测量功能及量程，本实验中旋钮只可置于二极管测试档、欧姆档、直流电压档、交流电压档、交流电流档、直流电流档等档位，其他档位不可用；

电压、电阻及频率插孔：当进行电压、电阻及频率的测量时，使用此插孔；

公共地COM插孔：测试附件负极插孔；

毫安电流测量插孔：用于测量小于200mA电流的插孔；

20A电流测量插孔：用于测量大于200mA并小于20A的大电流插孔；

(2).测量方法:

使用前，首先要点击Power开关，打开万用表电源。

直流电压的测量：首先将黑表笔插进“com”孔，红表笔插进“VΩ Hz”。把旋钮选到比估计值大的量程（注意：表盘上的数值均为最大量程，“V—”表示直流电压档，“V~”表示交流电压档），然后将测试表笔跨接在被测线路上，红表笔所接的该点电压与极性显示在液晶显示屏上。

交流电压的测量：表笔插孔与直流电压的测量一样，不过应该将旋钮打到交流档“V~”处所需的量程即可。交流电压无正负之分，测量方法跟前面相同。

直流电流的测量：先将黑表笔插入“COM”孔。若测量大于200mA的电流，则要将红表笔插入“20A”插孔并将旋钮打到直流“20A”档；若测量小于200mA的电流，则将红表笔插入“200mA”插孔，将旋钮打到直流200mA以内的合适量程。调整好后，就可以测量了。将万用表串联到电路中，保持稳定，即可读数。

交流电流的测量：测量方法与直流电流的测量相同，不过档位应该打到交流档位。

电阻的测量：将表笔插进“COM”和“VΩ Hz”孔中，把旋钮打旋到“Ω”中所需的量程，用表笔接在电阻两端。在使用欧姆档时，应先将表笔断路，测得欧姆档的零点偏差值，然后在实测中减去零点偏差值。注意：每一次更换欧姆档位时零点偏差值均会发生改变。

(3).注意:

如测量时高位显示为“1”，表明已超过量程范围，须将档位开关转至较高档位上。

当仪表停止使用约(20±10)分钟后，仪表便自动断电进入休眠状态；若要重新启动电源，再按两次“POWER”开关，就可重新接通电源。

五、实验指导

实验重点及难点

(1)通过对太阳能电池基本特性的测量，了解和掌握它的特性和有关的测量方法。

(2)测量不同照度下太阳能电池的伏安特性、开路电压 U_0 和短路电流 I_s 。

(3)在不同照度下，测定太阳能电池的输出功率 P 和负载电阻 R 的函数关系。

(4)确定太阳能电池的最大输出功率 P_{max} 以及相应的负载电阻 R_{max} 和填充因数。

辅助功能介绍:

界面的右上角的功能显示框:当在普通做实验状态下，显示实验实际用时、记录数据按钮、结束实验按钮、注意事项按钮；在考试状态下，显示考试所剩时间的倒计时、记录数据按钮、结束考试按钮、显示试卷按钮(考试状态下显示)、注意事项按钮。

右上角工具箱:各种使用工具，如计算器等。

右上角help和关闭按钮： help可以打开帮助文件，关闭按钮功能就是关闭实验。

实验仪器栏:存放实验所需的仪器，可以点击其中的仪器拖放至桌面，鼠标触及到仪器，实验仪器栏会显示仪器的相关信息；仪器使用完后，则不允许拖动仪器栏中的仪器了。

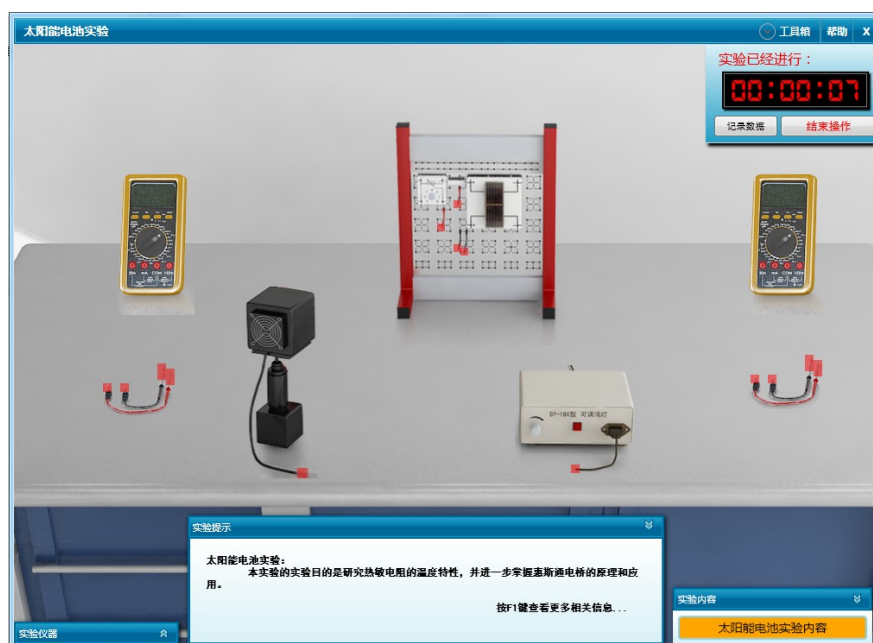
提示信息栏:显示实验过程中的仪器信息，实验内容信息，仪器功能按钮信息等相关信息，按F1键可以获得更多帮助信息。

实验状态辅助栏:显示实验名称和实验内容信息多个实验内容依次列出，当前实验内容显示为红色，其他实验内容为蓝色；可以通过单击实验内容进行实验内容之间的切换。切换至新的实验内容后，实验桌上的仪器会重新按照当前实验内容进行初始化。

实验操作方法:

(1). 主窗口介绍

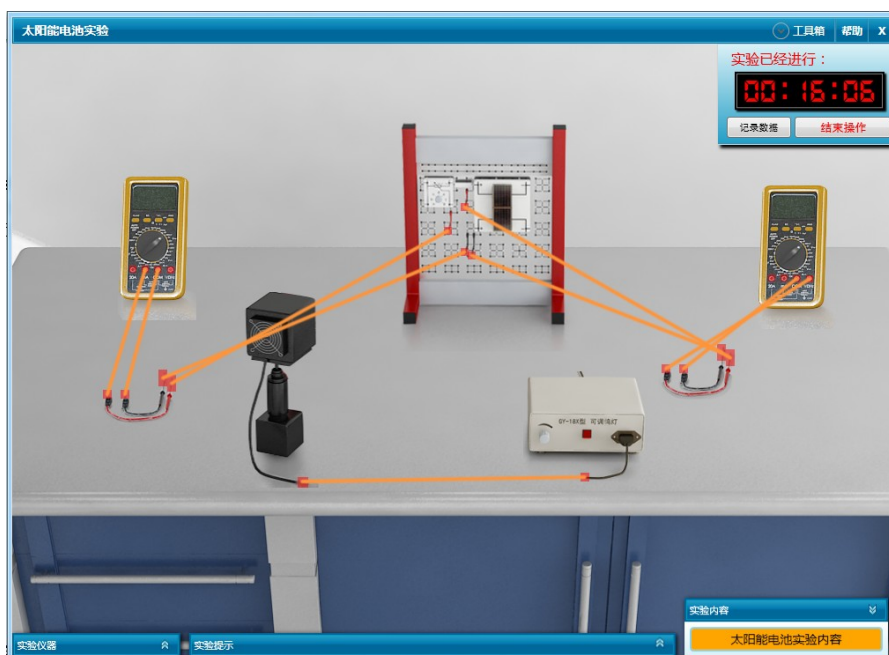
成功进入实验场景窗体，实验场景的主窗体如下图组所示：



实验主场景图

(2). 实验连线

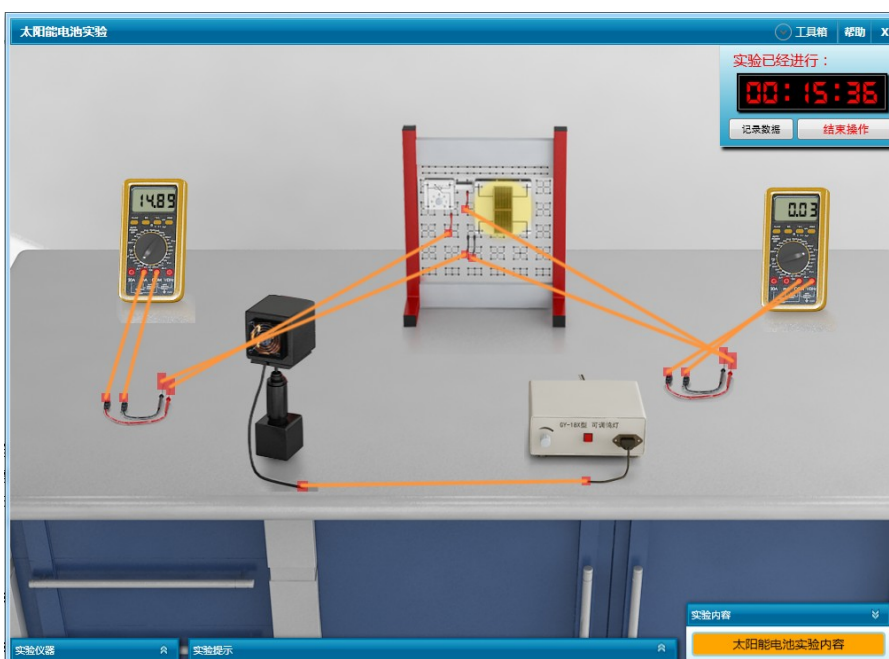
当鼠标移动到实验仪器接线柱的上方，拖动鼠标，便会产生“导线”，当鼠标移动到另一个接线柱的时候，松开鼠标，两个接线柱之间便产生一条导线，连线成功；如果松开鼠标的时候，鼠标不是在某个接线柱上，画出的导线将会被自动销毁，此次连线失败。如下图所示：



根据电路图连接好电路，然后在数据表格中点击“连线”模块下的“确定状态”按钮，保存连线状态。

(3). 仪器调整

将实验场景左边串联在电路的万用表作为电流表使用，并选择测量档位量程：直流200mA。将实验场景右边并联在电路的万用表作为电压表使用，并选择测量档位量程：直流20V。打开稳压源电源，使卤素灯发出光线，用鼠标拖动卤素灯，使灯与电池板中心成一线，以使电池均匀受光。

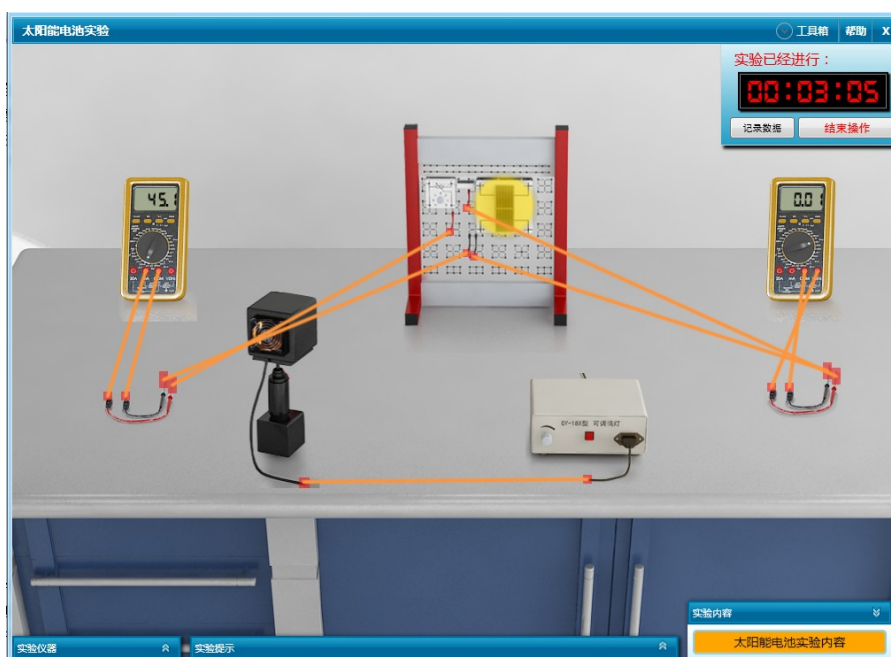


(4). 测量电池板伏安关系曲线

调节短路电流

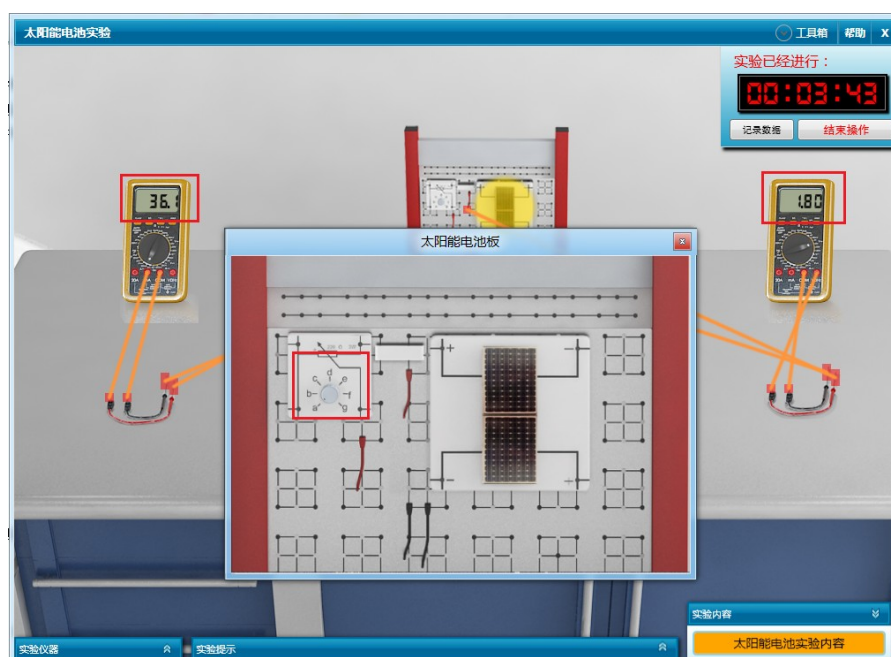
双击打开插件板，调节可变电阻器阻值调节旋钮，将可变电阻器阻值调为最小值以实现短路，并改变卤素灯的距离和调节电源输出功率，使短路电流大约为

45mA。



测量短路电流等于45mA时，电池板的伏安关系曲线

调节电位器阻值调节旋钮，逐步改变负载电阻值，降低电路中的电流大小，并分别读取电流和电压值，记入实验数据表格。



注意：由实验原理部分可知，电池板的最大功率位置处于伏安关系曲线的拐点附近，因此测量时要尽量选择关系曲线的拐点附近测量的密集一些，这样计算得到的最大功率才能最接近实际最大功率值。

断开电路，测量并记录开路电压。调节电源功率，

拆除场景中左侧的万用表连线，这时电池板处于开路状态，从场景中右侧的万用表上，我们可以测量得到此时电池板的开路电压值。



分别使短路电流约为35mA，25mA和15mA，并重复上述测量。

再次连接好电路，调节短路电流分别为35mA，25mA和15mA，并重复上述A、B、C的测量步骤，得到短路电流分别为35mA，25mA和15mA时的电池板伏安关系曲线以及对应的开路电压值。

(5). 数据处理

根据每一组测得的实验数据，利用短路电流和开路电压计算出电池板内阻值 R_i ；找到每一组数据中最大功率值，该电池板处于最大功率时对应的电阻值即为 R_{\max} 。利用公式计算每一组的填充因数，并求出填充因数平均值。

实验数据表格

$I_s = 15\text{mA}; U_o(V) = \underline{\hspace{2cm}}$

第四组实验数据

内容	1	2	3	4	5	6
I/mA						
U/V						
R/Ω						
P/mW						

表2：对应于最大功率的负载电阻值 R_{\max} 和根据 (2) 式计算出的内阻值 R_i

对应于最大功率的负载电阻值 R_{\max} 和根据 (2) 式计算出的内阻值 R_i

测量值/组数	第一组	第二组	第三组	第四组
R_{\max}/Ω				
R_i/Ω				
R_{\max}/R_i				

表3：最大功率 P_{\max} 和开路电压与短路电流的乘积

最大功率 P_{\max} 和开路电压与短路电流的乘积

测量值/组数	第一组	第二组	第三组	第四组
P_{\max}/mW				
$U_0 \cdot I_S / \text{mW}$				
$F = P_{\max} / (U_0 \cdot I_S)$				

关闭

实验过程中，及时记录所测量的数据，并填写到数据表格中对应的位置，完成数据表格。

六、思考题

1. 温度会对太阳能电池带来什么影响？
2. 设计一个实验测量光生电流 I_{PH} 。

七、参考资料

1. 杨之昌，马秀芳．物理光学实验．上海：复旦大学出版社．1993．
2. 陆廷济，费定曜，胡德敬．物理实验．上海：同济大学出版社．1991．
3. 曹泽淳，安其霖等．国产太阳能电池参数的研究．应用科学学报，1983．