



# 实验7、虚拟仿真实验— 太阳能电池的特性测量 物理实验（一）

# 一、实验目的

1. 了解光伏效应的基本原理
2. 测定太阳能电池的输出特性、开路电压和短路电流
3. 讨论输出功率和负载电阻的关系

## 二、实验仪器

1. 虚拟仿真实验系统地址: <http://aryun.ustcori.com:3230>

账号: SZDX+学号 (忽略加号), 密码: 自行设定

2. 太阳能电池的特性测量

3. 实验仪器: 光伏电池、光源、光源电源、万用表

## 三、实验原理/ 3.1 背景简介

太阳能电池（也称光伏电池），是将太阳光辐射能直接转换为电能的器件。把一定数量的器件根据需求组合起来，即构成常见的光伏发电系统。它具有低碳、环保、寿命长和使用方便等优点。

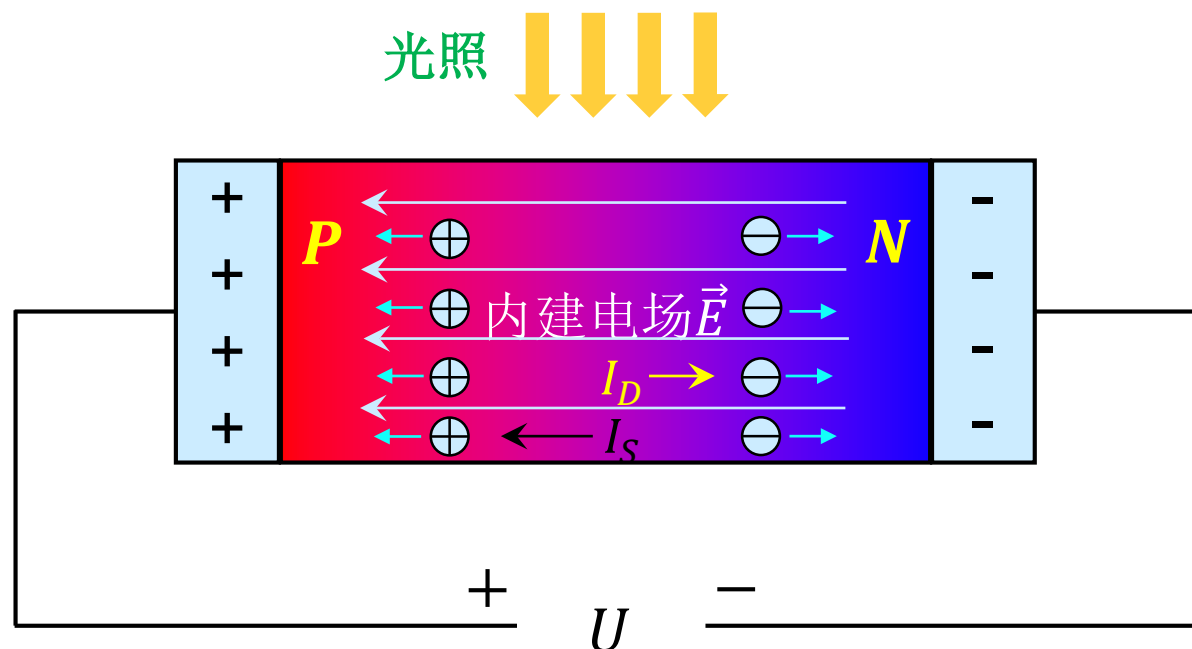
世界上第一块实用型半导体太阳电池是美国贝尔实验室于1954年研制的。经过人们多年的努力，太阳电池的研究、开发与产业化已取得巨大进步。目前，太阳电池已成为空间卫星的基本电源和地面无电、少电地区及某些特殊领域(通信设备、气象台站、航标灯等)的重要电源。

随着可再生能源的渐趋枯竭和石化燃料带来污染的日趋严重，太阳能电池将成为未来重要的基础能源之一。



图1 共享单车车筐里的太阳能电池板

### 三、实验原理/ 3.2 PN结



PN结即最简单的太阳能电池器件

图2 太阳能电池的原理图

PN结内部存在由正、负离子的扩散引起的内建电场（如图2所示）。当有光照射时，若光子能量大于半导体能隙，则会产生电子-空穴对，在内建场的作用下朝PN结的两端运动，产生光生电流 $I_S$ 。两端的电荷积累产生了光电池的端电压 $U$ 。同时，PN结内部在 $U$ 的作用下会引起反向电流 $I_D$ ，开路状态时会与 $I_S$ 达到平衡。

### 三、实验原理 / 3.2 PN结

实际测量的光电池的电流是 $I_S$ 与 $I_D$ 之差，

$$I = I_S(\phi) - I_D(U) \quad (1)$$

光生电流 $I_S$ 的大小是由PN结“搬运”电子的能力决定的，取决于材料内部的电势分布 $\phi$ 。反向电流 $I_D$ 的大小则取决于光电池的端电压 $U$ 。

当器件处于开路状态时端电压最大，即开路电压 $U_0$ 。当器件短路时端电压为零，此时电流有最大值 $I_S$ （短路电流）。因此可以在电路中接入一个负载电阻 $R$ ，通过调节 $R$ 的大小由0（短路）到无穷（断路），用来测量太阳能电池的输出特性。

### 三、实验原理/ 3.2 PN结

图3为太阳能电池输出特性的典型曲线。由此可见，当负载电阻 $R$ 很小时，光电池可视为一个恒流源，因为反向电流 $I_D$ 可以忽略不计；当负载电阻很大时，光电池可视为一个恒压源。

在光照强度恒定时，光电池的输出功率依赖于负载电阻 $R$ ，

$$\begin{aligned} P_{out} &= I^2 R = \left( \frac{E}{r+R} \right)^2 R \\ &= \frac{E^2}{2r + (R + \frac{r^2}{R})} \leq \frac{E^2}{4r} \end{aligned}$$

其中 $r = \frac{U_0}{I_S}$ 为**太阳能电池的内阻**，当负载 $R = r$ 时输出功率取最大值。 $E$ 为光电池的电动势（端电压与降在内阻上的电压之和）

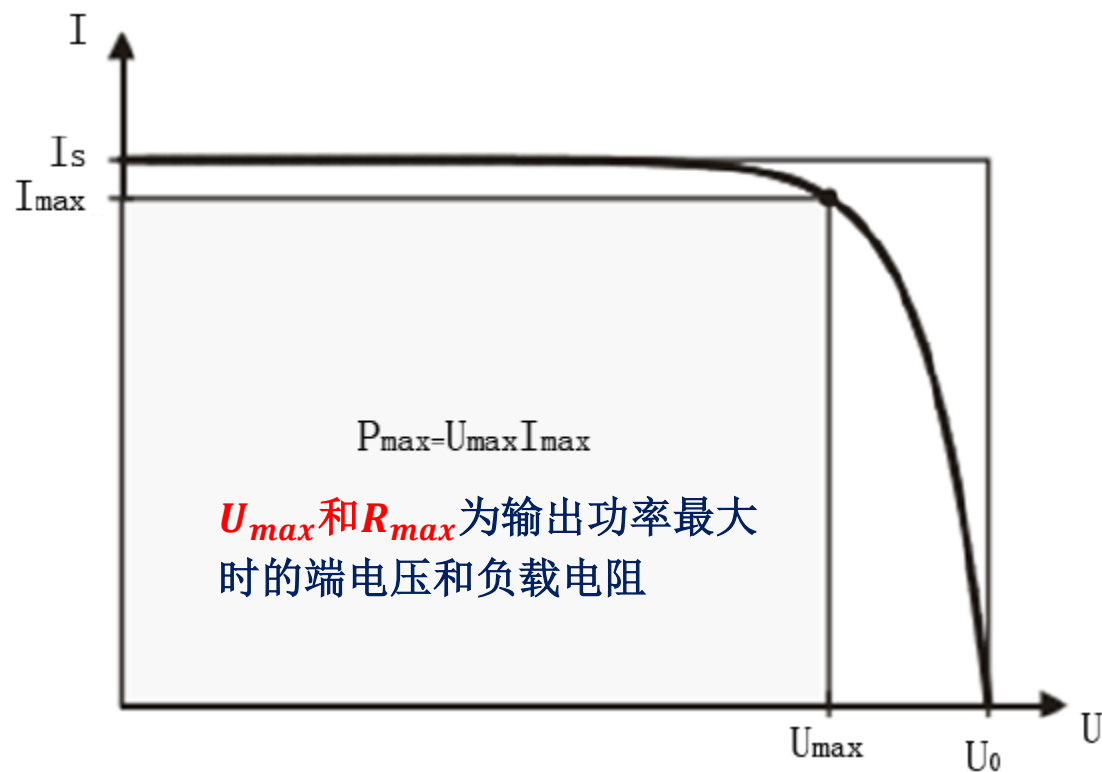


图3 太阳能电池的输出特性



## 三、实验原理 / 3.2 PN结

光电池的输出功率最大时有 $P_{max} = U_{max} \cdot I_{max}$ 。这里 $U_{max}$ 和 $I_{max}$ 表示输出功率最大值时对应的电压和电流。输出功率的最大值 $P_{max}$ 小于开路电压与短路电流的乘积（见图3），定义它们的比值为填充因数，

$$F = \frac{P_{max}}{U_0 \cdot I_S} \quad (2)$$

填充因数是反映电池性能的一个重要参数，一定程度决定了光电池的能量转化效率。填充因数越大，太阳能电池的输出特性曲线越接近矩形，光电转化效率越高。填充因数典型值处于0.65到0.85之间，性能更好的电池可以达到更高。

本实验中测出输出特性曲线之后，可以用每个点的电压和电流相乘找到最大总功率，进而得到填充因数。



## 四、实验内容/4.1 操作提示

点击“开始实验”后，桌面上有万用表、表笔、电池板（包括两块太阳能电池和一个可变电阻）、光源和光源电源（如图4所示）。万用表一个作电压表，另一个作电流表。

把太阳能电池、可变电阻和电流表串联，然后把电压表与电池的两端并联，打开光源即可测量太阳能电池的输出特性曲线。

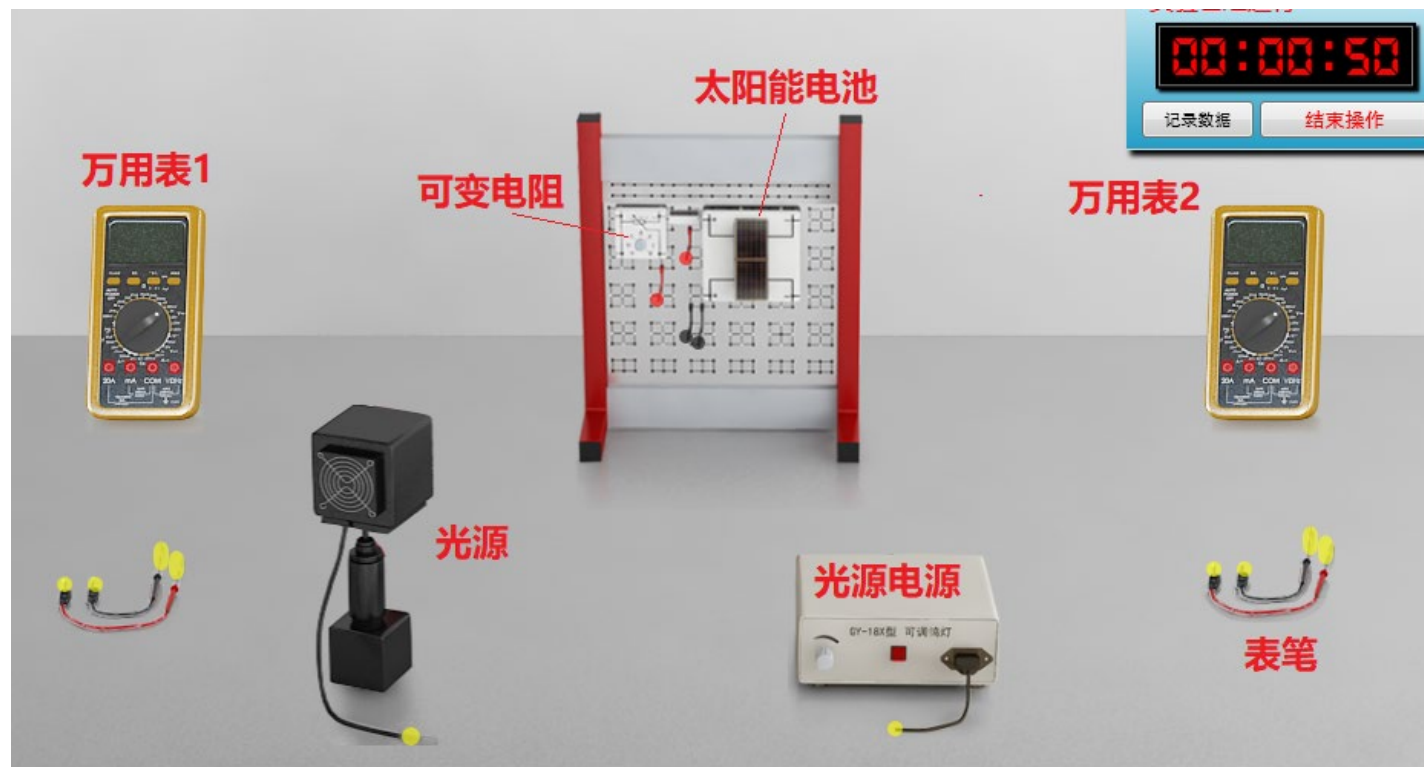


图4 太阳能电池的特性测量仪器

## 四、实验内容/4.1 操作提示

双击万用表可以看到如图5所示的放大图。本实验万用表作为电流表时选择量程 $200\text{mA}$ ，作为电压表时选择量程 $20\text{V}$ 。连线时注意黑色表笔连接接地端，红色表笔连接电流（或电压）插孔。把量程调节到相应的档位，打开开关即可进行读数。

双击电池板可弹出放大图，每个九宫格上的点是连接在一起的，在放大图里调节可变电阻的大小。

双击光源电源可弹出放大图，在放大图里调节光源的亮度。



图5 万用表放大图

## 四、实验内容 / 4.2 实验步骤

1. 按右图所示连接电路图
2. 左边万用表作为电流表，量程选 $200\text{mA}$ 。右边万用表作为电压表，量程选为 $20\text{V}$ ；
3. 打开光源电源，让光照射在太阳能电池上；

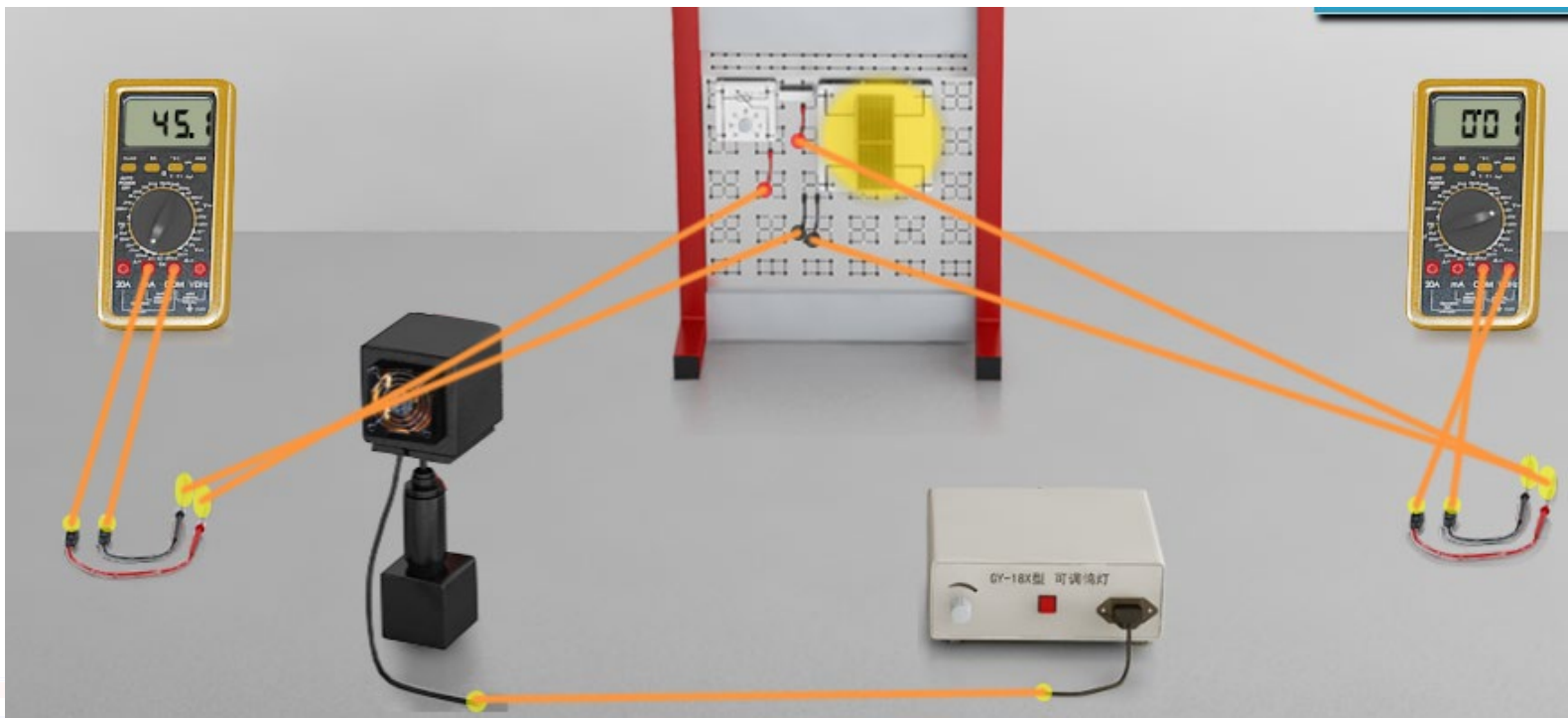


图6 电路连接图



## 四、实验内容 / 4.2 实验步骤

4. 打开电池板放大图，把可变电阻的阻值调节至零（靠近a点）；
5. 调节光照功率，使电流的大小约为 $45mA$ （短路电流）；然后断开电路，记录此时的开路电压 $U_0$ ；
6. 逐渐增大电阻阻值，记录太阳能电池的电压和电流的变化值，记录数据至表1；
7. 把电阻再次减小为零，调节光照功率，使电流大小为 $35mA$ 、 $25mA$ 和 $15mA$ ，并重复上面的步骤，记录至表格2、3和4；
8. 由短路电流和开路电压计算电池的内阻，与输出功率最大时对应的负载电阻相比较，填入表5。计算开路电压与短路电流的乘积，以及填充因数，填入表6。

四、实验内容 / 4.3 数据记录与处理

太阳能电池输出特性测量数据记录

第一组：  $I_S = 45.1mA$ ，  $U_0 = 2.05V$

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$U(V)$	0.01	0.46	0.91	1.70	1.80	1.85	1.86	1.88	1.90	1.91	1.92	1.93	1.95	1.96	1.97	1.98	1.99	2.00
$I(mA)$	45.1	45.1	45.1	42.6	36.1	30.9	26.9	23.9	21.4	19.4	17.7	16.3	13.2	11.7	9.5	8.1	6.5	4.7
$R(\Omega)$	0.22	10.20	20.18	39.91	49.86	59.87	69.14	78.66	88.79	98.45	108.47	118.40	147.73	167.52	207.37	244.44	306.15	425.53
$P(mW)$	0.45	20.75	41.04	72.42	64.98	57.17	50.03	44.93	40.66	37.05	33.98	31.46	25.74	22.93	18.72	16.04	12.94	9.40

表1 短路电流  $I_S = 45.1mA$  时测得的电流和电压值

第二组：  $I_S = 35.0mA$ ，  $U_0 = 2.03V$

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
$U(V)$	0.01	0.72	1.08	1.68	1.77	1.81	1.84	1.88	1.91	1.93	1.96	1.97	1.99	2.00	2.01			
$I(mA)$	35.0	35.0	35.0	32.9	28.8	25.3	22.5	18.4	15.6	12.6	9.6	7.5	5.9	4.7	3.3			
$R(\Omega)$	0.29	20.57	30.86	51.06	61.46	71.54	81.78	102.17	122.44	153.17	204.17	262.67	337.29	425.53	609.09			
$P(mW)$	0.35	25.20	37.80	55.27	50.98	45.79	41.40	34.59	29.80	24.32	18.82	14.78	11.74	9.40	6.63			

表2 短路电流  $I_S = 35.0mA$  时测得的电流和电压值



# 四、实验内容/4.3 数据记录与处理

## 太阳能电池输出特性测量数据记录

第三组： $I_S = 25.0mA$ ， $U_0 = 1.99V$

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$U(V)$	0.01	0.25	0.75	1.65	1.72	1.76	1.79	1.81	1.84	1.86	1.87	1.89	1.90	1.91	1.92	1.93	1.94	1.95	1.96	1.97
$I(mA)$	25.0	25.0	25.0	23.7	21.6	19.6	17.9	16.5	14.2	12.5	11.1	10	9.1	8.0	7.1	6.3	5.4	4.4	3.3	2.1
$R(\Omega)$	0.40	10.00	30.00	69.62	79.63	89.80	100.00	109.70	129.58	148.80	168.47	189.00	208.79	238.75	270.42	306.35	359.26	443.18	593.94	938.10
$P(mW)$	0.25	6.25	18.75	39.11	37.15	34.50	32.04	29.87	26.13	23.25	20.76	18.90	17.29	15.28	13.63	12.16	10.48	8.58	6.47	4.14

表3 短路电流 $I_S = 25.0mA$ 时测得的电流和电压值

第四组： $I_S = 15.1mA$ ， $U_0 = 1.92V$

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$U(V)$	0	0.3	0.75	1.35	1.6	1.65	1.71	1.75	1.76	1.77	1.78	1.79	1.8	1.81	1.83	1.84	1.85	1.86	1.87
$I(mA)$	15.1	15.1	15.1	15.1	14.6	13.9	12.3	11	10.4	9.9	9.4	8.6	7.9	7.3	6.6	6	5.3	4.1	3.6
$R(\Omega)$	0.00	19.87	49.67	89.40	109.59	118.71	139.02	159.09	169.23	178.79	189.36	208.14	227.85	247.95	277.27	306.67	349.06	453.66	519.44
$P(mW)$	0.00	4.53	11.33	20.39	23.36	22.94	21.03	19.25	18.30	17.52	16.73	15.39	14.22	13.21	12.08	11.04	9.81	7.63	6.73

表4 短路电流 $I_S = 15.1mA$ 时测得的电流和电压值

# 四、实验内容/4.3 数据记录与处理

测量值/组数	第一组	第二组	第三组	第四组
$R_{max}(\Omega)$	39.91	51.06	69.92	109.59
$r(\Omega)$	45.45	58.00	79.60	127.15
$R_{max}/r$	0.878	0.880	0.878	0.862

表5 电阻 $R_{max}$ 及由 $r = U_0/I_S$ 得到的内阻的比较

测量值/组数	第一组	第二组	第三组	第四组
$P_{max} (mW)$	72.42	55.27	39.11	23.36
$U_0 \times I_S (mW)$	92.455	71.05	49.75	28.992
$F$	0.783	0.778	0.786	0.806

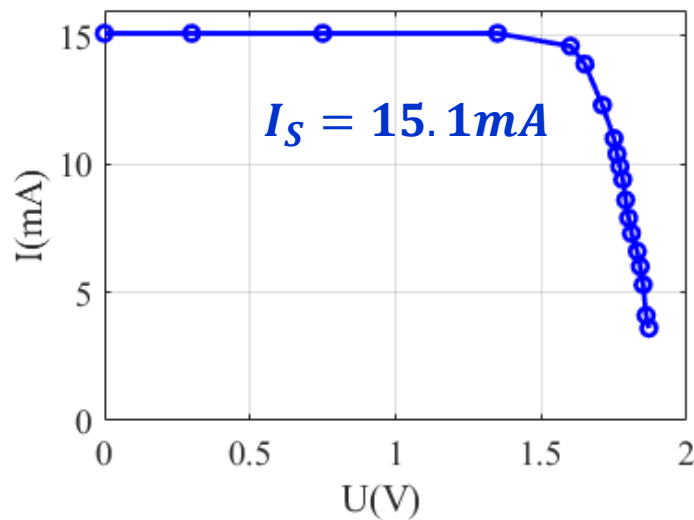
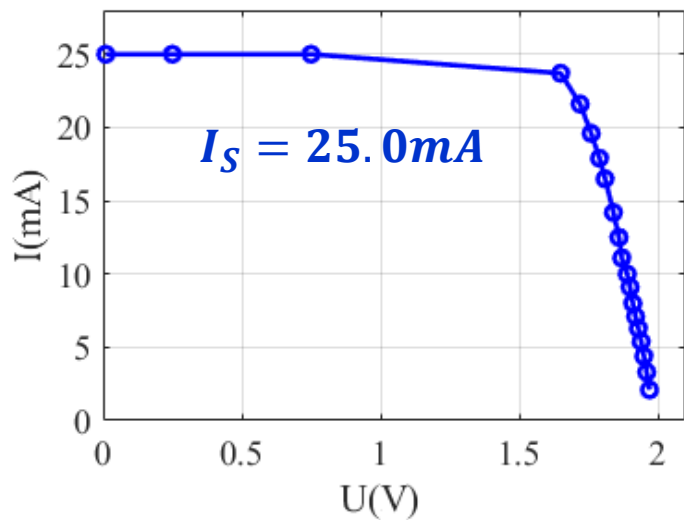
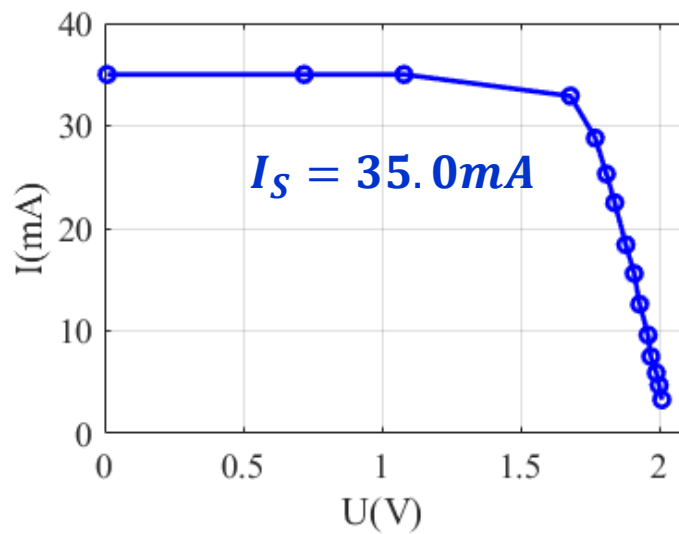
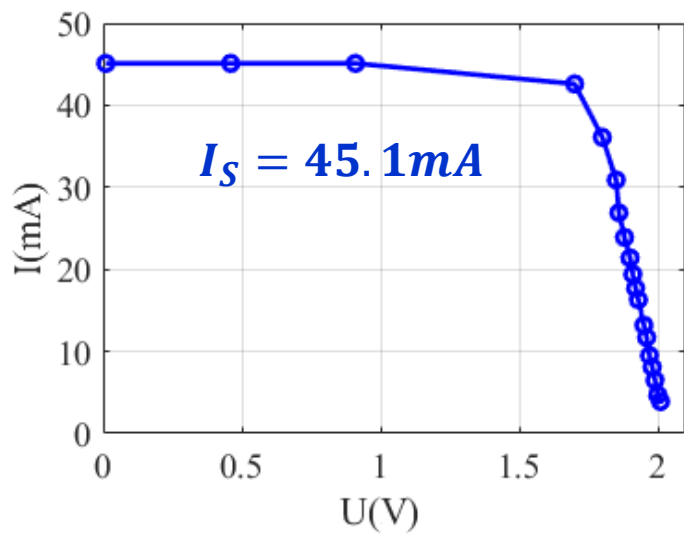
表6 最大输出功率与填充因数

由结果可知，太阳能电池的输出功率最大时对应的电阻，和由开路电压以及短路电流得到的内阻比较接近，验证了“负载等于内阻时电池的输出功率最大”的结论。计算得到的填充因数在0.7以上，说明太阳能电池的转化效率较高。




## 四、实验内容 / 4.3 数据记录与处理

太阳能电池的输出特性曲线



## 四、实验内容 / 4.4 思考题

1. 温度会对太阳能电池带来什么影响？
2. 实验中的路端电压和光电池的电动势有什么关系？
3. 测量得到输出功率最大时的电阻 $R$ ，与用短路电流和开路电压计算的内阻有一定差异，产生差异的原因主要是什么？

A wide-angle photograph of the Tsinghua University campus. In the background, a large, modern building with a glass facade stands behind a line of trees. In the foreground, a circular fountain with a central sculpture is surrounded by a paved walkway. To the left, a row of flagpoles with various flags is visible. The sky is overcast.

2022.4.21

深圳大学大学物理教学实验中心

再见!

