

# 硅光电池实验报告

少年班学院 小组1号 PB21000004 吴越 2022年5月16日

## 摘要

本次实验在于了解硅光电池工作原理，掌握硅光电池的工作特性。。

- 测量不同 $L$ 、 $R_L$ 不同下硅电池的工作电压 $U$ 。
- 测量不同光照下的短路电流 $I_{SC}$ ，开路电压 $U_{OC}$ 。
- 测量不同负载 $R_L$ 的硅光电池输出电压 $U$ 与光照 $L$ 的关系。
- 测量反向偏置下硅光电池输出电压 $U$ 与光照 $L$ 的关系。

## 背景介绍

- 简介：硅光电池是根据光伏效应而制成的将光能转换成电能的一种器件，它的基本结构就是一个 P-N 结。
- 制作：光电池是在 N (P) 型硅基底上扩散 P (N) 型杂质并作为受光面，构成个 P-N 结后，再经过各种工艺处理，分别在基底和光敏面上制作输出电极，涂上二氧化硅作保护膜。
- 特性：P-N 结偏置特性，光伏效应，伏安特性，照度特性，输出特性，光谱响应特性等。



# 第一部分 实验方法

## 1. 实验名称

硅光电池特性的研究

## 2. 实验目的

了解硅光电池工作原理，掌握硅光电池的工作特性。

## 3. 实验原理：

硅光电池是根据光伏效应而制成的将光能转换成电能的一种器件，基本结构就是一个P-N结，主要具有如下特性：

### 1. P-N结偏置特性

空穴较多的P型半导体和电子较多的N型半导体结合时，空穴从P向N扩散，电子从N向P扩散，中间形成的耗尽区即离子层无自由载流子，有稳定的内电场，呈现高阻抗，即P-N结。当P-N结反偏时，外加电场与内电场方向一致，耗尽区在外电场作用下变宽，使势垒加强；当P-N结正偏时，外加电场与内电场方向相反，耗尽区在外电场作用下变窄，使势垒削弱，使载流子扩散运动继续形成电流，这就是PN结的单向导电性。

### 2. 光伏效应

P-N结处于零偏或反偏时，耗尽区存在内电场，有光照时，电池对光子的本征吸收所激发的少数载流子引起光伏效应。激发出的电子空穴对在内电场作用下分别飘移到N型区和P型区，当在P-N结两端加负载时就有一光生电流流过负载，也就是光伏效应。

### 3. 硅光电池的基本特性

#### (1) 伏安特性

一定光照下，光电池两端加负载就会有电流流过，负载很大时，电流较小而电压较大；负载很小时，电流较大而电压较小。硅光电池的伏安特性曲线由二个部分组成：无偏压工作状态，光电流随负载变化很大；反偏压工作状态，光电流与偏压、负载几乎无关（很大动态范围内）。

#### (2) 照度特性

当没有光照时，硅光电池等效于普通的二极管，其伏安特性为：

$$I_d = I_0 \left[ \exp\left(\frac{qU}{k_B T}\right) - 1 \right]$$

$I$ 为流过PN结的电流， $I_0$ 为反向饱和电流， $q$ 为电子电荷， $k_B$ 为玻尔兹曼常数， $T$ 为绝对温度， $U$ 是加在P-N结两端电压。对于外加正向电压， $I_d$ 随 $U$ 指数增长，称正向电流；当外加电压为反向时，在反向击穿电压之内，反向饱和电流基本是个常数。当有光照时，激发出的电子空穴对在内电场作用下分别飘逸到N型区和P型区，当在PN结两端加负载时就有光生电流流过负载，流过PN结两端的电流：

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{qU}{k_B T}\right) - 1 \right]$$

$I_{ph}$ 是与入射光的强度成正比的光生电流，与负载电阻大小及硅光电池结构特性有关。

(1) 当硅光电池在短路状态时 ( $U=0$ )，短路电流为： $I_{sc} = I_{ph}$

(2) 当硅光电池在开路状态时 ( $I=0$ )，开路电压为  $U_{OC} = \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right)$

#### (3) 输出特性

硅光电池负载上 $R_L$ 的电压降 $U$ 和通过 $R_L$ 的电流之积称为硅光电池的输出功率 $P$ 。输出功率达到最大值 $P_m = U_m I_m$ 时的负载电阻 $R_m$ 称为最佳负载电阻，此时能量转换效率最高，且 $R_m$ 随光强而变化。定义填充因子是表征硅光电池性能优劣的重要参数，取决于入射光强、材料禁带宽度、负载电阻等。

#### (4) 光谱响应特性

硅光电池的光谱响应表征不同波长的光子产生电子-空穴对的能力。各种波长的单位辐射光能或对应的光子入射到硅光电池上，将产生不同的短路电流，按波长的分布求得其对应的短路电流变化曲线称为硅光电池的光谱响应曲线。（本实验不深入研究）

## 4.实验仪器

硅光电池、数字万用表、毫安表、电阻箱、溴钨灯（本实验台溴钨灯设定为7.10A）、直流稳压电源、光学导轨及支座、开关、导线。

## 5.实验步骤：

1. 按实验要求，预热溴钨灯，连接好电路。
2. 不加偏压，用溴钨灯照射硅光电池，溴钨灯到硅光电池的距离 $d$ 为50 cm，电阻箱作为负载。
3. 测量不同 $L$ 、 $R_L$ 不同下硅电池的工作电压 $U$ 。
4. 测量不同光照下的短路电流 $I_{SC}$ ，开路电压 $U_{OC}$ 。
5. 测量不同负载 $R_L$ 的硅光电池输出电压 $U$ 与光照 $L$ 的关系。
6. 测量反向偏置下硅光电池输出电压 $U$ 与光照 $L$ 的关系。
7. 结束实验，整理仪器。

# 第二部分 结果和分析

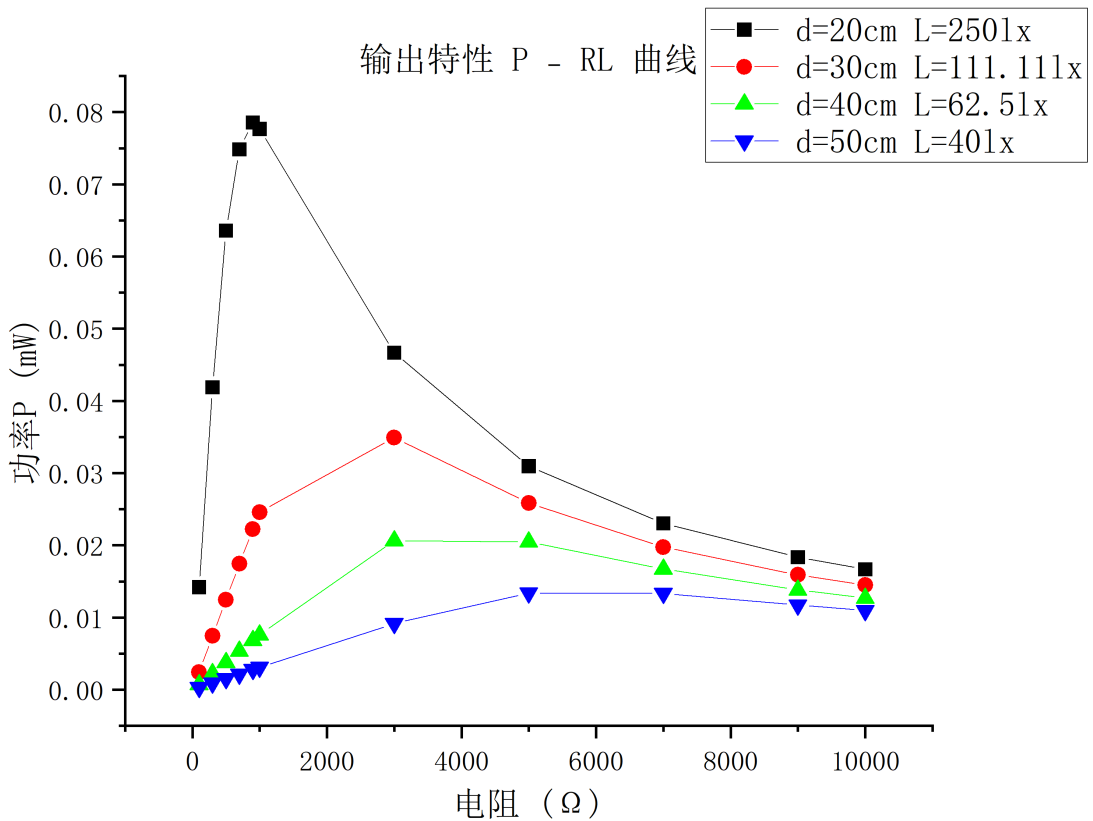
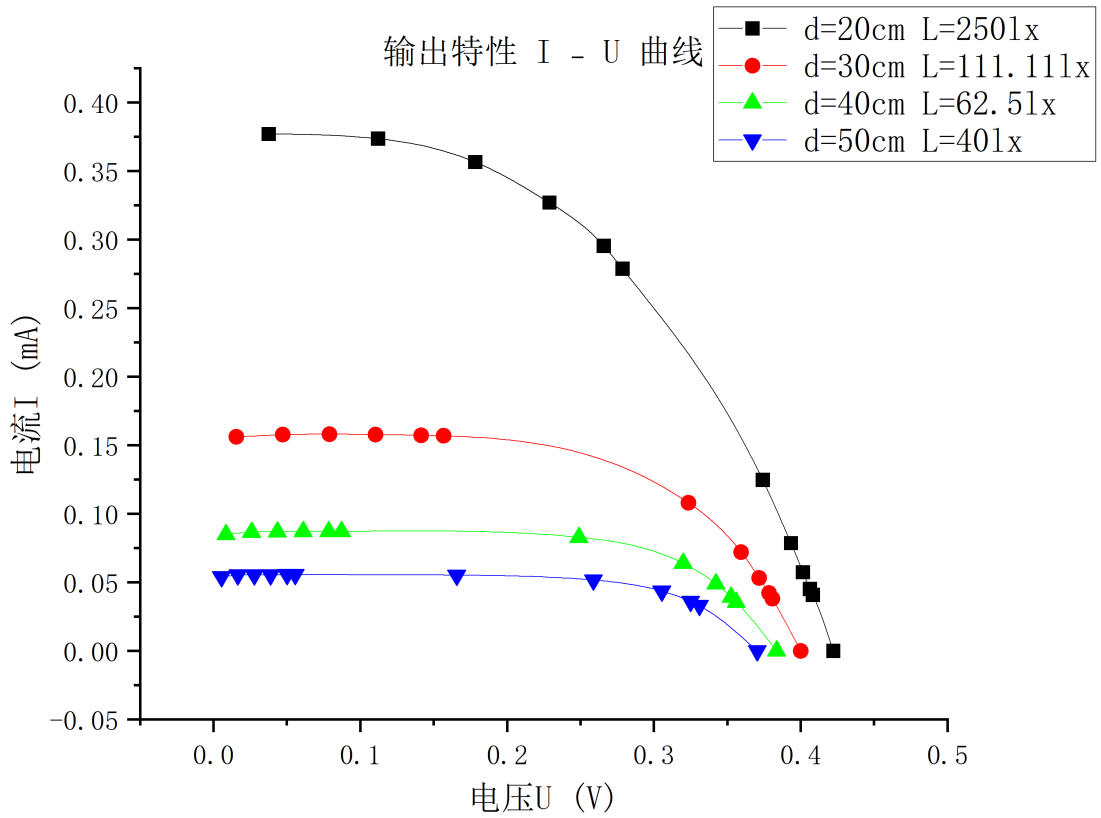
## 1.硅光电池输出特性测量

测得数据如下所示：（本实验台溴钨灯设定为7.10A）

表1 硅光电池输出特性测量

	$R/\Omega$	100	300	500	700	900	1000	3000	5000	7000	9000	10000
d=20cm L=250lx	U/V	0.0377	0.1121	0.1783	0.2289	0.2659	0.2787	0.3742	0.3934	0.4016	0.4063	0.4083
	I/mA	0.3770	0.3737	0.3566	0.3270	0.2954	0.2787	0.1247	0.0787	0.0574	0.0451	0.0408
	P/mW	0.0142	0.0419	0.0636	0.0749	0.0786	0.0777	0.0467	0.0310	0.0230	0.0183	0.0167
d=30cm L=111.1lx	U/V	0.0156	0.0473	0.0790	0.1105	0.1415	0.1568	0.3273	0.3596	0.3719	0.3785	0.3808
	I/mA	0.1560	0.1577	0.1580	0.1579	0.1572	0.1568	0.1091	0.0719	0.0531	0.0421	0.0381
	P/mW	0.0024	0.0075	0.0125	0.0174	0.0222	0.0246	0.0357	0.0259	0.0198	0.0159	0.0145
d=40cm L=62.5lx	U/V	0.0085	0.0260	0.0435	0.0611	0.0785	0.0872	0.2489	0.3199	0.3422	0.3527	0.3562
	I/mA	0.0850	0.0867	0.0870	0.0873	0.0872	0.0872	0.0830	0.0640	0.0489	0.0392	0.0356
	P/mW	0.0007	0.0023	0.0038	0.0053	0.0068	0.0076	0.0207	0.0205	0.0167	0.0138	0.0127
d=50cm L=40lx	U/V	0.0054	0.0166	0.0277	0.0389	0.0501	0.0557	0.1657	0.2589	0.3054	0.3251	0.3311
	I/mA	0.0540	0.0553	0.0554	0.0556	0.0557	0.0557	0.0552	0.0518	0.0436	0.0361	0.0331
	P/mW	0.0003	0.0009	0.0015	0.0022	0.0028	0.0031	0.0092	0.0134	0.0133	0.0117	0.0110

我们使用origin对测得数据进行分析，分析出结果如下图：



分析图像以及数据可知，在一定光照下，在光电池两端加一个负载就会有电流流过。可以看到，当负载很小时，电流较大而电压较小，且电流随电压变化趋势不明显。当负载很大时，电流较小而电压较大，电流随电压变化趋势较为明显。此外，功率与负载的关系为：当负载较小时，功率随负载增加而增加。当到达峰值后，功率随负载增加而减小。

对最大输出功率，最佳负载，填充因子计算如下表：

表2 最大输出功率，最佳负载，填充因子计算

距离d/cm	20	30	40	50
光照强度L/lx	250.0	111.1	62.5	40.0
最大输出功率P/mW	0.0786	0.0357	0.0207	0.0134
最佳负载R/Ω	900	3000	3000	5000
填充因子FF	10.28%	7.68%	6.68%	6.06%

可以看到随光照强度增加，最大输出功率和填充因子都增大，最佳负载减小。

## 2.硅光电池开路电压、短路电流与光照特性测量

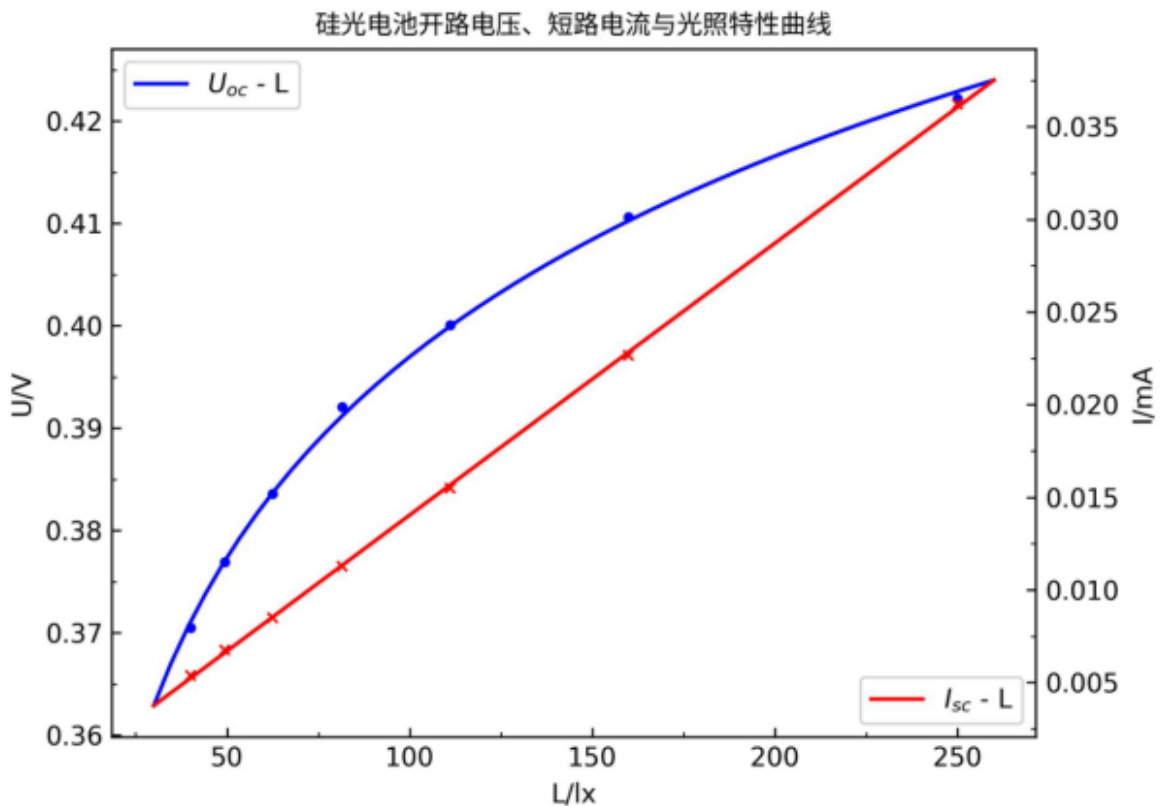
测量不同光照下硅光电池的开路电压  $U_{oc}$ 、短路电流  $I_{sc}$ ，绘制  $U_{oc}-L$ 、 $I_{sc}-L$  曲线，其中短路电流用负载  $R = 50\Omega$  时的电流代替，数据如下表所示：

表3 硅光电池开路电压、短路电流与光照特性测量

距离d/cm	20	25	30	35	40	45	50
光照强度L/lx	250.0	160.0	111.1	81.6	62.5	49.4	40.0
开路电压U/V	0.4222	0.4106	0.4001	0.3921	0.3836	0.3769	0.3705
短路电流I/mA	1.811	1.132	0.774	0.564	0.425	0.337	0.268

其中短路电流I是用50Ω负载近似短路，用200mV量程电压表测得电压后计算得到。

使用origin分析数据，得  $U_{oc}-L$ 、 $I_{sc}-L$  曲线如下图所示。



分析图像可知， $U$ 与 $L$ 近似成对数关系，而 $I$ 与 $L$ 近似成正比关系，这与硅光电池的照度特性一致，即：

- (1) 当硅光电池在短路状态时 ( $U=0$ )，短路电流为： $I_{sc} = I_{ph}$
- (2) 当硅光电池在开路状态时 ( $I=0$ )，开路电压为  $U_{OC} = \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_{ph}} + 1\right)$

可以看到该函数与原数据拟合较好，这样我们就得到了 $U, I, L$ 之间的函数关系：

开路电压  $U_{oc}/V$  与光照强度  $L/lx$  的函数关系为:

$$U = 0.02828 \cdot \ln(12479.1245 \cdot L + 1)$$

短路电流  $I_{sc}/mA$  与光照强度  $L/lx$  的函数关系为:

$$I = 0.00015 \cdot L$$

同时也验证了硅光电池的照度特性。

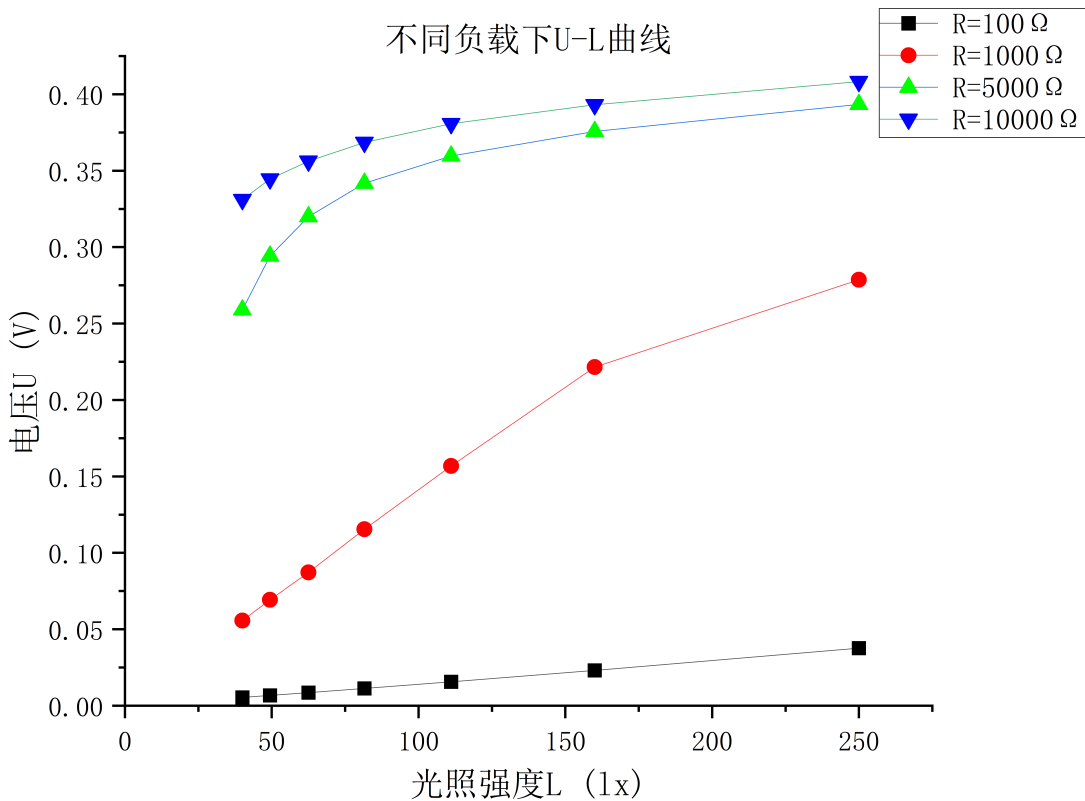
### 3.不同负载下硅光电池输出电压U与光照特性测量

测量不同负载下硅光电池输出电压与光照强度L的关系，测得数据如下表:

表4 不同负载下硅光电池输出电压U与光照特性测量

距离d/cm		20	25	30	35	40	45	50
光照强度L/lx		250	160	111.1	81.6	62.5	49.4	40
R=100Ω	U/V	0.0377	0.0231	0.0156	0.0113	0.0085	0.0067	0.0054
R=1000Ω	U/V	0.2787	0.2215	0.1568	0.1155	0.0872	0.0693	0.0557
R=5000Ω	U/V	0.3934	0.3757	0.3596	0.3418	0.3199	0.2942	0.2589
R=10000Ω	U/V	0.4083	0.3931	0.3808	0.3685	0.3562	0.3445	0.3311

使用origin分析数据，结果如下图所示:



分析图像可知：在负载相同的情况下，光照强度越大，硅光电池输出电压越大。

且在同一光照强度下，负载越大，硅光电池的输出电压越大。

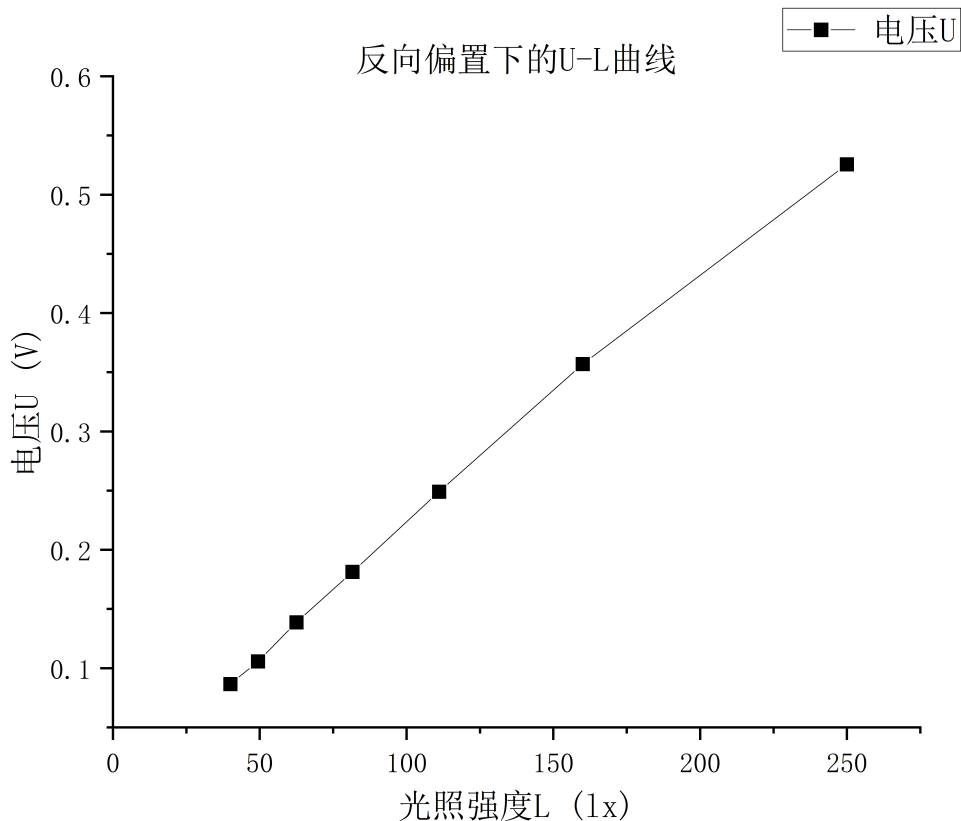
### 4.测量反向偏置下硅光电池输出电压U与光照L的关系

在反向偏置 (2.0V) 的情况下，测量下硅光电池输出电压U与光照L的关系，数据如下表:

表5 反向偏置下硅光电池输出电压U与光照L的关系

距离d/cm	20	25	30	35	40	45	50
光照强度L	250	160	111.1	81.6	62.5	49.4	40
U/V	0.4083	0.3931	0.3808	0.3685	0.3562	0.3445	0.3311

使用origin分析数据，结果如下图所示：



分析图像可以看到，在反向偏置的情况下，硅光电池的输出电压随光照强度的增加而增加。

且通过曲线可以看到，在反向偏置的情况下，输出电压与光照强度近似呈线性关系。

## 误差分析：

根据分析，在实验过程中主要有以下因素引起误差：

1. 测量最大功率时所用负载选取跨度较大，导致最佳负载结果不准确。
2. 万用表本身也存在一定内阻，会分得部分电流，给实验结果带来误差。
3. 电路本身并不稳定，在测量时电压值的波动较大，给测量带来一定困难。
4. 实验中短路电流用负载  $R = 50\Omega$  时的电流代替，存在一定误差。
5. 环境光线易受外界影响，且实验中光源电流有波动，实际的光照强度误差较大。

## 实验讨论：

通过硅光电池实验，我：

- (1) 了解了硅光电池的结构、作用和工作原理。
- (2) 掌握实验仪器的基本调节要求、方法和规范。
- (3) 实践了使用多种电路仪器设计，连接电路的基本能力。
- (4) 懂得了硅光电池实验的基本原理与操作方法，为之后的实验打好了基础。
- (5) 提升了其他与试验相关的能力。



## 第三部分 思考题

### Q1: 光电池在工作时为什么要处于零偏或反偏?

答: 这是由于硅光电池的**P-N结偏置特性**。

(1) 当 P 型和 N 型半导体材料结合时, P 型材料中的空穴会向 N 型材料这边扩散, N 型材料中的电子会向 P 型材料这边扩散, 当两者达到平衡时, 在 P-N 结两侧形成一个**耗尽区**, 呈现高阻抗。

(2) 只有让 P-N 结处于零偏或反偏时, 耗尽区才会存在内电场。此时对硅光电池进行光照, 硅光电池对光子的本征吸收所激发的少数载流子才会引起**光伏效应**, 才能产生输出电压正常工作。

(2) 倘若使 P-N 结正偏, 外加电场与内电场方向相反, 则耗尽区会在外电场作用下**变窄**, 使势垒削弱, 载流子扩散运动继续形成电流, P-N 结出现单向导电性, 导致硅光电池无法正常输出电压。因此光电池在工作要处于零偏或反偏状态。

### Q2: 当增加光照强度, 硅光电池的哪些参数发生变化?

答: 根据实验结果分析可知, 硅光电池主要有四个参数发生变化:

(1) **开路电压**: 在其他条件相同的情况下, 由表3中数据比较可知开路电压 $U$ 随光照强度增加而增加。

(2) **短路电流**: 在其他条件相同的情况下, 由表3中数据比较可知短路电流 $I$ 随光照强度增加而增加。

(3) **最大输出功率**: 在其他条件相同的情况下, 由表2中数据比较可知最大输出功率 $P$ 随光照强度增加而增加。

(4) **最佳负载**: 在其他条件相同的情况下, 由表2中数据比较可知最佳负载 $R$ 随光照强度增加而减小。

(5) **填充因子**: 在其他条件相同的情况下, 由表2中数据比较可知填充因子 $FF$ 随光照强度增加而增加。