

# 中国科学技术大学



## 硅光电池特性研究

姓名：王晨洋

学号：PB22061204

班级：信息学院 2202 班

时间：2023 年 4 月 6 日

# 硅光电池特性研究

## 1 实验目的

1. 了解硅光电池工作原理
2. 掌握硅光电池的工作特性。

## 2 实验原理

### 2.1 硅光电池基本构成

硅光电池是一种利用光伏效应将光能转换成电能的器件。其基本结构为 P-N 结，可以通过在 P (N) 型硅片上扩散磷形成 N (P) 型薄层来制造不同类型的光电池。硅光电池的制作过程包括在硅基底上扩散杂质形成 P-N 结，并在基底和光敏面上制作输出电极，并涂上二氧化硅作保护膜。

### 2.2 P-N 结特性

当 P 型和 N 型半导体材料结合时，由于空穴和电子的扩散，形成一个势垒，在零偏下形成耗尽区，无自由载流且高阻抗，反偏时势垒加强，正偏时势垒削弱，形成单向导电性，电流方向是从 P 指向 N。

### 2.3 光伏效应

当 PN 结处于零偏或反偏时，在结合面耗尽区存在一个内电场，有光照射时会产生光生载流，其中只有本征吸收所激发的少数载流能引起光伏效应。入射光将束缚电子激发到导带，激发出的电空穴对在电场作用下分别飘移到 N 型区和 P 型区，形成光生电流。

### 2.4 硅光电池基本特性

#### 2.4.1 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)。

## 2.4.2 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

$$I_d = I_0 \left( e^{\frac{qU}{k_B T}} - 1 \right)$$

对于外加正向电压， $I_d$ 随 $V$ 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漂移到 N 型区和 P 型区，当在 P-N 结两端加负载时就有光生电流流过负载，流过 P-N 结两端的电流：

$$I = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{qU}{k_B T}} - 1 \right)$$

$I_{ph}$ 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。

## 2.4.3 输出特性

硅光电池负载上的电压降 $U$ 和通过负载的电流 $I$ 之积称为硅光电池的输出功率 $P$ 。在一定的照度下，不同负载有不同的输出功率，输出功率达到最大值 $P_m$ 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。填充因子定义为 $FF = P_m / U_{oc} I_{sc}$ ，是表征硅光电池性能优劣的一个重要参数， $FF$ 越大则输出功率越高，说明硅光电池对光的利用率越高。 $FF$ 取决于入射光强、材料禁带宽度、负载电阻等。

# 3 实验仪器

1. 硅光电池
2. 数字万用表
3. 毫安表
4. 电阻箱
5. 溴钨灯
6. 直流稳压电源
7. 光学导轨及支座
8. 开关
9. 导线

# 4 实验步骤与数据处理

## 4.1 硅光电池暗伏安特性测量

### 4.1.1 实验步骤

在暗光下， $I < 20mA$ 内，测量电池的正向电压与电流关系。按照图 1 连接电路，并通过调节 R 的阻值，测量出多组电流电压数据。

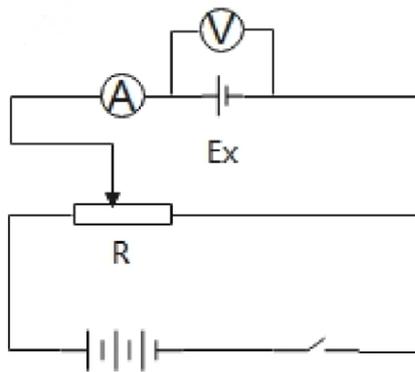


图 1 硅光电池暗伏安特性测量电路图

#### 4.1.2 实验数据

表 1 硅光电池暗伏安特性实验数据

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I/mA	4.00	4.50	5.00	5.50	6.02	6.50	7.00	7.50	8.00	9.00
U/V	0.7927	0.8110	0.8282	0.8431	0.8582	0.8703	0.8826	0.8937	0.9032	0.9231
No.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
I/mA	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	19.00	20.00
U/V	0.9416	0.9596	0.9752	0.9904	1.0050	1.0182	1.0317	1.0444	1.0696	1.0816

#### 4.1.3 数据处理

由实验原理可知，在无光条件下，流过 PN 结的电流与电压的自然指数成线性关系，所以我们可以将其简化为如下的公式：

$$I = k_1(e^{k_2 U} - 1)$$

其中， $k_1$ 与 $k_2$ 为待定系数。利用 origin 软件，可以将上面的数据拟合出图像（图 2）。

表 2 暗伏安特性实验数据拟合参数

	值	标准差	t 值	Prob >  t	Dependency
$k_1$	0.06638	0.00558	11.88984	5.85E-10	0.9953
$k_2$	5.30744	0.08185	64.84055	0	0.9953

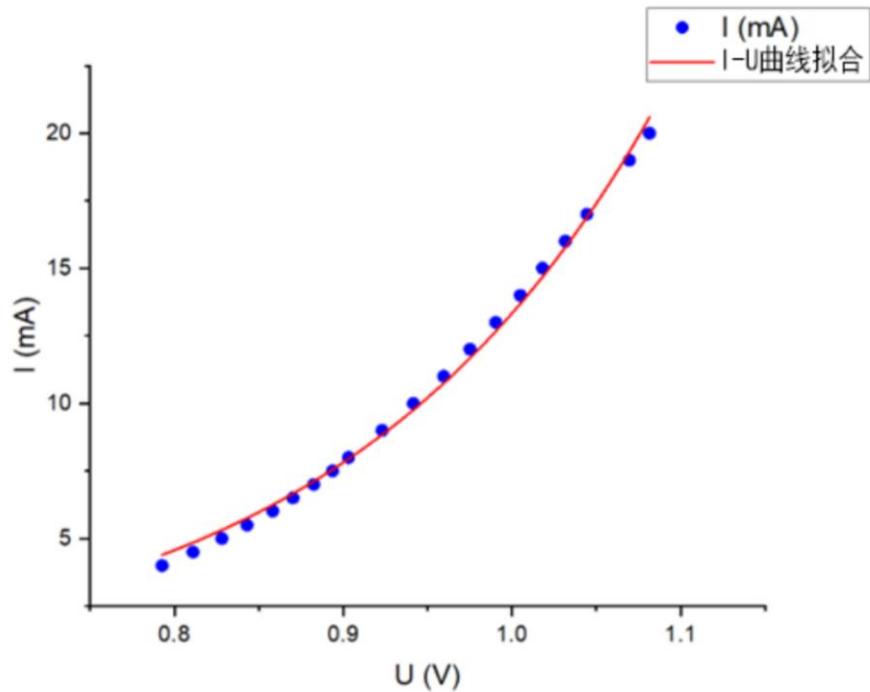


图 2 暗伏安特性实验数据拟合图像

## 4.2 硅光电池输出特性测量

### 4.2.1 实验步骤

不加偏压，用溴钨灯照射硅光电池，电阻箱作为负载。如图 3 连接电路，通过调整电阻箱阻值以及溴钨灯与硅光电池间距离，使用数字万用表电压档，选择 2V 量程，测得多组工作电压数据。根据测量数据，计算工作电流  $I$  和功率  $P$ 。

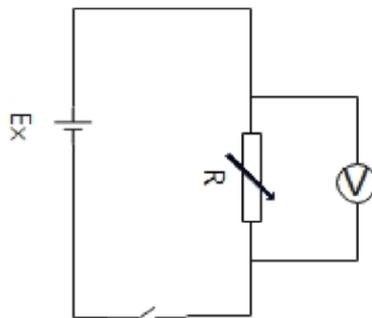


图 3 硅光电池输出特性测量电路图

## 4.2.2 实验数据

表 3 硅光电池输出特性测量实验数据

	RL/Ω	100	300	500	700	900	1000	3000	5000	7000	9000	10000	∞
d=20 cm L=250 lx	U/V	0.0428	0.1245	0.1954	0.2516	0.2922	0.3084	0.4089	0.4266	0.4336	0.4375	0.4389	0.4497
	I/mA	0.428	0.415	0.3908	0.359429	0.324667	0.3084	0.1363	0.08532	0.061943	0.048611	0.04389	—
	P/mW	0.018318	0.051668	0.076362	0.090432	0.094868	0.095111	0.055733	0.036398	0.026858	0.021267	0.019263	—
d=30 cm L=111.1 lx	U/V	0.0178	0.0535	0.0888	0.1238	0.1579	0.1744	0.3542	0.3879	0.4002	0.4065	0.4085	0.4251
	I/mA	0.178	0.178333	0.1776	0.176857	0.175444	0.1744	0.118067	0.07758	0.057171	0.045167	0.04085	—
	P/mW	0.003168	0.009541	0.015771	0.021895	0.027703	0.030415	0.041819	0.030093	0.02288	0.01836	0.016687	—
d=40 cm L=65 lx	U/V	0.0096	0.0290	0.0484	0.0678	0.0870	0.0967	0.2672	0.3432	0.3678	0.3793	0.3829	0.4083
	I/mA	0.096	0.096667	0.0968	0.096857	0.096667	0.0967	0.089067	0.06864	0.052543	0.042144	0.03829	—
	P/mW	0.000922	0.002803	0.004685	0.006567	0.00841	0.009351	0.023799	0.023557	0.019325	0.015985	0.014661	—
d=50 cm L=40 lx	U/V	0.0060	0.0183	0.0306	0.0429	0.0510	0.0612	0.1795	0.2732	0.3229	0.3455	0.3523	0.3926
	I/mA	0.06	0.061	0.0612	0.061286	0.056667	0.0612	0.059833	0.05464	0.046129	0.038389	0.03523	—
	P/mW	0.00036	0.001116	0.001873	0.002629	0.00289	0.003745	0.01074	0.014928	0.014895	0.013263	0.012412	—

## 4.2.3 数据处理

由实验原理可知，在有光条件下，流过 PN 结的电流与电压的自然指数成线性关系，所以我们可以将其简化为如下的公式：

$$I = k_1 - k_2(e^{k_3 U} - 1)$$

其中， $k_1$ 、 $k_2$ 与 $k_3$ 为待定系数， $k_1$ 是与光强成正比的系数。利用 origin 软件，可以将上面的数据拟合出图像（图 4）。

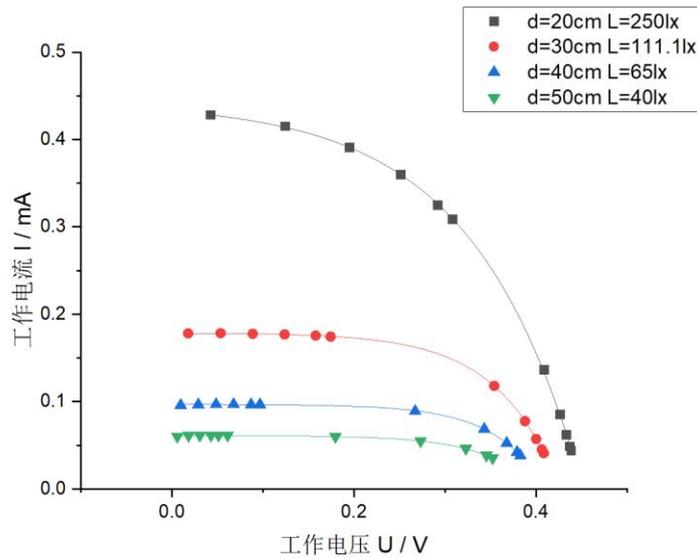


图 4 硅光电池输出特性测量拟合图像  $I - U$

同样的，我们可以拟合出输出功率  $P$  关于负载电阻  $R_L$  的图像（图 5）。

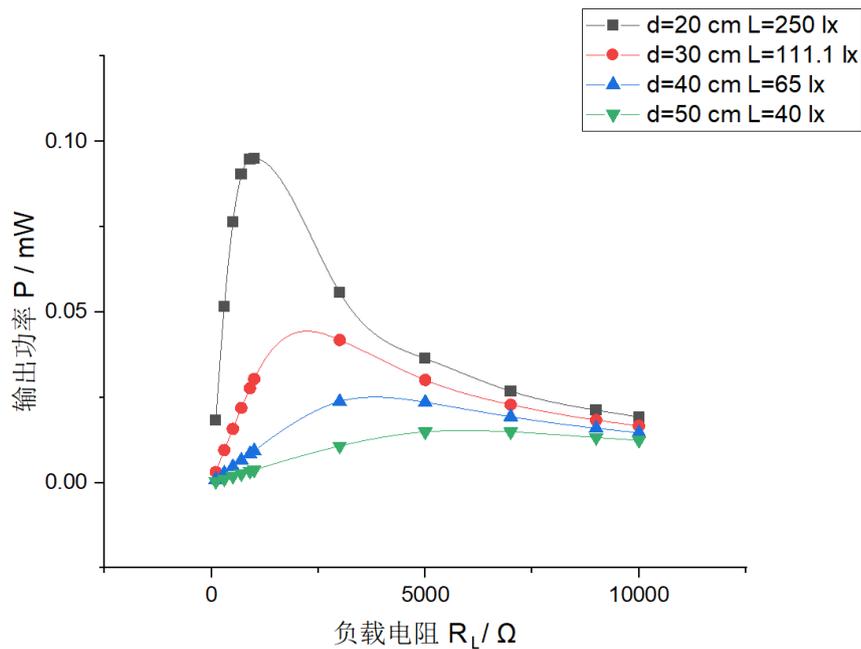


图 5 硅光电池输出特性测量拟合图像  $P - R_L$

为简化计算过程，直接从数据处理结果中选取不同光照下功率的最大值作为最大输出功率  $P_m$ ，对应即为最佳负载电阻  $R_m$ ，并计算填充因子  $FF = \frac{P_m}{U_{OC} I_{SC}}$ ，其中  $U_{OC}$ 、 $I_{SC}$  分别为开路电压、短路电流，开路电压与短路电流的测量结果将会在 4.3 中得到，填充因子  $FF$  计算结果如表 4。

表 4 不同光照下的  $L$ 、 $P_m$ 、 $R_m$ 、 $U_{OC}$ 、 $I_{SC}$ 、 $FF$

距离 $d/cm$	光照强度 $L/lx$	最大输出功率 $P_m/mW$	最佳负载电阻 $R_m/\Omega$	开路电压 $U_{OC}$	短路电流 $I_{SC}$	填充因子 $FF$
20	250	0.0951	1000	0.4506	0.399	0.529011
30	111.1	0.0418	3000	0.428	0.1736	0.562837
40	62.5	0.0238	3000	0.4109	0.0976	0.593425
50	40	0.0149	5000	0.3963	0.0616	0.611486

### 4.3 硅光电池开路电压、短路电流与光照特性测量

#### 4.3.1 实验步骤

如图 6、图 7 连接电路，不加偏压，用溴钨灯照射硅光电池。通过调整溴钨灯与硅光电池的距离，测量计算电池的开路电压、短路电流以及和光照的关系。出于对实验安全的考虑，测量短路电流时，测量短路电流时用  $50\Omega$  的电阻作为负载，通过测量其两端电压间接测量短路电流。由于硅光电池自身内阻较大，故负载电阻的影响可忽略不计。

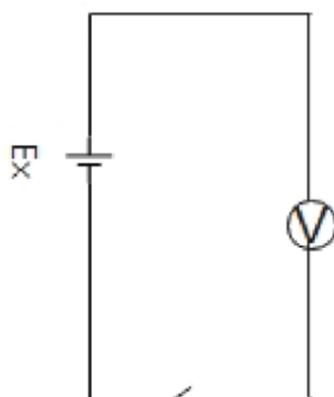


图 6 硅光电池开路电压测量电路图

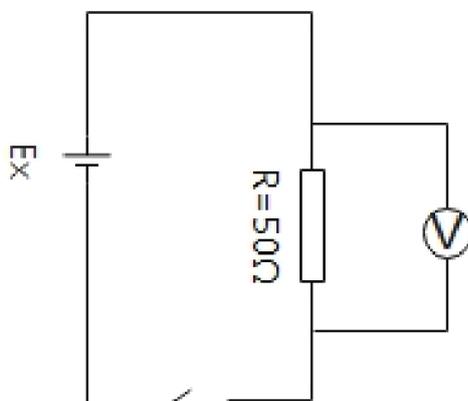


图 7 硅光电池短路电流测量电路图

### 4.3.2 实验数据

表 5 硅光电池路电压、短路电流与光照特性测量实验数据

距离 D (cm)	20	25	30	35	40	45	50
光照强度 L (lx)	250	160	111.1111	81.63265	62.5	49.38272	40
开路电压 $U_{OC}$ (V)	0.4506	0.4387	0.4280	0.4195	0.4109	0.4034	0.3963
短路电压 $U_{SC}$ (mV)	19.95	12.79	8.68	6.47	4.88	3.84	3.08
短路电流 $I_{SC}$ (mA)	0.399	0.2558	0.1736	0.1294	0.0976	0.0768	0.0616

### 4.3.3 数据处理

根据所测得数据, 绘制  $U_{OC} - L$  散点图, 并采用 origin 软件中 Log3P1 模型对散点进行曲线拟合, 拟合结果如图 8 所示, 具体参数如表 6。

表 6 硅光电池开路电压光照特性拟合参数

模型	$Log3P1$
公式	$y = a - b * \ln(x + c)$
参数 $a$	$0.30937 \pm 0.00239$
参数 $b$	$-0.0258 \pm 4.41E - 04$
参数 $c$	$-11.0415 \pm 1.17318$
$R^2$	0.9999

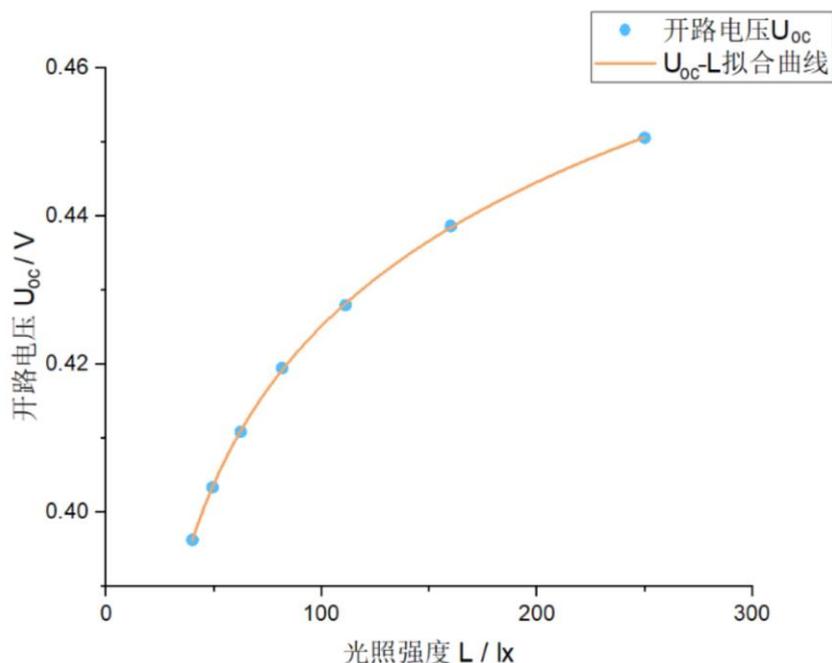


图 8 硅光电池开路电压光照特性拟合曲线

根据  $Log3P1$  模型的方程和拟合结果，给出  $U_{oc} - L$  曲线的近似函数，为

$$U_{oc} = 0.30937 + 0.0258 \ln(L - 11.0415) \quad (V)$$

根据数据处理结果，绘制  $I_{sc} - L$  散点图，并采用 origin 软件中线性模型对散点进行拟合，拟合结果如图 9 所示，具体参数如表 7。

表 7 硅光电池短路电流光照特性拟合参数

	值	标准差	t-值	Prob> t
截距	-0.00279	8.75E-04	-3.1937	0.02416
斜率	0.00161	6.82E-06	235.6306	2.61E-11
$R^2$	0.99991			

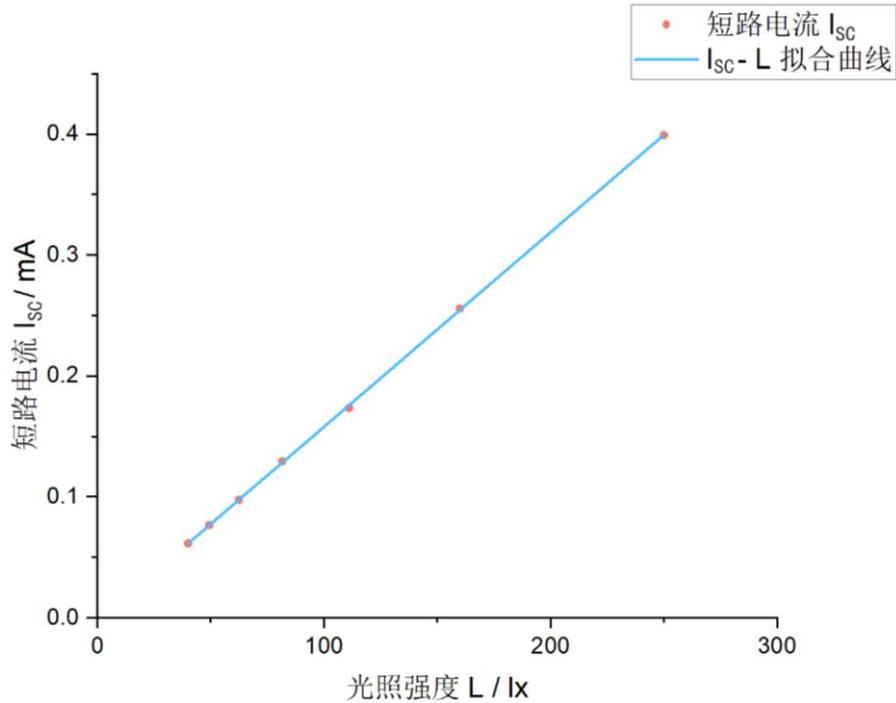


图 9 硅光电池短路电流光照特性拟合曲线

根据拟合的结果可以得出硅光电池短路电流与光照强度  $I_{sc} - L$  的近似关系式:

$$I_{sc} = 0.00161L - 0.00279 \quad (mA)$$

#### 4.4 不同负载下硅光电池输出电压与光照特性测量

##### 4.4.1 实验步骤

如图 10 连接电路，不加偏压，用溴钨灯照射硅光电池。通过调整溴钨灯与硅光电池的距离以及电阻箱阻值，测量电池的开路电压，并计算其与光照的关系。

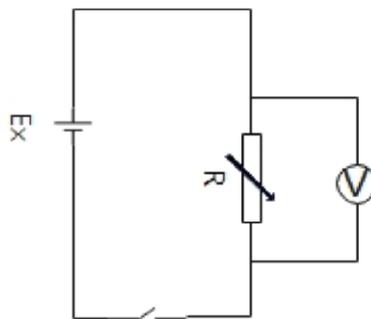


图 10 不同负载下硅光电池输出电压与光照特性测量实验电路图

#### 4.4.2 实验数据

表 8 不同负载下硅光电池输出电压与光照特性测量实验数据

	d (cm)	20	25	30	35	40	45	50
	L (lx)	250	160	111.1111	81.63265	62.5	49.38272	40
100 $\Omega$	U (V)	0.0397	0.0254	0.0176	0.0127	0.0095	0.0074	0.0059
	I (mA)	0.397	0.254	0.176	0.127	0.095	0.074	0.059
1000 $\Omega$	U (V)	0.2996	0.2360	0.1729	0.1265	0.0961	0.0748	0.0605
	I (mA)	0.2996	0.236	0.1729	0.1265	0.0961	0.0748	0.0605
5000 $\Omega$	U (V)	0.4238	0.4053	0.3871	0.3668	0.3419	0.3086	0.2709
	I (mA)	0.08476	0.08106	0.07742	0.07336	0.06838	0.06172	0.05418
10000 $\Omega$	U (V)	0.4369	0.4218	0.4082	0.3949	0.3814	0.3669	0.3507
	I (mA)	0.04369	0.04218	0.04082	0.03949	0.03814	0.03669	0.03507

#### 4.4.3 数据处理

在 origin 软件中对实验数据进行拟合，结果如图 11、12、13 所示。

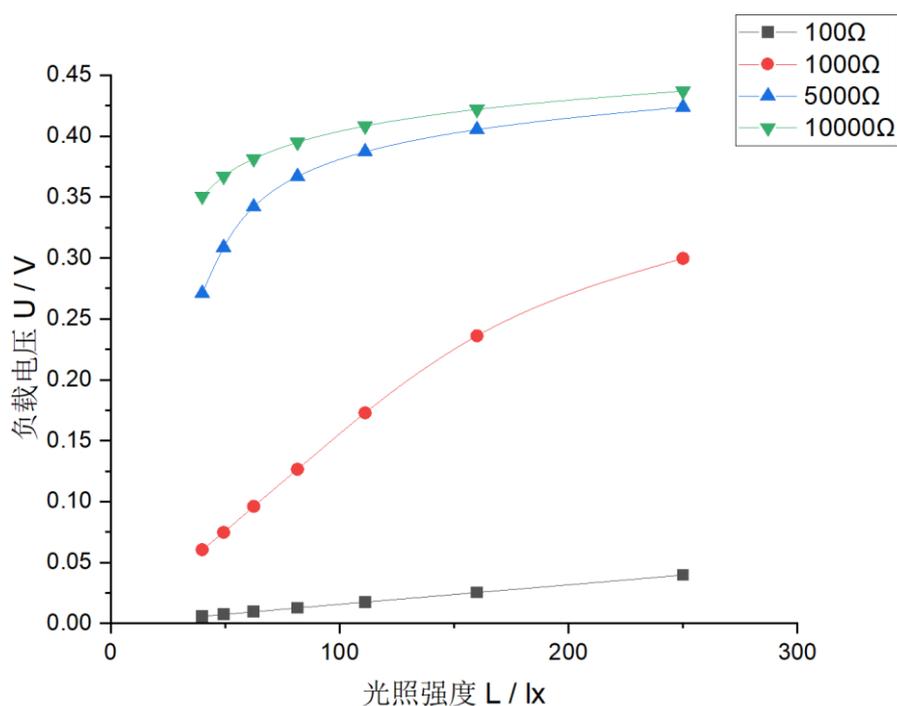


图 11 不同负载下硅光电池输出电压与光照关系拟合曲线

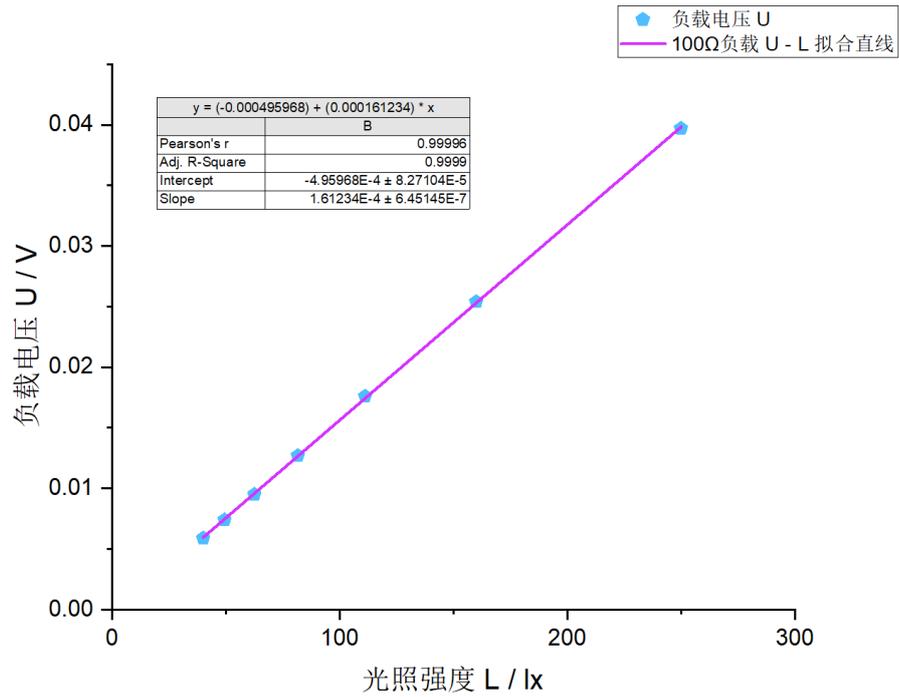


图 12  $R = 100\Omega$ 负载下硅光电池输出电压与光照直线拟合

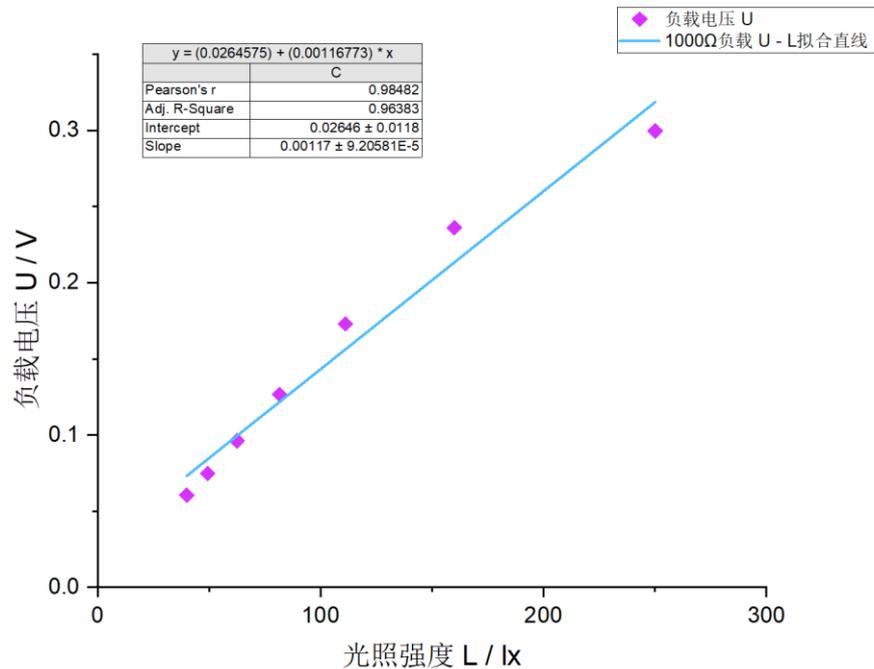


图 13  $R = 1000\Omega$ 负载下硅光电池输出电压与光照直线拟合

在对 $100\Omega$ 、 $1000\Omega$ 负载实验组进行直线拟合后发现， $100\Omega$ 负载下硅光电池的输出电压非常接近线性，皮尔逊相关系数 $r$ 达到0.99996，而 $1000\Omega$ 负载下硅光电池的输出电压线性相关性较弱， $r$ 值仅有0.984，在对另外两组实验进行线性相关性分析后发现， $5000\Omega$ 、 $10000\Omega$ 负载实验组的 $r$ 值更是低于0.9。由此可见，负载阻值与输出电压和光照强度的线性相关性成

负相关。当负载阻值较小时，输出电压与光照强度近似呈线性相关；当负载阻值较大时，输出电压与光照强度呈非线性相关，电压随光强增大而增大但增速渐缓，更多体现出对数函数的性质（与Log3P1模型吻合度较高）。

## 4.5 反向偏压下硅光电池电流与光照特性测量

### 4.5.1 实验步骤

如图 14 连接电路，对硅光电池施加反向偏压，用溴钨灯照射硅光电池。通过调整溴钨灯与硅光电池的距离，测量负载电阻两端电压，进而计算硅光电池电流与光照强度之间的关系。

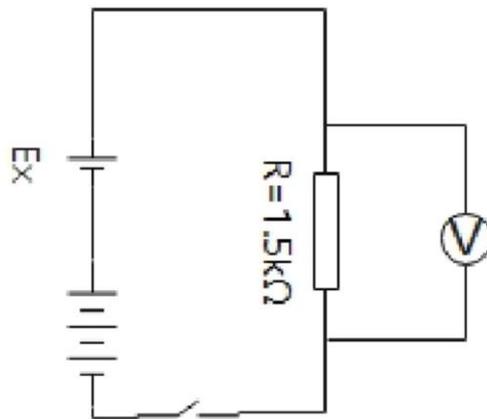


图 14 反向偏压下硅光电池电流与光照特性测量电路图

### 4.5.2 实验数据

表 9 反向偏压下硅光电池电流与光照特性测量实验数据

距离 D (cm)	20	25	30	35	40	45	50
光照强度 L (lx)	250	160	111.1111	81.63265	62.5	49.38272	40
输出电压 U (V)	0.6030	0.3853	0.2690	0.1951	0.1491	0.1174	0.0945
输出电流 I (mA)	0.402	0.256867	0.179333	0.130067	0.0994	0.078267	0.063

### 4.5.3 数据处理

根据所测得数据，绘制  $I - L$  散点图，并采用线性模型对散点进行拟合，拟合结果及具体参数如图 15 所示。

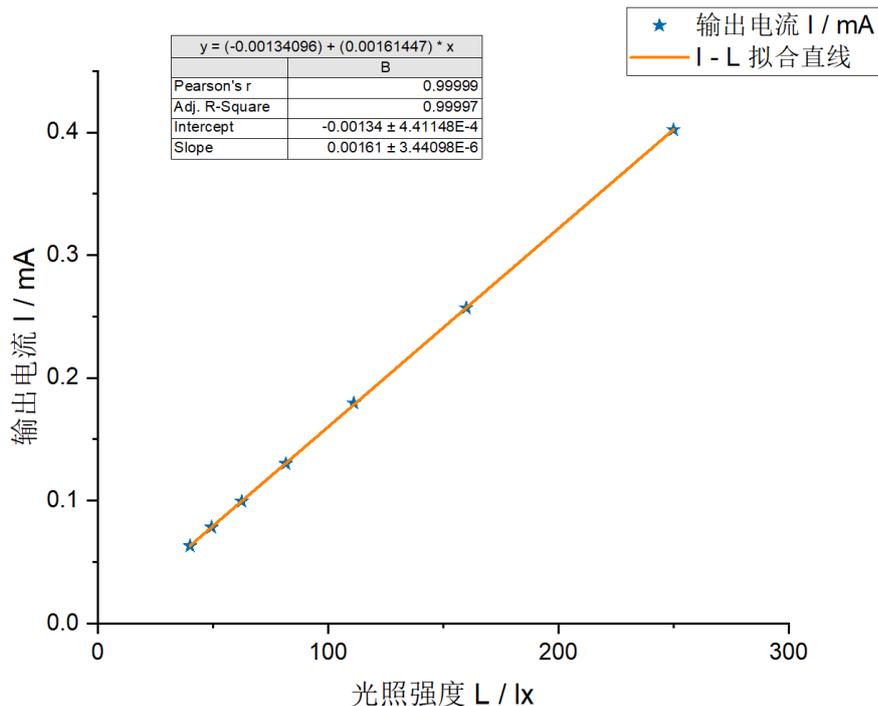


图 15 反向偏压下硅光电池电流与光照强度关系曲线拟合

根据线性拟合的方程以及拟合结果,可得反向偏压下硅光电池电流与光照强度的近似函数,为

$$I = 0.00161 L - 0.00134 \text{ (mA)}$$

## 5 实验讨论与思考题

### 5.1 实验讨论

关于本实验的误差,可以从以下几个角度来定性分析:

#### 1. 光照强度:

- (1) 实验中的溴钨灯并非理想点光源,所以无法严格保证硅光电池接收到的光照强度与距离的平方成反比;
- (2) 由于无法准确判断硅光电池受光面的位置,硅光电池与溴钨灯间的距离测量有比较大的误差;
- (3) 导轨与电源、硅光电池、光线可能不垂直;
- (4) 环境中除了实验光源外的外界光源干扰。

#### 2. 电阻:

- (1) 测量中发现存在电阻箱误差的情况;
- (2) 导线、接线柱等电阻的影响。

#### 3. 电流与电压:

- (1) 在短路电流测量实验中,使用 $50\Omega$ 负载时的电流作为短路电流对实验结果有一定影响。

## 5.2 思考题

1. 光电池在工作时为什么要处于零偏或反偏?

答: 当硅光电池 P-N 结处于零偏或反偏时, 耗尽区内存在内电场。这时如果有光照, 电池对光子的本征吸收就会激发少数载流子, 进而引起光伏效应, 即硅光电池正常工作。

当 P-N 结处于正偏时, 外电场与内电场方向相反, 耗尽区的内电场减弱甚至反向, 导致光伏效应无法正常激发, 光电池无法正常工作。

2. 当增加光照强度, 硅光电池的哪些参数发生变化?

答: 当增大光照强度时

- (1) 添加负载后的工作电流与工作电压之比会增大
- (2) 最大输出功率增大, 最佳负载电阻减小
- (3) 填充因子减小
- (4) 开路电压以对数线性方式增大, 短路电流线性增大
- (5) 添加负载后的负载电压增大
- (6) 反向偏压下的输出电压与电流增大