



大学物理综合实验——太阳能电池特性实验

刘元彻 PB21020505 21 级物理学院 1 班

2023 年 4 月 10 日

摘要：硅太阳能电池分为单晶硅太阳能电池、多晶硅薄膜太阳能电池和非晶硅薄膜太阳能电池三种，其硅掺杂 PN 结的光伏效应允许将光能转化为电能。本文对三种太阳能电池进行实验，从而对太阳能电池的基本性质及其能量转化效率更深入地了解。[1]

关键词：硅光电池；半导体；光电转化效率；

1 实验原理

1.1 硅光电池的基本原理 [1]

太阳能电池利用半导体 P-N 结受光照射时的光伏效应发电，太阳能电池的基本结构就是一个大面积平面 P-N 结。P 型半导体中有相当数量的空穴，几乎没有自由电子。N 型半导体中有相当数量的自由电子，几乎没有空穴。当两种半导体结合在一起形成 P-N 结时，N 区的电子（带负电）向 P 区扩散，P 区的空穴（带正电）向 N 区扩散，在 P-N 结附近形成空间电荷区与势垒电场。势垒电场会使载流子向扩散的反方向作漂移运动，最终扩散与漂移达到平衡，使流过 P-N 结的净电流为零。在空间电荷区内，P 区的空穴被来自 N 区的电子复合，N 区的电子被来自 P 区的空穴复合，使该区内几乎没有能导电的载流子，又称为结区或耗尽区。

当光电池受光照射时，部分电子被激发而产生电子-空穴对，在结区激发的电子和空穴分别被势垒电场推向 N 区和 P 区，使 N 区有过量的电子而带负电，P 区有过量的空穴而带正电，P-N 结两端形成电压，这就是光伏效应，若将 P-N 结两端接入外电路，就可向负载输出电能。

1.2 实验内容

在一定的光照条件下，改变太阳能电池负载电阻的大小，测量其输出电压与输出电流，得到输出伏安特性。

太阳能电池的输出功率为输出电压与输出电流的乘积。同样的电池及光照条件，负载电阻大小不一样时，输出的功率是不一样的。输出电压与输出电流的最大乘积值称为最大输出功率 P_{max}

填充因子 $F.F$ 定义为：

$$F.F = \frac{P_{max}}{V_{OC} \times I_{SC}}$$

填充因子是表征太阳能电池性能优劣的重要参数，其值越大，电池的光电转换效率越高，一般的硅光电池 $F.F$ 值在 0.75 ~ 0.8 之间。

转换效率 η_s 定义为：

$$\eta_s(\%) = \frac{P_{max}}{P_{in}} \times 100\%$$

其中 P_{in} 是入射到太阳能电池表面的光功率。

2 实验器材

导轨、滑动支架及配套光源，滑动支架上的试件盒及配套的遮光罩，三种不同的太阳能电池，可变负载，测试仪。

光源采用碘钨灯，它的输出光谱接近太阳光谱。调节光源与太阳能电池之间的距离可以改变照射到太阳能电池上的光功率，具体数值由光功率计测量。测试仪为实验提供电源，同时可以测量并显示电流、电压、以及光功率的数值。

电压源：可以输出 0 ~ 8V 连续可调的直流电压。为太阳能电池伏安特性测量提供电压。电压/光功率表：通过“测量转换”按键，可以测量输入“电压输入”接口的电压，或接入“光功率输入”接口的光功率计探头测量到的光功率数值。表头下方的指示灯确定当前的显示状态。通过“电压量程”或“光功率量程”，可以选择适当的显示范围。

电流表：可以测量并显示 0 ~ 200mA 的电流，通过“电流量程”选择适当的显示范围。

3 实验方案 [2, 1]

3.1 暗伏安特性

实验中的暗伏安特性是指无光照射时，流经太阳能电池的电流与外加电压之间的关系。用遮光罩罩住太阳能电



池，按下图所示的方法连接电路。将待测的太阳能电池接到测试仪上的“电压输出”接口，电阻箱调至 50Ω 后串连进电路起保护作用，用电压表测量太阳能电池两端电压，电流表测量回路中的电流。

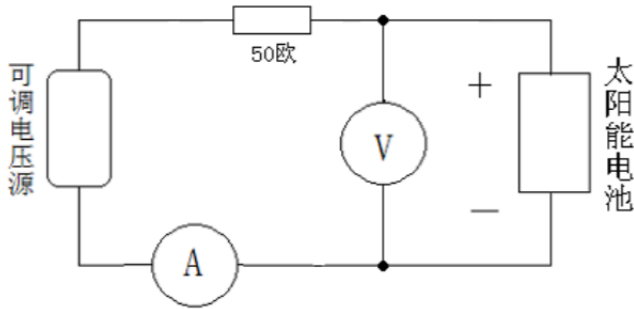


图 1: 暗伏安特性测量电路图

将电压源调到 $0V$ ，然后逐渐增大输出电压，每间隔 $0.3V$ 记一次电流值。然后将电压输入调到 $0V$ 。然后将“电压输出”接口的两根连线互换，即给太阳能电池加上反向的电压。逐渐增大反向电压，记录电流随电压变换的数据。

3.2 开路电压，短路电流与光强关系测量

打开光源开关，预热 5 分钟。打开遮光罩。将光功率探头装在太阳能电池板位置，探头输出线连接到太阳能电池特性测试仪的“光功率输入”接口上。测试仪设置为“光功率测量”。窗口显示的数据的单位是： W/m^2 ，由近及远移动滑动支架，测量距光源一定距离的光强 $I = P/S$, P 为测量到的光功率， $S = 0.2cm^2$ 为探头采光面积。

将光功率探头换成单晶硅太阳能电池，测试仪设置为“电压表”状态。按下面的电路图接线，按测量光强时的距离值（光强已知），记录开路电压值。

另外，按下面的电路图接线，记录短路电流值。将单晶硅太阳能电池更换为多晶硅和非晶硅太阳能电池，重复测量步骤，并记录数据。

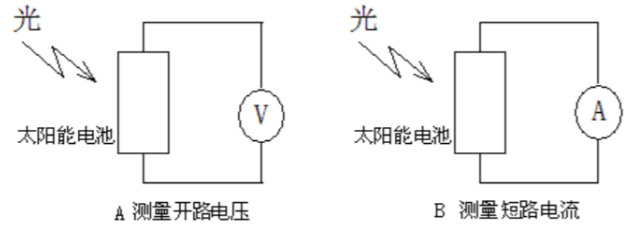


图 2: 开路电压，短路电流与光强关系测量电路图

3.3 太阳能电池输出特性实验

按如图所示的电路图接线，以电阻箱作为太阳能电池负载。在一定光照强度下（将滑动支架固定在导轨上某一个位置），分别将三种太阳能电池板安装到支架上，通过改变电阻箱的电阻值，记录太阳能电池的输出电压 V 和电流 I ，并计算输出功率 $P_O = V \times I$ 。

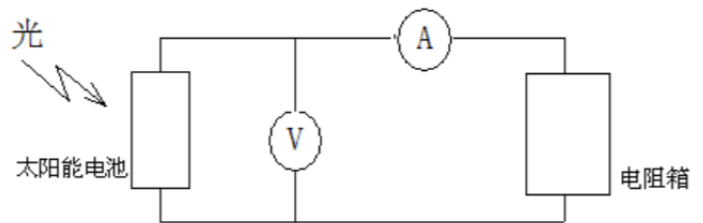


图 3: 太阳能电池输出特性实验电路图

作 3 种太阳能电池的输出伏安特性曲线及功率曲线，找出最大功率点，对应的电阻值即为最佳匹配负载。计算填充因子和计算转换效率。

4 实验结果与数据处理

4.1 暗伏安特性

按照实验步骤，测得的数据记录如下：



表 1: 暗伏安特性测量数据

电压 (V)	电流 (mA)		
	单晶硅	多晶硅	非晶硅
-4	-0.530	-0.125	-0.074
-3	-0.388	-0.082	-0.056
-2	-0.243	-0.046	-0.037
-1	-0.113	-0.020	-0.018
0	0.000	0.000	0.000
0.3	0.042	0.013	0.004
0.6	0.098	0.039	0.010
0.9	0.173	0.094	0.014
1.2	0.288	0.203	0.020
1.5	0.500	0.447	0.025
1.8	0.896	0.996	0.034
2.0	1.345	1.686	0.041
2.1	1.678	2.2	0.045
2.2	2.0	2.9	0.048
2.3	2.6	4.1	0.053
2.4	3.4	6.0	0.060
2.5	4.6	9.0	0.070
2.6	6.5	14.4	0.086
2.7	9.7	25.1	0.107
2.8	15.4	42.1	0.130
2.9	25.6	69.4	0.157
3.0	43.5	106.8	0.186

根据以上数据，我们可以绘制出三种太阳能电池的图线：

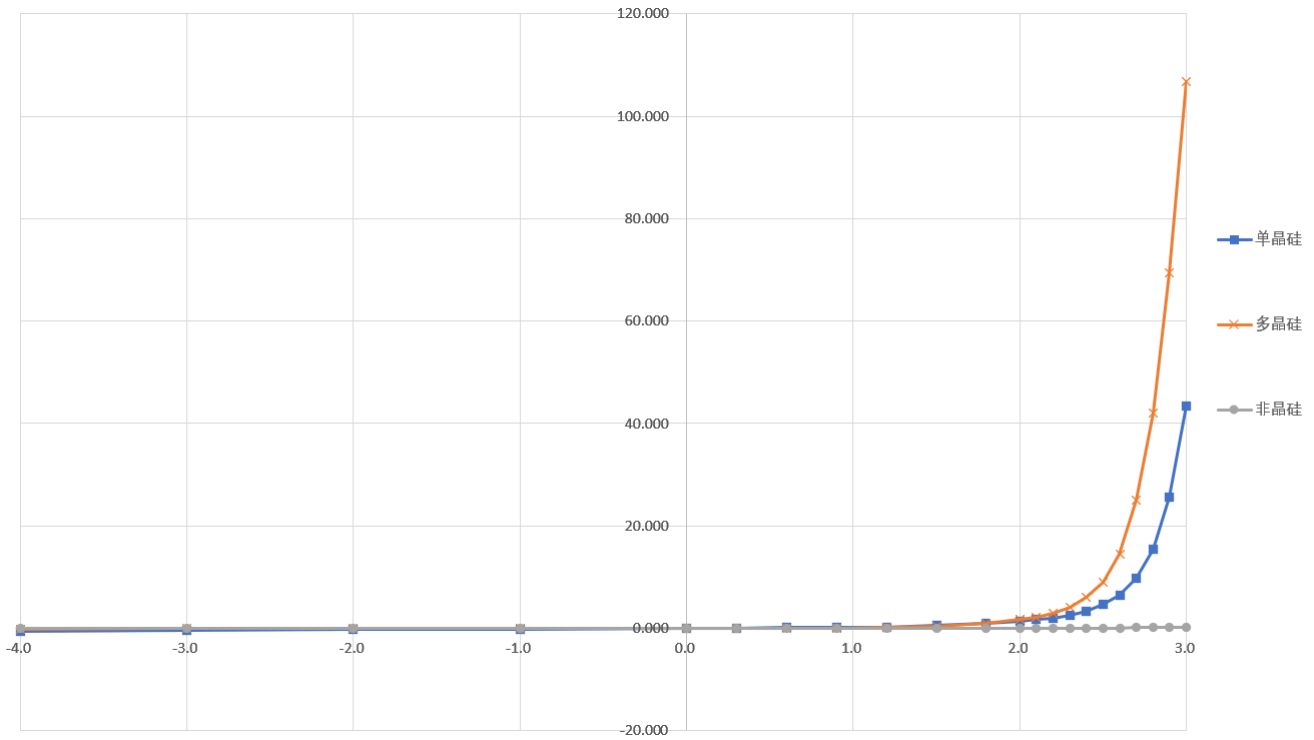


图 4: 三种太阳能电池的暗伏安特性曲线

4.2 开路电压，短路电流与光强关系

按照实验步骤，测得的数据记录如下：

表 2: 开路电压，短路电流与光强关系测量

距离 (cm)		30	35	40	45	50
光功率 (mW)		3.018	2.236	1.758	1.440	1.228
光强 (W/m^2)		150.9	111.8	87.9	72.0	61.4
单晶硅	开路电压 $V_{OC}(V)$	2.84	2.77	2.73	2.68	2.63
	短路电流 $I_{SC}(mA)$	21.2	15.6	12.1	9.7	8.1
多晶硅	开路电压 $V_{OC}(V)$	2.56	2.50	2.45	2.40	2.35
	短路电流 $I_{SC}(mA)$	12.2	9.0	7.0	5.7	4.7
非晶硅	开路电压 $V_{OC}(V)$	3.65	3.58	3.52	3.46	3.41
	短路电流 $I_{SC}(mA)$	0.812	0.620	0.491	0.406	0.348

根据上面的数据，我们可以绘制出三种太阳能电池开路电压、短路电流与光强关系的曲线：

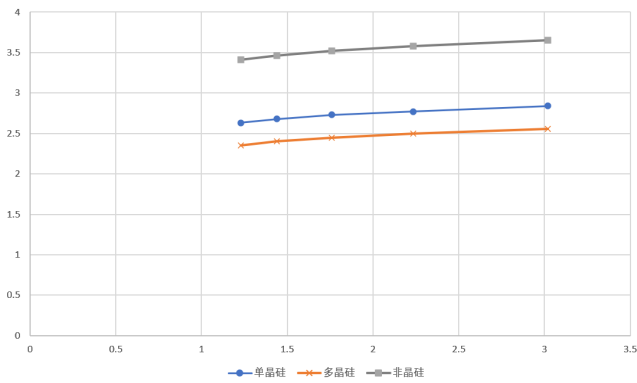


图 5: 开路电压和光强关系

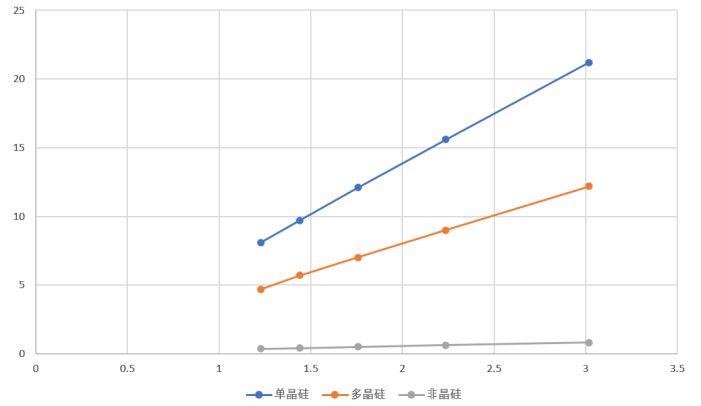


图 6: 短路电流和光强关系

4.3 太阳能电池输出特性实验

按照实验步骤，测得的数据记录如下（见下一页）：由此可以绘制出输出特性曲线（以下所有图线，横轴为电压，单位 V；纵轴为电流和功率，单位为 mA 和 mW）：

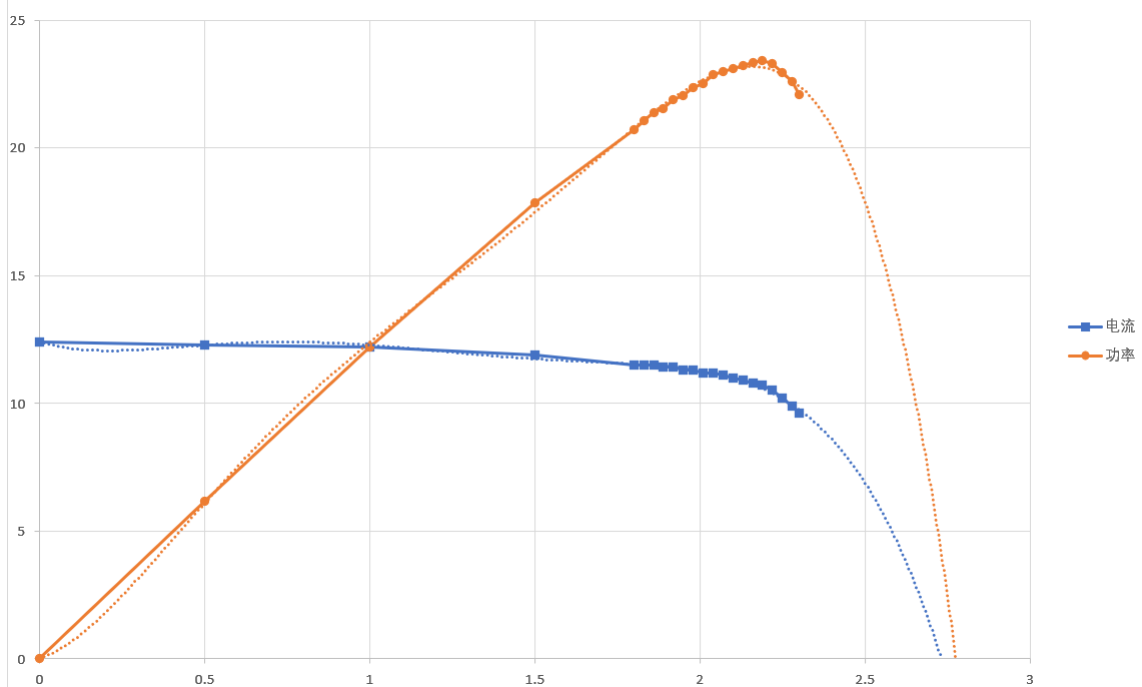


图 7: 单晶硅电池的输出特性曲线

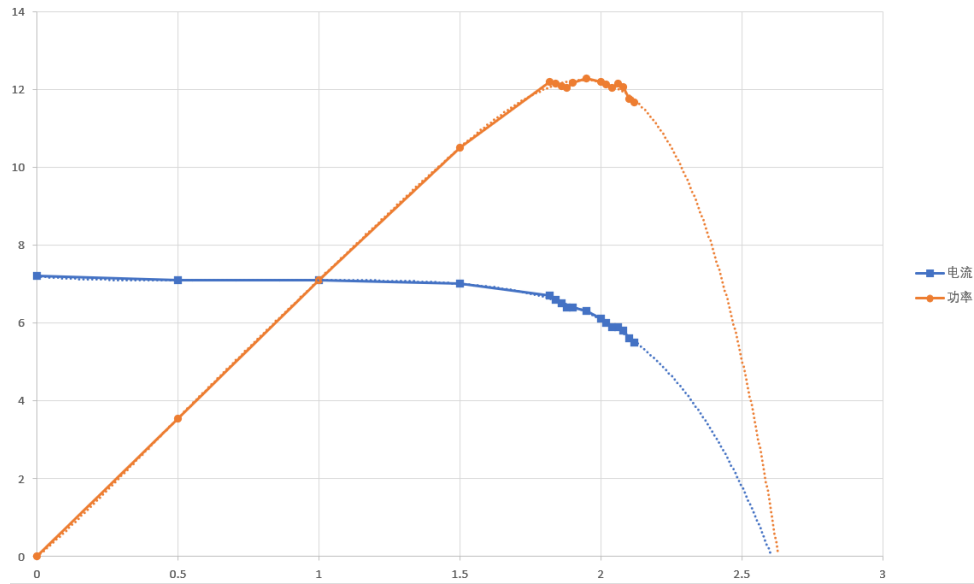


图 8: 多晶硅电池的输出特性曲线

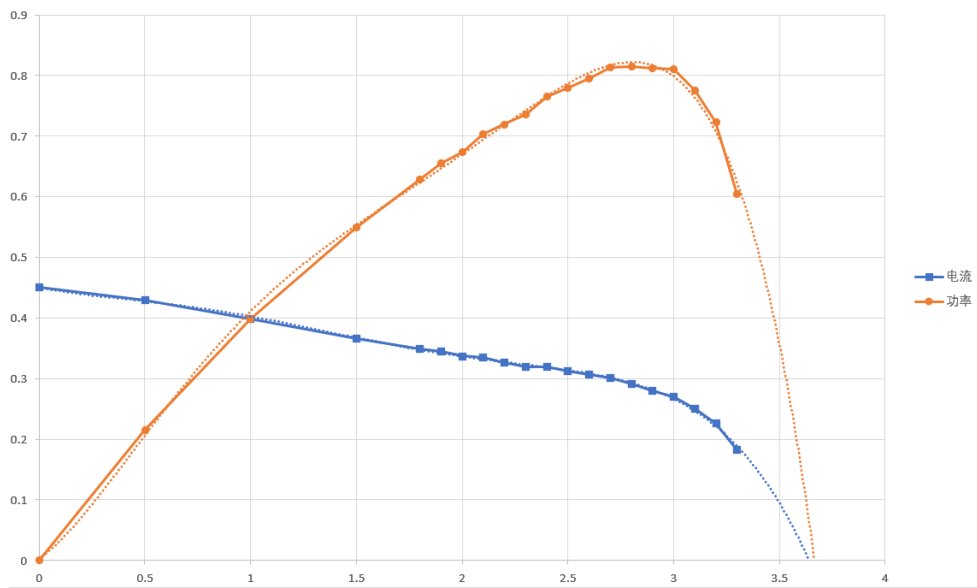


图 9: 非晶硅电池的输出特性曲线



而本实验中，所处位置光强对应为 $I = 87.9\text{W/m}^2$ ，而实验室所用的硅光电池具有面积 $S = 5\text{cm} \times 5\text{cm} = 2.5 \times 10^{-3}\text{m}^2$ ，所以算出 $P_{in} = 219.75\text{mW}$

对应计算出，三种硅光电池的填充因子：

$$F.F_{\text{单}} = 0.709, F.F_{\text{多}} = 0.716, F.F_{\text{非}} = 0.471$$

以及三种电池的转换效率：

$$\eta_{\text{单}} = 10.66\%, \eta_{\text{多}} = 5.59\%, \eta_{\text{非}} = 0.37\%$$

单晶硅			多晶硅			非晶硅		
电压 (V)	电流 (mA)	功率 (mW)	电压 (V)	电流 (mA)	功率 (mW)	电压 (V)	电流 (mA)	功率 (mW)
0.5	12.3	6.15	0.5	7.1	3.55	0.5	0.43	0.215
1	12.2	12.2	1	7.1	7.1	1	0.399	0.399
1.5	11.9	17.85	1.5	7	10.5	1.5	0.366	0.549
1.8	11.5	20.7	1.82	6.7	12.194	1.8	0.349	0.6282
1.83	11.5	21.045	1.84	6.6	12.144	1.9	0.345	0.6555
1.86	11.5	21.39	1.86	6.5	12.09	2	0.337	0.674
1.89	11.4	21.546	1.88	6.4	12.032	2.1	0.335	0.7035
1.92	11.4	21.888	1.9	6.4	12.16	2.2	0.327	0.7194
1.95	11.3	22.035	1.95	6.3	12.285	2.3	0.32	0.736
1.98	11.3	22.374	2	6.1	12.2	2.4	0.319	0.7656
2.01	11.2	22.512	2.02	6	12.12	2.5	0.312	0.78
2.04	11.2	22.848	2.04	5.9	12.036	2.6	0.306	0.7956
2.07	11.1	22.977	2.06	5.9	12.154	2.7	0.301	0.8127
2.1	11	23.1	2.08	5.8	12.064	2.8	0.291	0.8148
2.13	10.9	23.217	2.1	5.6	11.76	2.9	0.28	0.812
2.16	10.8	23.328	2.12	5.5	11.66	3	0.27	0.81
2.19	10.7	23.433				3.1	0.25	0.775
2.22	10.5	23.31				3.2	0.226	0.7232
2.25	10.2	22.95				3.3	0.183	0.6039
2.28	9.9	22.572						
2.3	9.6	22.08						

其中加粗的就是最大输出功率所对应的电压值。

5 思考与讨论

查阅资料 [3] 可得，大部分硅光电池的填充因子在 50% 到 80% 之间，效率大约在 10% 到 20% 左右。对于本次实验，单晶硅和多晶硅硅光电池的填充因子比较符合资料所述；单晶硅的能量转换效率符合资料所述；但是其他数值符合较差，特别是非晶硅电池。考虑到商用硅光电池在进行测试时需要严苛地控制实验环境，这些误差是可以容忍的。此外，资料显示，非晶硅电池的能量转换效率与其面积成反比，基于此，我们可以推测实验室中的非晶硅电池面积较大，因此其测得的效率不如预期。



此外，我们测定光强时使用微小的探测器测量光轴中心处某点光强，而硅光电池的面积要比探测器大得多，在离轴部分的光强自然要小一些，所以我们测得的硅光电池输入功率偏大，进而转化效率偏小。

参考文献

- [1] 中国科学技术大学物理实验教学中心. 太阳能电池特性实验 (实验讲义). Mar. 20, 2022. URL: <http://pems.ustc.edu.cn/uploads/project/20230320/6789300dd0e493fc49f16a319654773d.pdf> (visited on 04/02/2023).
- [2] 吴泳华, 霍剑青, 浦其荣. 大学物理实验. 2nd ed. Vol. 第二册. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [3] 康华光. 电子技术基础 (模拟部分). 6th ed. 北京: 高等教育出版社, 2013.