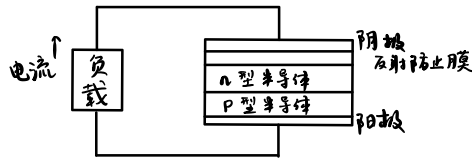


实验名称 太阳能电池的基本特性研究

一、预习

1. 太阳能电池的基本结构和工作原理是什么？
2. 太阳能电池的开路电压、短路电流、最佳匹配负载和填充因子的物理含义是什么？

答：1. (1) 基本结构：由半导体材料制成的PN结。



(2) 工作原理：半导体PN结的光生伏打效应。当太阳光照射PN结时，在半导体内的束缚电子由于获得了光子的能量而成为自由电子，相应地产生电子-空穴对，在势垒电场的作用下，电子被驱向N区，空穴被驱向P区，从而使N区有过剩的电子，P区有过剩的空穴。于是，在PN结的附近形成了与势垒电场相反的光生电场。光生电场的一部分抵消了势垒电场，另一部分使P型区带正电，N型区带负电，于是就使得N区与P区间的薄层产生电动势，即光生伏打电动势。接通外电路时，便有电流输出。

2、① 开路电压：在一定的温度和光照(辐照度)条件下，太阳能电池在空载(即开路)情况下的端电压即为开路电压。

② 短路电流：在一定的温度和光照(辐照度)条件下，太阳能电池在端电压为0时输出的电流即为短路电流。

③ 最佳匹配负载：调节负载电阻 R_L 到某一值 R_m 时，在伏安特性曲线上得到一点 M ，此处工作电流 I_m 与工作电压乘积为最大，则称 M 点为该太阳能电池的最大功率点， R_L 为该太阳能电池的最佳匹配负载。

④ 填充因子：定义为太阳能电池的最大功率与开路电压和短路电流的乘积之比。

二、原始数据记录

1. 硅太阳能电池的暗特性测量

表1 太阳能电池的暗伏安特性测量

电压 (V)	电流 (mA)		
	单晶硅	多晶硅	非晶硅
-7	-0.167	-0.390	-0.116
-6	-0.142	-0.312	-0.095
-5	-0.118	-0.239	-0.075
-4	-0.094	-0.174	-0.056
-3	-0.069	-0.117	-0.040
-2	-0.046	-0.071	-0.026
-1	-0.023	-0.033	-0.012
0	0.000	0.000	0.000
0.3	0.011	0.021	0.003
0.6	0.030	0.062	0.008
0.9	0.076	0.140	0.014
1.2	0.180	0.299	0.021
1.5	0.468	0.678	0.028
1.8	1.408	1.562	0.036
2.1	4.3	3.8	0.054
2.4	13.3	9.8	0.141
2.7	41.0	28.7	0.555
3.0	106.3		2.2
2.75		96.3	

2. 开路电压、短路电流与光强关系测量

表2 两种太阳能电池开路电压与短路电流随光强变化关系

距离 (cm)		15	20	25	30	35	40	45	50
光强 I (W/m^2)		656	351	215	149.0	109.9	85.1	68.5	56.4
单晶硅	开路电压 V_{oc} (V)	2.79	2.60	2.49	2.38	2.31	2.24	2.18	2.13
	短路电流 I_{sc} (mA)	67.8	36.5	22.9	15.9	11.8	9.2	7.3	6.1
多晶硅	开路电压 V_{oc} (V)	2.86	2.73	2.64	2.53	2.44	2.36	2.29	2.23
	短路电流 I_{sc} (mA)	72.8	38.6	24.4	17.0	12.6	9.8	7.8	6.5
非晶硅	开路电压 V_{oc} (V)	3.02	2.91	2.84	2.79	2.74	2.71	2.67	2.65
	短路电流 I_{sc} (mA)	7.8	4.3	2.7	1.899	1.421	1.107	0.902	0.753

3. 太阳能电池输出特性测试

表3 两种太阳能电池输出特性实验

光强 $I = 149.0 \text{ W/m}^2$

单晶硅	输出电压 $V(V)$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8
	输出电流 $I(mA)$	15.8	15.8	15.7	15.7	15.7	15.7	15.6	15.6	15.3	14.5
	输出功率 $P_o(W)$	0	3.16×10^{-3}	6.28×10^{-3}	9.42×10^{-3}	1.26×10^{-2}	1.57×10^{-2}	1.87×10^{-2}	2.18×10^{-2}	2.45×10^{-2}	2.61×10^{-2}
	输出电压 $V(V)$	2.0	1.75	2.2	2.3	2.35					
	输出电流 $I(mA)$	12.7	14.8	8.2	4.6	1.461					
	输出功率 $P_o(W)$	2.54×10^{-2}	2.59×10^{-2}	1.80×10^{-2}	1.06×10^{-2}	3.43×10^{-3}					
多晶硅	输出电压 $V(V)$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8
	输出电流 $I(mA)$	17.1	17.1	17.1	17.1	17.0	17.0	16.9	16.7	16.2	15.3
	输出功率 $P_o(W)$	0	3.42×10^{-3}	6.84×10^{-3}	1.03×10^{-2}	1.36×10^{-2}	1.78×10^{-2}	2.03×10^{-2}	2.34×10^{-2}	2.59×10^{-2}	2.75×10^{-2}
	输出电压 $V(V)$	2.0	1.9	2.2	2.3	2.4	2.45				
	输出电流 $I(mA)$	13.6	14.5	10.2	7.5	3.4	0.384				
	输出功率 $P_o(W)$	2.72×10^{-2}	2.755×10^{-2}	2.24×10^{-2}	1.72×10^{-2}	8.16×10^{-3}	9.4×10^{-4}				
非晶硅	输出电压 $V(V)$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8
	输出电流 $I(mA)$	1.913	1.905	1.901	1.890	1.855	1.840	1.825	1.796	1.760	1.74
	输出功率 $P_o(W)$	0	3.84×10^{-4}	7.60×10^{-4}	1.13×10^{-3}	1.48×10^{-3}	1.82×10^{-3}	2.19×10^{-3}	2.51×10^{-3}	2.82×10^{-3}	3.08×10^{-3}
	输出电压 $V(V)$	2.0	2.2	2.25	2.3	2.4	2.6	2.7			
	输出电流 $I(mA)$	1.646	1.526	1.491	1.435	1.309	0.879	0.377			
	输出功率 $P_o(W)$	3.29×10^{-3}	3.36×10^{-3}	3.35×10^{-3}	3.30×10^{-3}	3.14×10^{-3}	2.13×10^{-3}	1.02×10^{-3}			

实验时
计算，
与最终分析
结果不同。

$$\text{单晶硅电池效率 } \eta_1 = \frac{26.1 \times 10^{-3} \text{ W}}{149 \text{ W/m}^2 \times 25 \times 10^{-4} \text{ m}^2} \times 100\% = 7.01\%$$

$$\text{多晶硅电池效率 } \eta_2 = \frac{27.55 \times 10^{-3} \text{ W}}{149 \text{ W/m}^2 \times 25 \times 10^{-4} \text{ m}^2} \times 100\% = 7.40\%$$

$$\text{非晶硅电池效率 } \eta_3 = \frac{3.36 \times 10^{-3} \text{ W}}{149 \text{ W/m}^2 \times 25 \times 10^{-4} \text{ m}^2} \times 100\% = 0.90\%$$

教师	姓名
签字	王松

三、数据处理

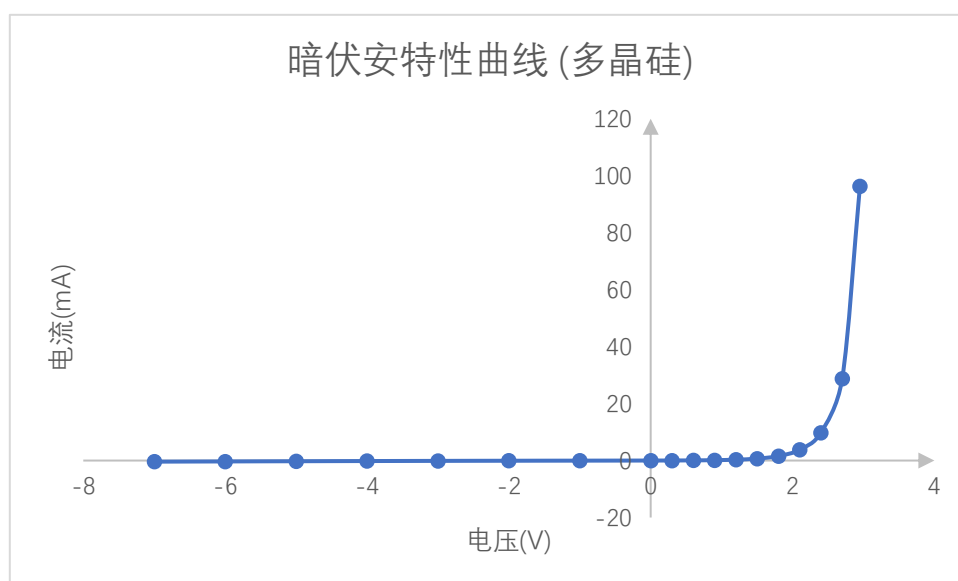
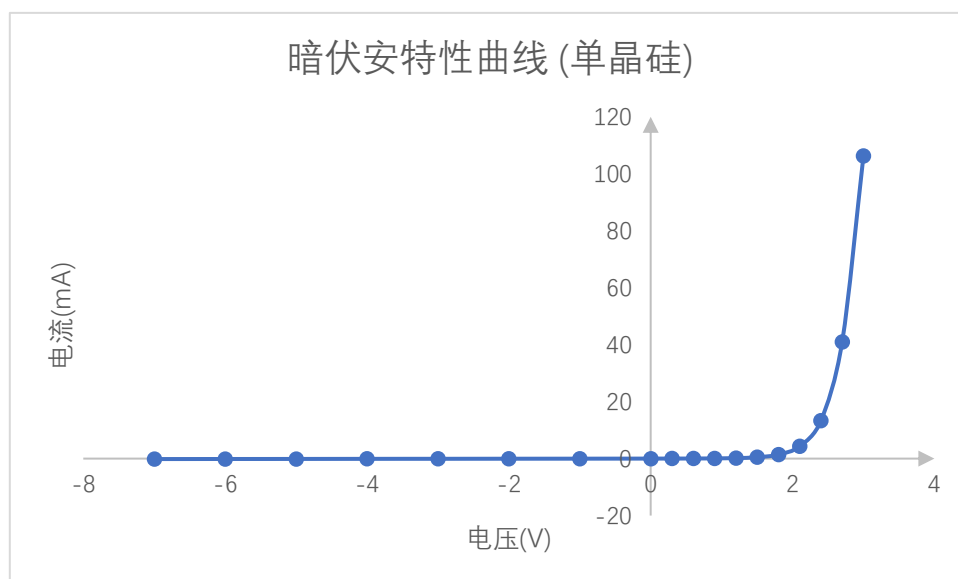
1. 绘制单晶硅、多晶硅、非晶硅暗伏安特性曲线。
2. 根据表 2 数据，画出三种太阳能电池的开路电压随光强变化的关系曲线以及短路电流随光强变化的关系曲线。
3. 根据表 3 数据作三种太阳能电池的输出伏安特性曲线及功率曲线。计算最大功率 P_{max} 和最佳匹配负载电阻。
4. 根据表 3 数据计算三种太阳能电池的填充因子和转换效率。转换效率为：

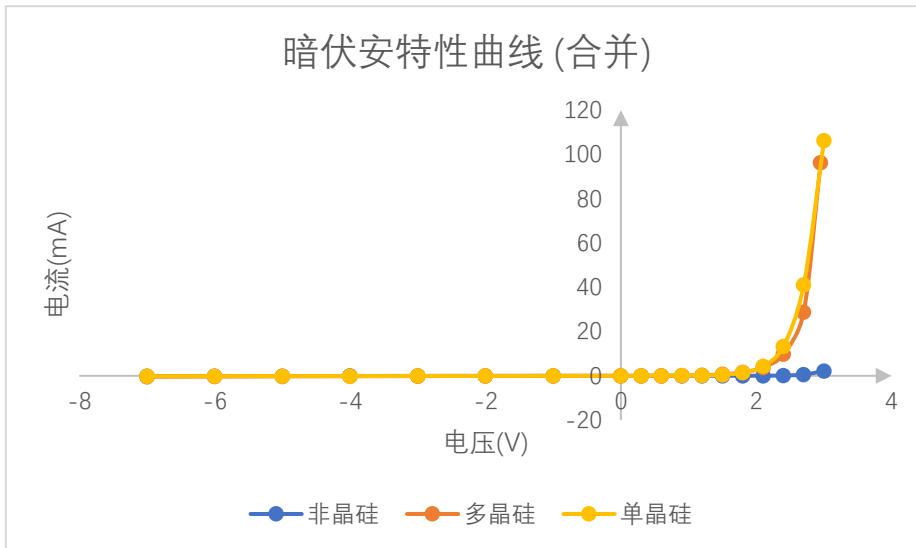
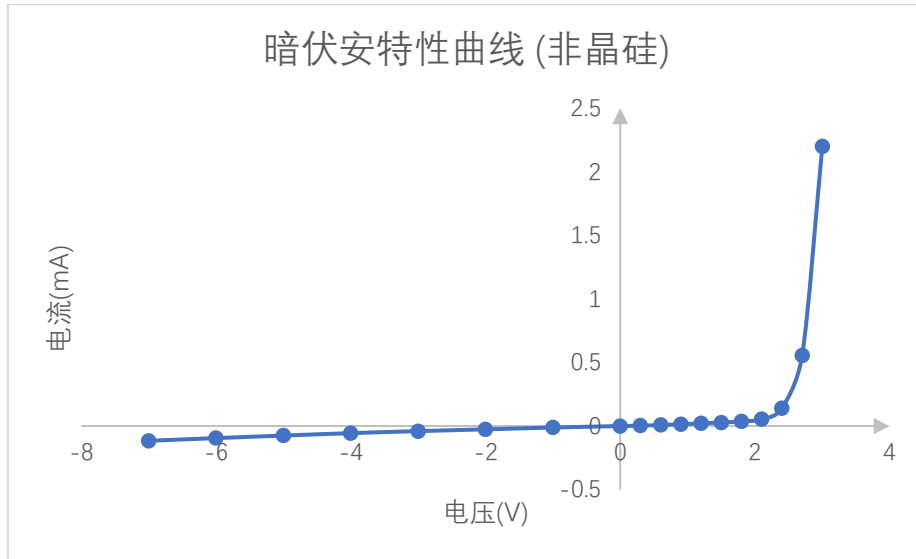
$$\eta = \frac{P_{max}}{P_m} = \frac{P_{max}}{SI}$$

其中 S 为太阳能电池面积（按 $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 计算）， I 为光强。

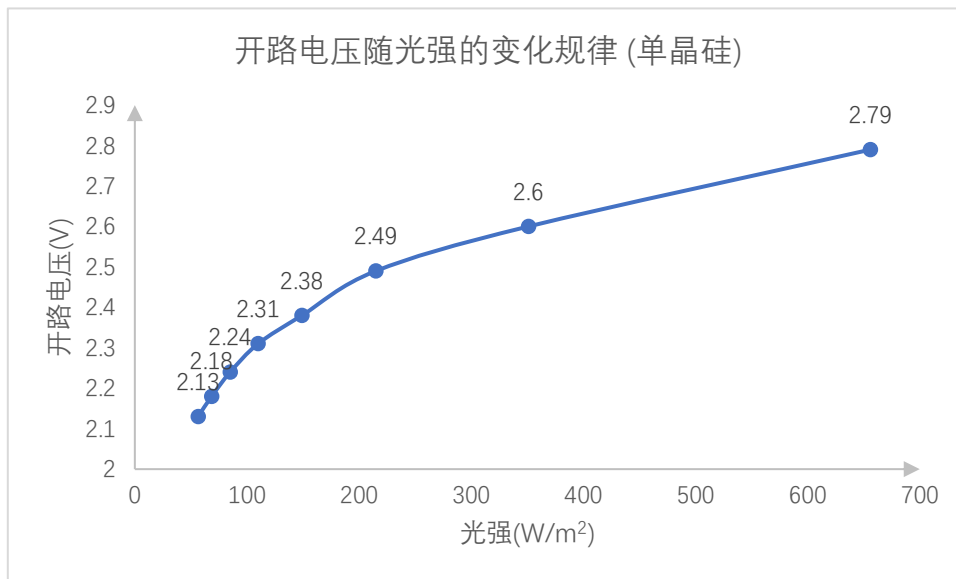
5. 分析可能的误差来源。

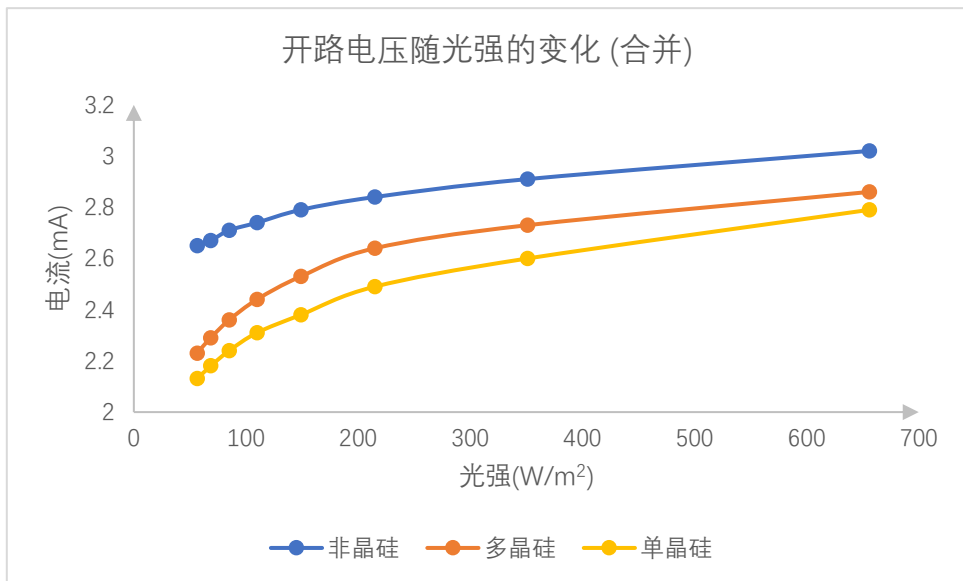
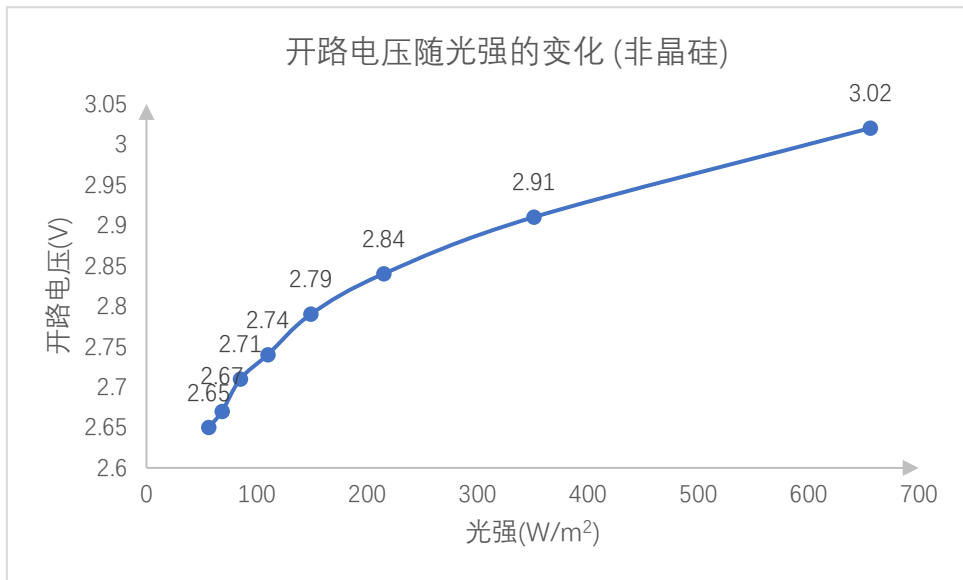
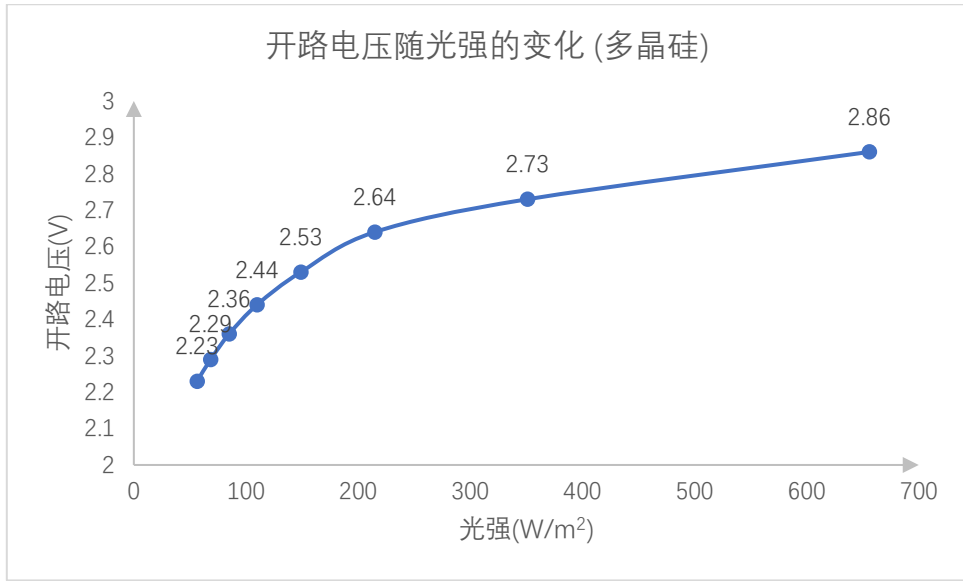
解：1. 暗伏安特性曲线如下所示。



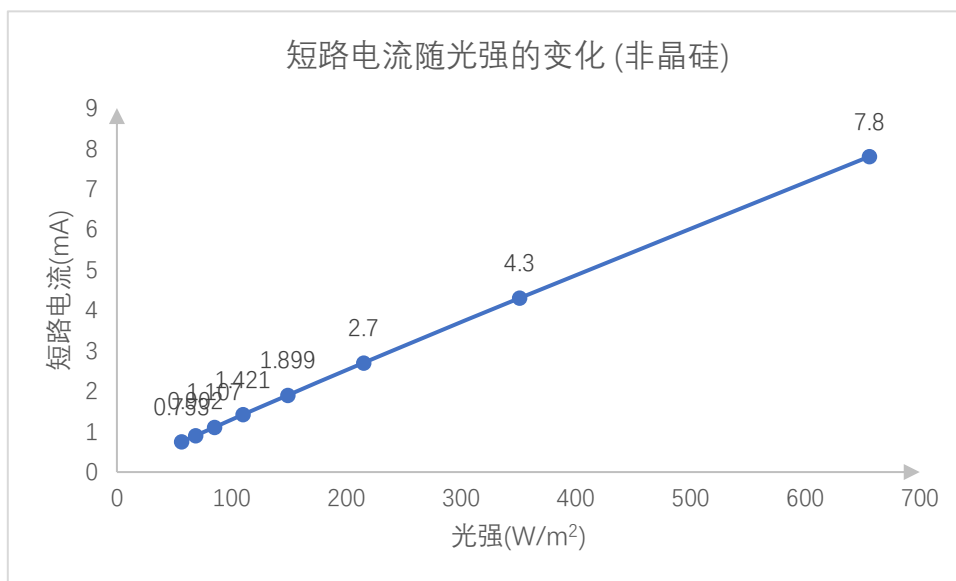
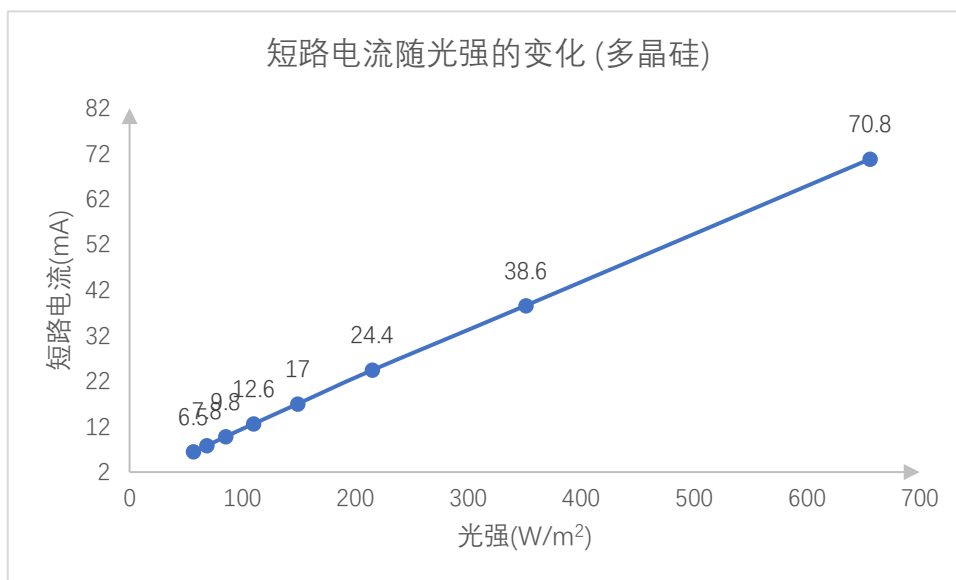
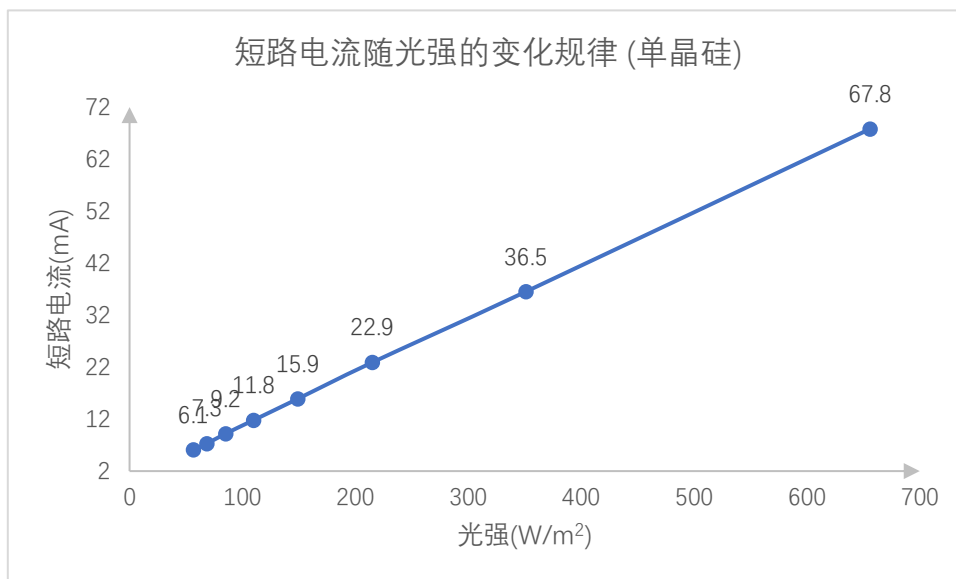


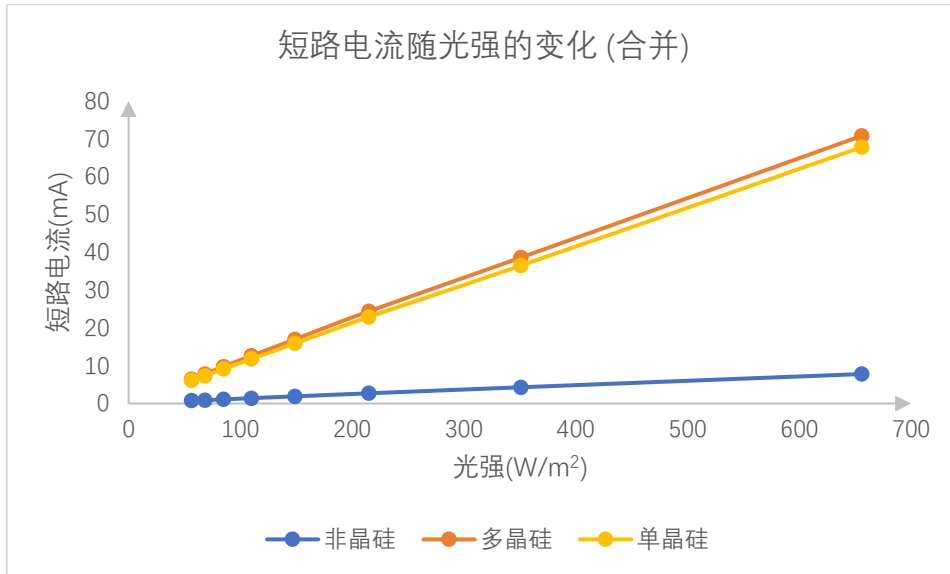
2. 开路电压随光强变化的关系曲线如下所示。



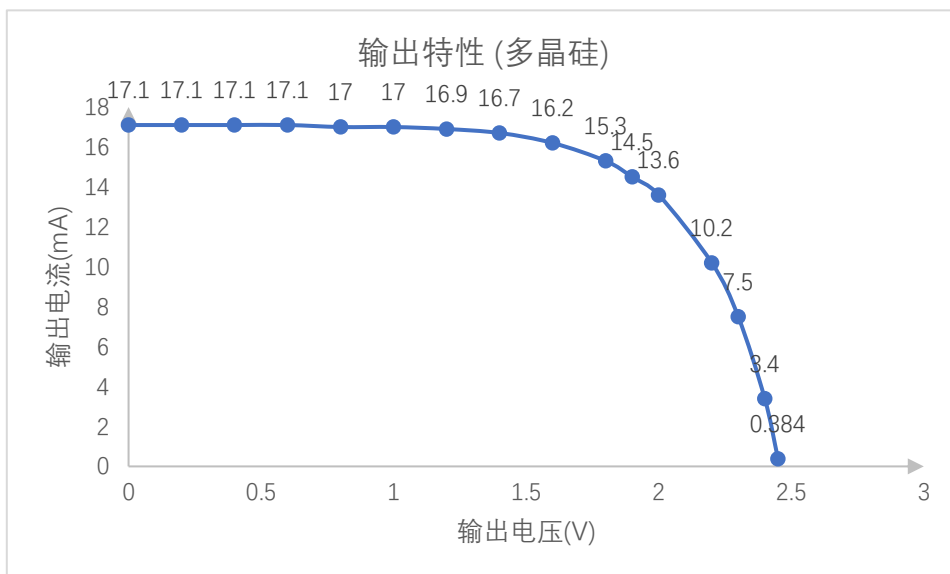
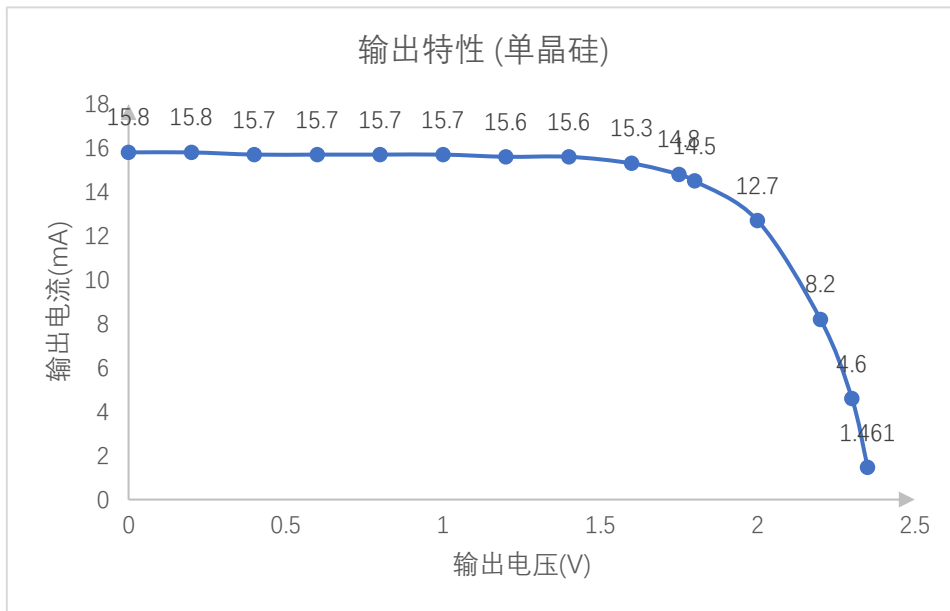


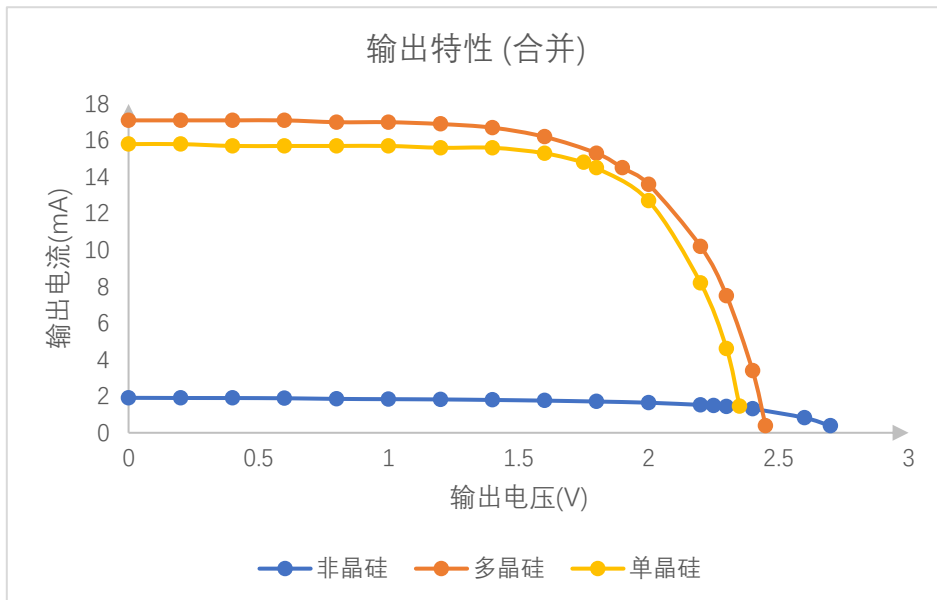
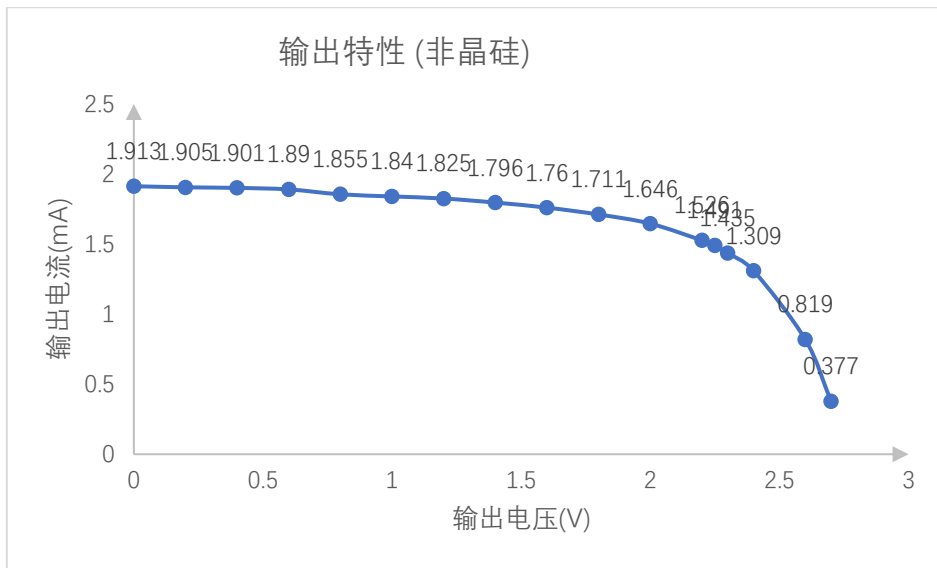
短路电流随光强变化的关系曲线如下所示。可见，短路电流与光强呈线性关系。



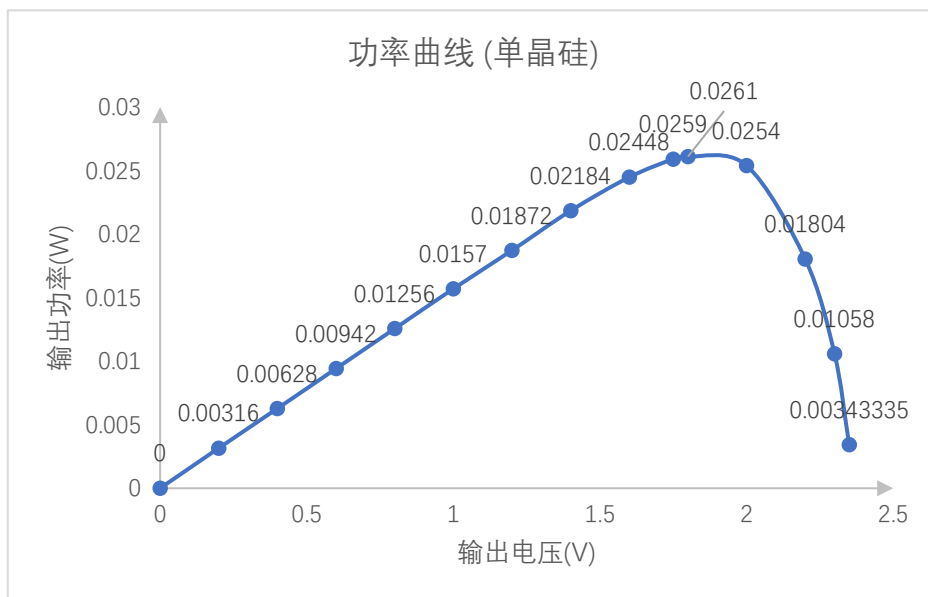


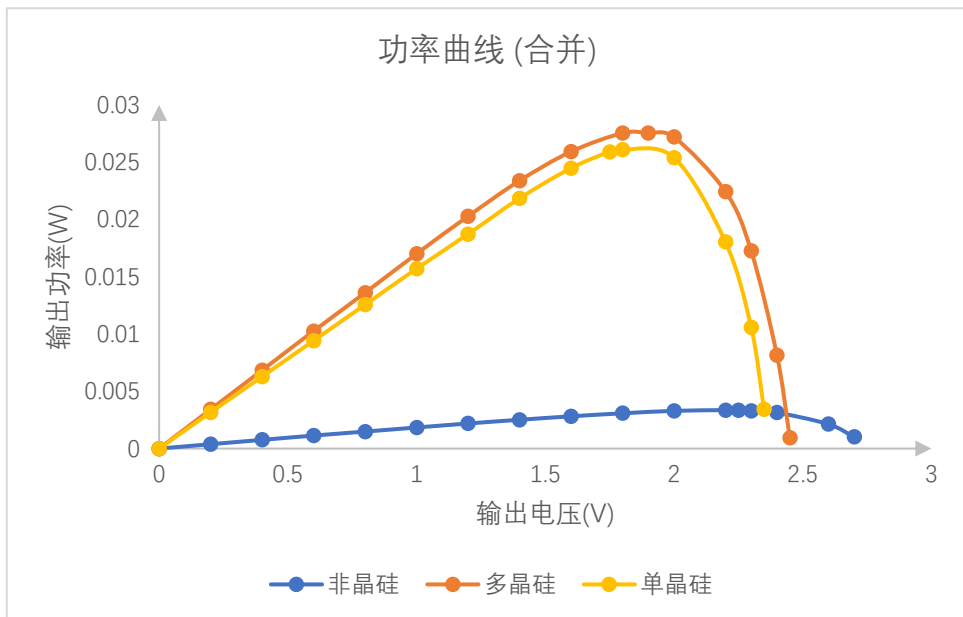
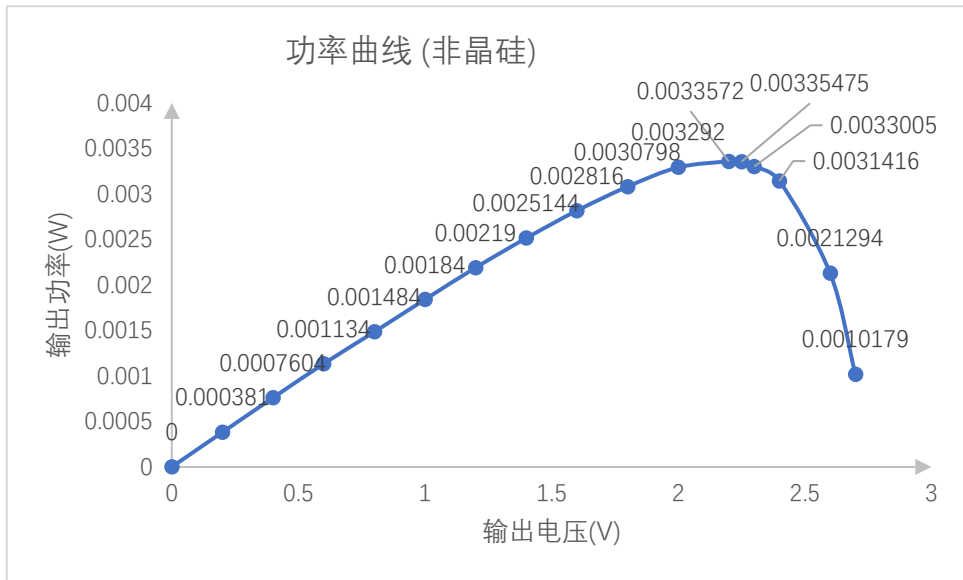
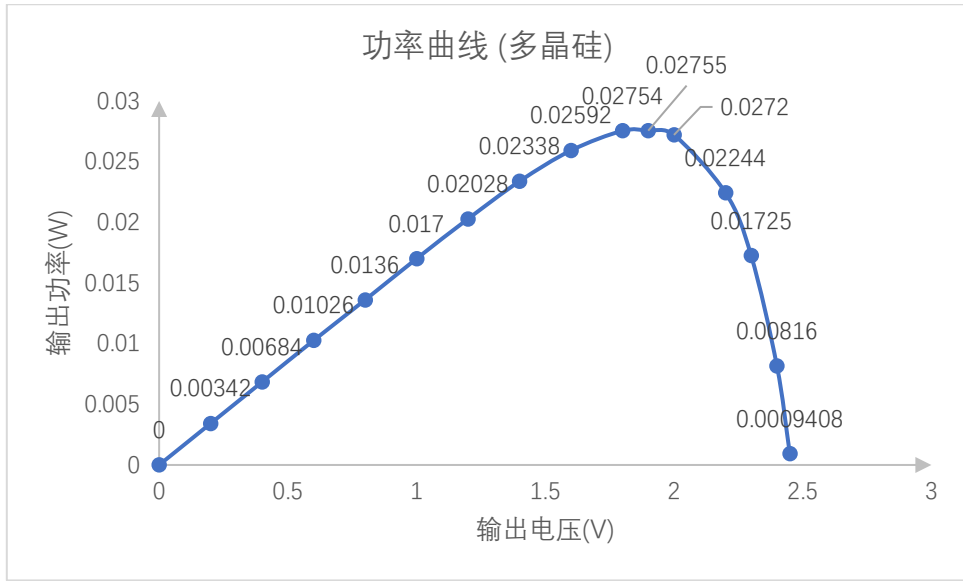
3. 三种太阳能电池的输出伏安特性曲线如下所示。





三种太阳能电池的功率曲线如下所示。





得最大功率 P_{\max} 和最佳匹配负载电阻分别为：（均保留三位有效数字）

单晶硅： $P_{\max} = 26.3 \text{ mW}$ ， $R_{\text{CL}} = 134\Omega$ ；

多晶硅： $P_{\max} = 27.8 \text{ mW}$ ， $R_{\text{CL}} = 123\Omega$ ；

非晶硅： $P_{\max} = 3.37 \text{ mW}$ ， $R_{\text{CL}} = 1.46 \times 10^3 \Omega$ 。

4. 根据表 3 数据，以下式

$$FF = \frac{P_{\max}}{U_{\text{OC}} I_{\text{SC}}}$$

计算得的三种太阳能电池的填充因子分别为：

$$\text{单晶硅： } FF = \frac{P_{\max}}{U_{\text{OC}} I_{\text{SC}}} = \frac{26.3}{2.38 \times 15.9} = 0.695$$

$$\text{多晶硅： } FF = \frac{P_{\max}}{U_{\text{OC}} I_{\text{SC}}} = \frac{27.8}{2.53 \times 17.0} = 0.646$$

$$\text{非晶硅： } FF = \frac{P_{\max}}{U_{\text{OC}} I_{\text{SC}}} = \frac{3.37}{2.79 \times 1.899} = 0.636$$

以下式（其中 S 为太阳能电池面积（按 $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 计算）， I 为光强）

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{in}}} = \frac{P_{\max}}{SI}$$

计算得的转换效率为：

$$\text{单晶硅： } \eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{in}}} = \frac{P_{\max}}{SI} = \frac{26.3 \times 10^{-3}}{50 \times 50 \times 10^{-6} \times 149.0} \times 100\% = 7.06\%$$

$$\text{多晶硅： } \eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{in}}} = \frac{P_{\max}}{SI} = \frac{27.8 \times 10^{-3}}{50 \times 50 \times 10^{-6} \times 149.0} \times 100\% = 7.46\%$$

$$\text{非晶硅： } \eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{in}}} = \frac{P_{\max}}{SI} = \frac{3.37 \times 10^{-3}}{50 \times 50 \times 10^{-6} \times 149.0} \times 100\% = 0.905\%$$

5. 可能的误差来源有：①电流表与电压表内阻以及导线内阻、接触电阻对实验的影响；②因为导线的接入导致遮光罩没有完全密封；③环境光的光强波动的影响（比如，他人更换太阳能电池板或移动光具座时对其光源的遮挡）；④实验台面有微小振动导致光强并不恒定；⑤光源自身功率并非绝对恒定造成的误差；等等。

四、实验现象分析及结论

三种太阳能电池的填充因子和转换效率分别为：

单晶硅： $FF = 0.695$ ， $\eta = 7.06\%$ ；

多晶硅： $FF = 0.646$ ， $\eta = 7.46\%$ ；

非晶硅： $FF = 0.636$ ， $\eta = 0.905\%$ 。

可见，三种太阳能电池的填充因子相近，但是转换效率差异较大。多晶硅电池的转换效率最高，单晶硅电池次之，非晶硅电池的转换效率最低。

五、讨论题

1. 太阳能电池的工作原理是什么？
2. 如何根据伏安特性曲线计算太阳能电池的最大输出功率和相应的最佳匹配电阻？

1. 答：太阳能电池的工作原理是 PN 结的光生伏打效应。当太阳光照射 PN 结时，在半导体内的束缚电子由于获得了光子的能量而成为自由电子，相应地产生电子-空穴对。在势垒电场的作用下，电子被驱向 N 区，空穴被驱向 P 区，从而使 N 区有过剩的电子，P 区有过剩的空穴。于是，在 PN 结的附近形成了与势垒电场相反的光生电场。光生电场的一部分抵消了势垒电场，另一部分使 P 型区带正电，N 型区带负电，于是就使得 P 区和 N 区间的薄层产生电动势，即光生伏打电动势，接通外电路时，便有电流输出。

2. 答：可以作出等功率曲线（即 $UI = \text{常数}$ ），当等功率曲线与图线相切时，此切点即对应最大功率的情况。用此点对应的输出电压除以输出电流，就得到最佳匹配负载电阻值。