

太阳能电池特性的测量

(理解光电效应)

一、课前预习

(一) 预习要点

1. 太阳能电池的短路电流与光照强度之间的关系?
2. 太阳能电池的伏安特性有什么特点?
3. 在一定的光照强度下, 太阳能电池的输出功率 P 与负载电阻 R 之间的关系?
4. 在一定的负载电阻下, 太阳能电池的输出功率 P 与光照强度之间的关系?
5. 如何提高太阳能电池的输出功率?

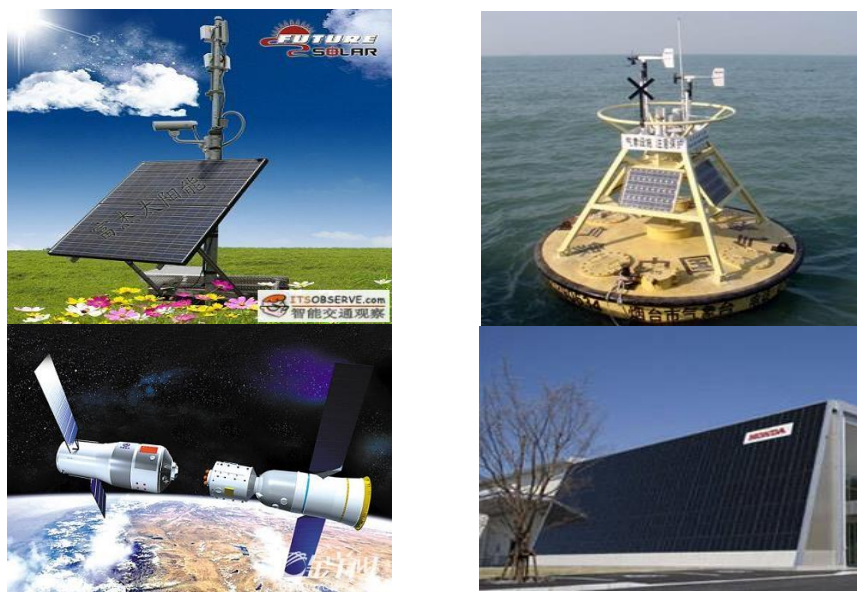
(二) 预习资源

1. 中心网站 《大学物理实验》慕课
2. 智慧树 《大学物理实验》慕课
3. 大学物理实验虚拟仿真实验平台

二、背景及应用介绍

太阳能电池 (Solar Cells), 也称为光伏电池, 是将太阳光辐射能直接转换为电能的器件。由这种器件封装成太阳电池组件, 再按需要将一块以上的组件组合成一定功率的太阳电池方阵, 经与储能装置、测量控制装置及直流-交流变换装置等相配套, 即构成太阳电池发电系统, 也称为之光伏发电系统。它具有不消耗常规能源、寿命长、维护简单、使用方便、功率大小可任意组合、无噪音、无污染等优点。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 40 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, 如图 1。随着太阳电池制造成本的不断降低, 太阳能光伏发电将逐步地部分替代常规发电。近年来, 在美国和日本等发达国家, 太阳能光伏发电已进入城市电网。从地球上化石燃料资源的渐趋耗竭和大量使用化石燃料必将使人类生态环境污染日趋严重的战略观点出发, 世界各国特别是发达国家对于太阳能光伏发电技术十分重视, 将其摆在可再生能源开发利用的首位。太阳能光伏发电有望成为 21 世纪的重要新能源。有专家预言, 在 21 世纪中叶, 太阳能光伏发电将占世界总发电量的 15%~20%,

成为人类的基础能源之一，在世界能源构成中占有一定地位。



太阳能电池的应用

三、实验目的

1. 在知识方面：

- (1) 测量不同照度下太阳能电池的伏安特性、开路电压 U_0 和短路电流 I_s 。
- (2) 在不同照度下，测定太阳能电池输出功率 P 和负载电阻 R 的函数关系。
- (3) 确定太阳能电池的最大输出功率 $P_{\max}$ 及相应的负载电阻 $R_{\max}$ 和填充因数。

2. 在能力方面：

- (1) 培养学生的综合运用知识的能力；
- (2) 培养学生动手操作、发现问题、分析问题和解决问题能力；
- (3) 培养学生分析处理实验数据的能力。

3. 在素养方面：

- (1) 培养学生的科学实验素养；
- (2) 培养学生正确的价值观；
- (3) 主动探究的创新精神。

四、教学中的重点与难点

重点

太阳电池的工作原理。

难点

如何提高太阳能电池输出功率。

五、实验原理

当光照射在距太阳能电池表面很近的 pn 结时，只要入射光子的能量大于半导体材料的禁带宽度 E_g ，则在 p 区、n 区和结区光子被吸收会产生电子-空穴对（如图 1）。那些在 pn 结附近 n 区中产生的少数载流子由于存在浓度梯度而要扩散。只要少数载流子离 pn 结的距离小于它的扩散长度，总有一定几率的载流子扩散到结界面处。在 p 区与 n 区交界面的两侧即结区，存在一空间电荷区，也称为耗尽区。在耗尽区中，正负电荷间形成一电场，电场方向由 n 区指向 p 区，这个电场称为内建电场。这些扩散到结界面处的少数载流子（空穴）在内电场的作用下被拉向 p 区。同样，在结附近 p 区中产生的少数载流子（电子）扩散到结界面处，也会被内建电场迅速拉向 n 区。结区内产生的电子-空穴对在内电场的作用下分别移向 n 区和 p 区。这导致在 n 区边界附近有光生电子积累，在 p 区边界附近有光生空穴积累。它们产生一个与 pn 结的内建电场方向相反的光生电场，在 pn 结产生一个光生电动势，其方向由 p 区指向 n 区。这一现象称为光伏效应。

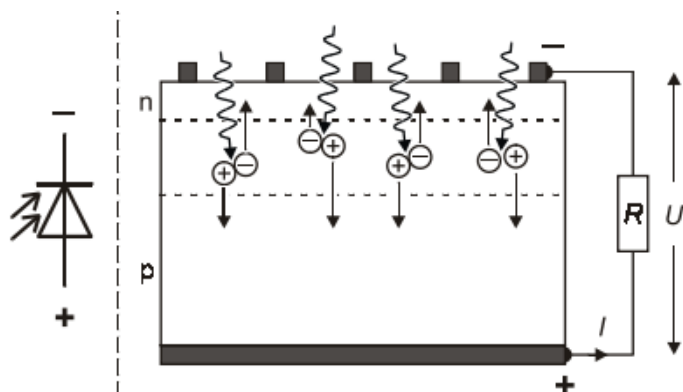


图 1 太阳能电池的工作原理

太阳能电池的工作原理是基于光伏效应的。当光照射太阳电池时，将产生一个由 n 区到 p 区的光生电流 I_s 。同时，由于 pn 结二极管的特性，存在正向二极管电流 I_D ，此电流方向从 p 区到 n 区，与光生电流相反。因此，实际获得的电流 I 为两个电流之差：

$$I = I_s(\Phi) - I_D(U) \quad (1)$$

如果连接一个负载电阻 R ，电流 I 可以被认为是两个电流之差，即取决于辐照度 Φ 的负方向电流 I_s ，以及取决于端电压 U 的正方向电流 $I_D(U)$ 。

由此可以得到太阳能电池伏安特性的典型曲线（见图 2）。在负载电阻小的情况下，太阳能电池可以看成是一个恒流源，因为正向电流 $I_D(U)$ 可以被忽略。在负载电阻大的情况下，太阳能电池相当于一个恒压源，因为如果电压变化略有下降

那么电流 $I_D(U)$ 迅速增加。

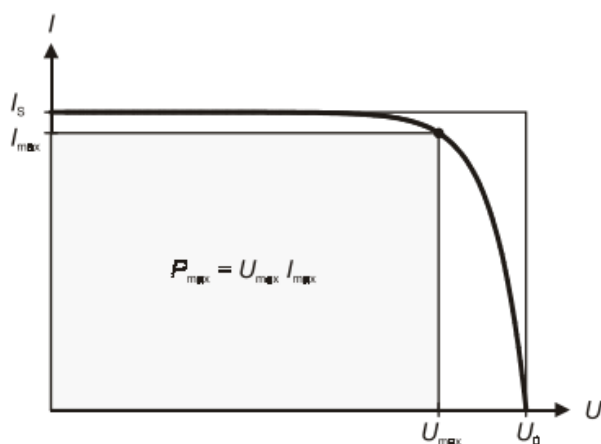


图 2 在一定光照强度下太阳能电池的伏安特性 ($U_{\max}$, $I_{\max}$: 最大功率点)

当太阳电池的输出端短路时,可以得到短路电流,它等于光生电流 I_s 。当太阳电池的输出端开路时,可以得到开路电压 U_0 。

在固定的光照强度下,光电池的输出功率取决于负载电阻 R 。太阳能电池的输出功率在负载电阻为 $R_{\max}$ 时达到一个最大功率 $P_{\max}$, $R_{\max}$ 近似等于太阳能电池的内阻 R_i 。

$$R_i = U_0 / I_s \quad (2)$$

这个最大的功率比开路电压和短路电流的乘积小 (见图 2), 它们之比为 F 称为填充因数。

$$F = \frac{P_{\max}}{U_0 \cdot I_s} \quad (3)$$

此外,太阳能电池的输出功率

$$P = U \cdot I \quad (4)$$

是负载电阻的函数。

$$R = U / I \quad (5)$$

我们经常用几个太阳能电池组合成一个太阳能电池。串联会产生更大的开路电压 U_0 , 而并联会产生更大的短路电流 I_s 。在本实验中,把 2 个太阳能电池串联,分别记录在四个不同的光照强度时电流和电压特性。光照强度通过改变光源的距离和电源的功率来实现。

六、实验内容

1. 接通电路,将可变电阻器阻值调为最小以实现短路,并改变光源的距离和调节电源输出功率,使短路电流大约为 45mA;
2. 逐步改变负载电阻值,分别读取电流和电压值,记入表格 1;
3. 断开电路,测量并记录开路电压;

4. 调节电源功率，分别使短路电流为 35mA，25mA 和 15mA，并重复上述测量；
5. 根据表 1，用坐标纸或 Excel 绘出 $U-I$ 曲线；
6. 根据表 2，用坐标纸或 Excel 绘出 $P-R$ 特性曲线；
7. 计算对应于最大功率的负载电阻值 $R_{\max}$ ，根据（2）式计算内阻值 R_i ；
8. 计算填充因数的平均值。

七、实验报告要求

1. 记录短路电流分别为 45mA，35mA，25mA 和 15mA 时的电流，电压和开路电压值；
2. 绘出 $U-I$ 曲线和 $P-R$ 特性曲线；
3. 计算负载电阻值 $R_{\max}$ ，内阻值 R_i ，填充因数的平均值。

八、实验结果与分析

表 1 测量太阳能电池的端电压 U 和通过负载电阻的电流 I (短路电流 I_s 开路电压 U_0)

<-光强最大		光强				光强最小->	
系列 1		系列 2		系列 3		系列 4	
I/mA	U/V	I/mA	U/V	I/mA	U/V	I/mA	U/V
$I_s=44.5$	$U_0=2.04$	$I_s=35.2$	$U_0=2.02$	$I_s=25.1$	$U_0=1.98$	$I_s=15.0$	$U_0=1.91$
45.5	0.00	35.2	0.00	25.1	0.00	15.0	0.00
45.5	0.25	35.2	0.19	25.1	0.14	15.0	0.08
45.5	0.55	35.2	0.47	25.1	0.47	15.0	0.22
45.5	0.73	35.2	0.80	25.1	0.80	15.0	0.52
45.5	0.91	35.2	1.07	25.0	0.93	15.0	0.85
45.4	1.09	35.1	1.16	25.0	1.12	14.9	1.02
45.3	1.32	34.8	1.38	24.8	1.30	14.9	1.14
44.9	1.43	33.1	1.58	23.9	1.49	14.8	1.18
43.7	1.56	31.6	1.66	23.3	1.55	14.6	1.28
40.1	1.72	26.0	1.80	20.6	1.69	14.4	1.34
35.3	1.81	23.5	1.84	17.4	1.78	14.1	1.40
28.5	1.89	19.7	1.88	16.8	1.79	13.8	1.45
23.5	1.93	17.6	1.90	15.5	1.81	13.4	1.51
19.3	1.96	16.8	1.91	14.4	1.83	12.9	1.55
16.7	1.97	14.7	1.93	13.4	1.85	12.5	1.61
15.5	1.98	13.6	1.94	13.0	1.85	11.4	1.65
10.8	2.00	11.8	1.95	11.2	1.88	8.0	1.78
8.0	2.01	8.0	1.97	8.0	1.91	6.4	1.81
5.3	2.02	3.0	2.00	4.0	1.95	4.0	1.86
0.0	2.04	0.0	2.02	0.0	1.98	0.0	1.91

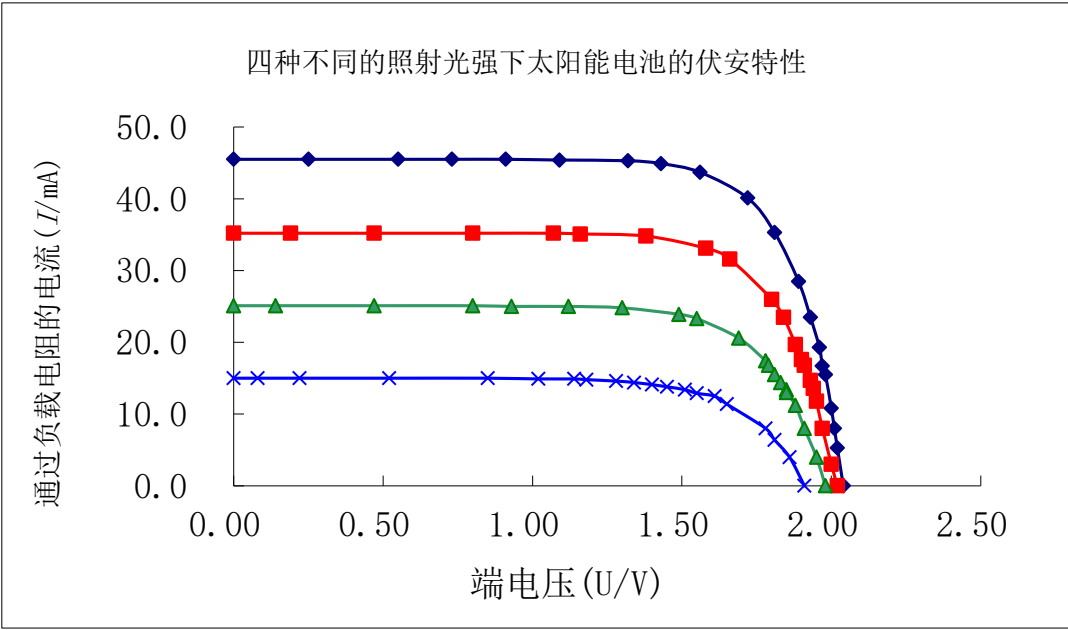


图 3 不同的照射光强下太阳能电池的伏安特性

表 2 根据表 1 测量的 U 和 I 值计算得到的 P 和 R 值

<-光强最大		光强				光强最小->	
系列 1		系列 2		系列 3		系列 4	
R/Ω	P/mW	R/Ω	P/mW	R/Ω	P/mW	R/Ω	P/mW
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.49	11.38	5.40	6.69	5.58	3.51	5.33	1.20
12.09	25.03	13.35	16.54	18.73	11.80	14.67	3.30
16.04	33.22	22.73	28.16	31.87	20.08	34.67	7.80
20.00	41.41	30.40	37.66	37.20	23.25	56.67	12.75
24.01	49.49	33.05	40.72	44.80	28.00	68.46	15.20
29.14	59.80	39.66	48.02	52.42	32.24	76.51	16.99
31.85	64.21	47.73	52.30	62.34	35.61	79.73	17.46
35.70	68.17	52.53	52.46	66.52	36.12	87.67	18.69
42.89	68.97	69.23	46.80	82.04	34.81	93.06	19.30
51.27	63.89	78.30	43.24	102.30	30.97	99.29	19.74
66.32	53.87	95.43	37.04	106.55	30.07	105.07	20.01
82.13	45.36	107.95	33.44	116.77	28.06	112.69	20.23
101.55	37.83	113.69	32.09	127.08	26.35	120.16	20.00
117.96	32.90	131.29	28.37	138.06	24.79	128.80	20.13
127.74	30.69	142.65	26.38	142.31	24.05	144.74	18.81
185.19	21.60	165.25	23.01	167.86	21.06	222.50	14.24
251.25	16.08	246.25	15.76	238.75	15.28	282.81	11.58
381.13	10.71	666.67	6.00	487.50	7.80	465.00	7.44

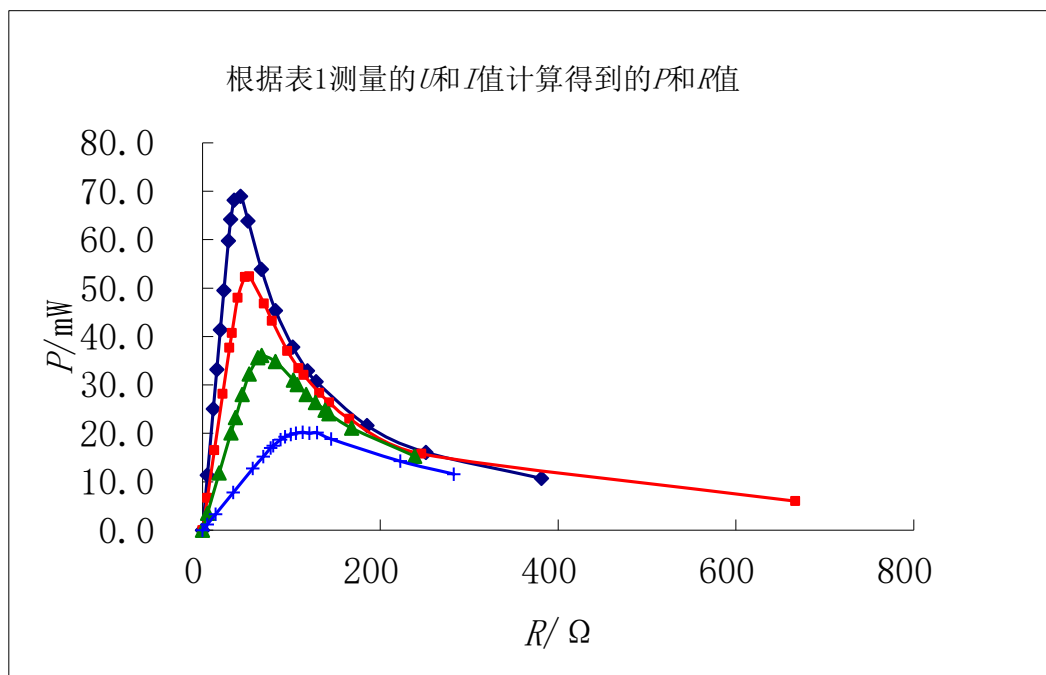


图 4 P - R 曲线

表 3 对应于最大功率的负载电阻值 $R_{\max}$ 和根据 (2) 式计算出的内阻值 R_i

	第一组	第二组	第三组	第四组
$R_{\max}/\Omega$	42.9	52.5	66.5	112.7
R_i/Ω	44.8	57.4	78.9	127.3
$R_{\max}/R_i$	0.957	0.915	0.843	0.885

表 4 最大功率 $P_{\max}$ 和开路电压与短路电流的乘积

	第一组	第二组	第三组	第四组
$P_{\max}/\text{mW}$	68.97	52.46	36.12	20.23
$U_0 \cdot I_s/\text{mW}$	92.82	71.10	49.70	28.65
$F = P_{\max}/U_0 \cdot I_s$	0.74	0.74	0.73	0.71

填充因数 $F=73\%$

九、问题讨论实验拓展

(一) 问题讨论

1. 太阳能电池的短路电流与光照强度之间的关系是 (a)

- (a) 短路电流随光照强度的增加而增大；
- (b) 短路电流随光照强度的增加而减小；
- (c) 短路电流随光照强度的增加基本保持不变；
- (d) 短路电流随光照强度的增加先增大后减小。

2. 太阳能电池的特性为 (c)

(a) 对于小负载电阻，太阳能电池相当于一个恒压源，而对于大负载电阻，它相当于一个恒流源；

(b) 太阳能电池相当于一个恒流源；

(c) 对于小负载电阻，太阳能电池相当于一个恒流源，而对于大负载电阻，它相当于一个恒压源；

(d) 太阳能电池相当于一个恒压源。

3. 在一定光照强度下，太阳能电池的输出功率 P 与负载电阻 R 之间的关系是(d)

(a) 随着负载电阻 R 的增大 P 增大；

(b) 随着负载电阻 R 的增大 P 减小；

(c) 随着负载电阻 R 的增大 P 先减小，后增大；

(d) 随着负载电阻 R 的增大 P 先增大，后减小。

4. 负载电阻 R 、端电压 U 和光照强度之间的关系是 (d)。

(a) 在一定的光照强度下，随着负载电阻 R 的增大， U 一直增大；

(b) 在一定的光照强度下，随着负载电阻 R 的增大， U 一直减小；

(c) 在一定的光照强度下，随着负载电阻 R 的增大， U 不变；

(d) U 的最大值，与光照强度基本无关。

5. 在一定的负载电阻下，太阳能电池的输出功率 P 与光照强度之间的关系是(a)

(a) 光照强度越大， P 越大；

(b) 光照强度越大， P 越小；

(c) 光照强度越大， P 不变；

(d) 光照强度越大， P 先增大，后减小。

6. 在一定的光照强度下，当 (b) 时，太阳能电池的输出功率最大。

(a) 负载电阻小于太阳能电池的内阻

(b) 负载电阻接近太阳能电池的内阻

(c) 负载电阻大于太阳能电池的内阻

(d) 负载电阻为零

7. 在下面列举的应用中，没有利用太阳能电池供电的是 (a)

(a) 太阳能热水器；

(b) 太阳能计算器；

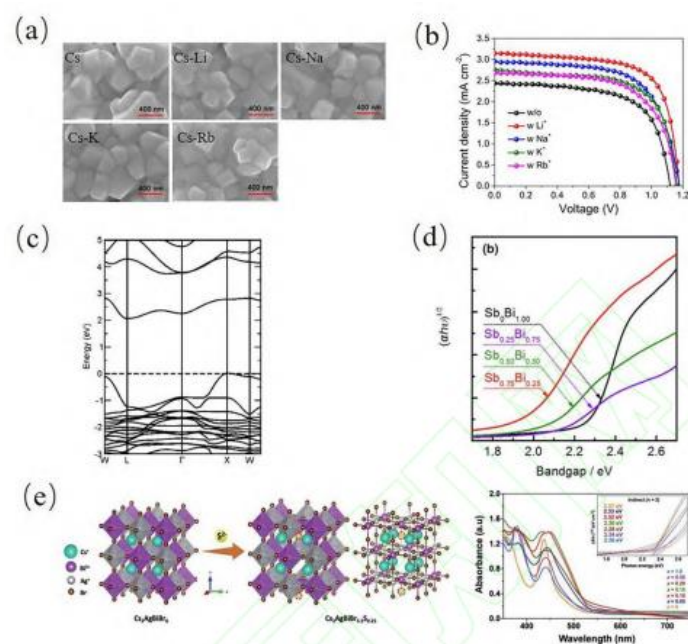
(c) 太阳能路灯；

(d) 光伏电站。

8. 在下列方法中，不能提高太阳能电池输出功率的是 (d)
- (a) 调节太阳能电池与光源的位置使入射光垂直照射到电池表面；
 - (b) 使负载接近太阳能电池的内阻；
 - (c) 减小光源与太阳能电池的距离；
 - (d) 增加光源与太阳能电池的距离。
9. 填充因数 F 是 (a)
- (a) 太阳能电池的最大输出功率比开路电压和短路电流的乘积；
 - (b) 开路电压和短路电流的乘积比太阳能电池的最大输出功率；
 - (c) 太阳能电池的输出功率比电压和电流的乘积；
 - (d) 电压和电流的乘积比太阳能电池的输出功率。
10. 在下列关于太阳能电池特性的描述中，正确的是 (c)
- (a) 将几个太阳能电池串联会产生更大的短路电流 I_s ；
 - (b) 将几个太阳能电池并联会产生更大的开路电压 U_0 ；
 - (c) 填充因数 $F < 1$ ；
 - (d) 填充因数 $F > 1$ 。

(二) 实验拓展

近年来，有机-无机杂化钙钛矿太阳能电池以其优异的性能和低廉的制造成本受到了广泛关注。然而，其铅元素毒性以及稳定性阻碍了进一步商业化应用。双钙钛矿材料 $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$ 具有稳定性优异、毒性低、载流子寿命长和载流子有效质量小的优势，是一种颇具潜力的光伏材料，已被应用于太阳能电池并展现出了良好的性能。但是 $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$ 钙钛矿太阳能电池的光电转换效率还无法与有机-无机杂化钙钛矿太阳能电池相媲美，发展仍面临诸多挑战。有溶液法、反溶剂辅助成膜法、气相法、真空辅助成膜法以及喷涂法等薄膜制备工艺的进展。因此，在制备 $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$ 太阳能电池的过程中，需要选择适合的材料(如聚氨酯、离子液体等)用于抑制 Ag^+ 和 Br^- 的迁移，对于进一步提升 $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$ 钙钛矿太阳能电池的稳定性具有重要意义。



离子掺杂优化 $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$ 钙钛矿太阳能电池

参考文献:

- [1] 孙晶华, 李松, 李昆. 大学物理实验[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2017: 214-220.
- [2] 张朋波, 张映辉, 付姚等. 太阳能电池伏安特性和发电应用实验教学实践[J]. 大学物理实验, 2022, 35 (05): 8-11.