

参赛学生姓名：吕佳妮

中学：上海市七宝德怀特高级中学

省份：上海

国家/地区：中国

指导老师姓名：王亮兴

指导老师单位：复旦大学

论文题目：一种用于太阳能电池的 CuO 薄膜性能研究

2024 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2024丘成桐中学科学奖论文公示

一种用于太阳能电池的 CuO 薄膜性能研究

吕佳妮

摘要:

近年来,光电材料领域的快速发展为新型光伏技术的突破带来了巨大潜力,然而,许多材料仍然面临界面复合过强、效率偏低等问题为了探索新型薄膜光电材料,本文以 CuO/Si 电池为研究对象,研究了在电池中引入氧化铝薄膜对电池 IV 曲线和量子效率的影响,结果表明新型结构的 Al/ITO/Al₂O₃/p-CuO/n-Si/Ag 是一种很有潜力的光伏电池。为了进一步改善氧化层质量,减少界面复合,本文提出了一种新型结构的太阳电池 Al/ITO/Al₂O₃/p-CuO/n-Si/Ag,显著改善了 CuO 薄膜的界面复合,电池的效率显著提高,短路电流密度为 22.14mA/cm²,开路电压为 0.367V,填充因子为 0.619,效率为 5.03%,为进一步探索新材料在光伏电池中应用提供了新途径。

关键词: CuO、Al₂O₃、光伏电池、界面复合

目录

1 绪论.....	4
2 实验材料及步骤.....	4
3 试验结果和分析.....	5
3.1 IV 测试分析.....	5
3.1.1 IV 特征参数.....	5
3.1.2 氧化铝钝化层的影响.....	6
3.1.3CuO 厚度的影响.....	7
3.2 QE 测试分析.....	7
3.2.1QE 测试原理.....	7
3.2.2 氧化铝钝化层的影响.....	8
3.2.3CuO 厚度的影响.....	8
4 结论和展望.....	9
5 参考文献.....	10
致谢.....	11

2024 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2024丘成桐中学科学奖论文公示

1 绪论

随着全球能源需求的增长与环境问题的日益突出,绿色、可再生的能源技术引起了广泛关注。太阳能作为一种清洁、取之不尽的可再生能源,已成为解决能源危机和减少环境污染的重要途径之一。太阳能电池因其能够将太阳光直接转化为电能而备受青睐,并在过去几十年中取得了显著进展。目前,常见的太阳能电池类型包括硅基电池、薄膜电池、有机电池和新型钙钛矿电池等。然而,为了进一步降低成本、提高效率,研究人员不断探索新型光电材料以优化太阳能电池的性能。

CuO 的光学禁带宽度为 1.2eV - 1.9eV ^[1],对太阳光具有很好的吸收,由于具有良好的光电学特性,带隙与太阳光谱匹配,制造过程简单,成本低,并且无毒、无污染等优点,CuO 薄膜有望成为制造光伏电池的材料之一^[1-3]。虽然 CuO 太阳电池有望获得较高的转换效率,但是到目前为止,对 CuO 薄膜用于太阳电池研究进展缓慢,其主要原因是 CuO 薄膜的少子寿命较短,导致光生电流很小,因此转换效率较低^[3-4],例如文献[4]制备了 Cu/p-CuO/n-Si 太阳电池,采用磁控溅射法制备了 250nm CuO 薄膜,制备的太阳电池,其短路电流密度为 $6.27\text{mA}/\text{cm}^2$,开路电压为 0.33V ,填充因子为 20%,效率为 0.41%。

为了进一步改善氧化层质量,减少界面复合,本文提出了一种新型结构的太阳电池 Al/ITO/Al₂O₃/p-CuO/n-Si/Ag,显著改善了 CuO 薄膜的界面复合,电池的效率显著提高,短路电流密度为 $22.14\text{mA}/\text{cm}^2$,开路电压为 0.367V ,填充因子为 0.619,效率为 5.03%,为进一步探索新材料在光伏电池中应用提供了新途径。

2 实验材料及步骤

本研究的目标是通过引入氧化铝(Al₂O₃)薄膜和氧化铟锡(ITO)层来优化 CuO 薄膜太阳电池的界面复合特性,从而提高其光电转换效率。为了实现这一目标,本文采用了化学清洗、磁控溅射、电子束蒸镀和热蒸发技术,结合厚度测量、IV 曲线和量子效率(QE)测试,对新型结构 Al/ITO/Al₂O₃/p-CuO/n-Si/Ag 电池的性能进行了系统分析。以下是实验材料、仪器与具体操作步骤。

(一) 首先是硅片清洗, n 型 Si 片, 电阻率 $1-10 \Omega \cdot \text{cm}$ 。在丙酮溶液里超声波振荡清洗 5 分钟, 然后在酒精超声 3 分钟, 再用去离子水超声波振荡, 氮气吹干。

(二) 以纯氧气作为反应气体, 以纯氩气作为溅射气体, 调整 Cu 靶材位置以及与衬底之间的距离, 当真空度可以达到 $5.0 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 时, 通入氧气和氩气, 流量比通过气体流量计设定, 保持 O_2/Ar 流量比为 $45\text{sccm}/75\text{sccm}$, 当溅射功率稳定后, 预溅射 10 分钟, 打开开挡板镀膜, 分别蒸镀 250nm、500nm、800nm 的 CuO。

(三) 把样片转移到在电子束镀膜机, 当真空度达到 $5 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 时, 分别争渡 5nm 的 Al_2O_3 和 80nm 的 ITO。

(四) 把样品转移到热蒸发镀膜机, 当真空度达到 $5 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 时, 蒸镀金属 1 微米 Al 电极。

(五) 将样品翻转 180° , 继续蒸镀 200nm 的金属 Ag。

(六) 将样品取出, 转移到氮气气氛的石英管中, 退火温度为 400°C , 退火时间为 30min。

(七) 测量厚度、电流电压特性和电池量子效率。

3 试验结果和分析

3.1 IV 测试分析

3.1.1 IV 特征参数

理想太阳电池的输出特性为^[5-8]:

$$J = J_{sc} - J_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

太阳电池的开路电压 V_{oc} 和短路电流密度 J_{sc} 和填充因子 FF 分别为:

$$V_{oc} = \frac{k_B T}{q} \cdot \ln\left(\frac{J_{sc}}{J_0} + 1\right) \quad (2)$$

$$J_{sc} = \int q \cdot F(\lambda) \cdot \left\{ \frac{(L_b \alpha)^2}{(L_b \alpha)^2 - 1} \cdot \left[1 - \frac{\exp(-X_b \alpha)}{\cosh\left(\frac{X_b}{L_b}\right)} \right] - \frac{L_b \alpha}{(L_b \alpha)^2 - 1} \cdot \tanh\left(\frac{X_b}{L_b}\right) \right\} \cdot d\lambda \quad (3)$$

$$FF = \frac{voc - \ln(voc + 0.72)}{voc + 1} \quad (4)$$

$$\eta = \frac{V_{oc} J_{sc} FF}{P_{in}} \quad (5)$$

其中，X 为基区厚度， α 为 Si 的吸收系数， $F(\lambda)$ 为光子数密度， P_{in} 为太阳光的入射功率。

3.1.2 氧化铝钝化层的影响

电池结构如图 1 所示，电性能如表 1 所示，CuO 的实际测量厚度分别为 236nm、487nm、815nm， Al_2O_3 为 5nm。如图 2 所示，与没有氧化铝钝化层的电池相比，例如电池#1 和#2，效率从 3.49% 增加到 5.03%，开路电压从 332mV 增加到 367mV，短路电流密度从 17.58 mA/cm² 增加到 22.14 mA/cm²，可见由于氧化铝的存在，显著减少了复合。



Al
ITO
Al ₂ O ₃
CuO
Si
Ag

图 1 电池结构

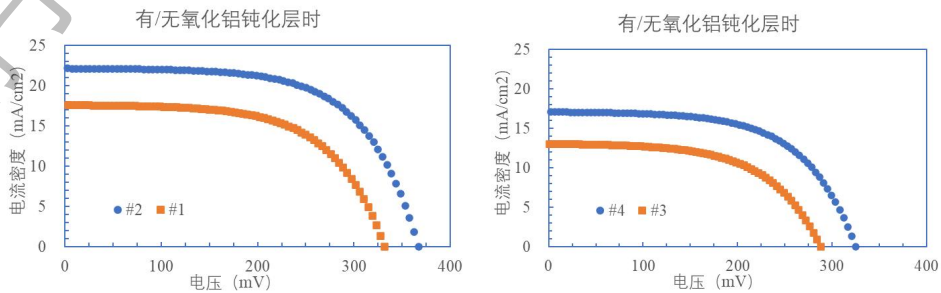


图 2 有无氧化层时的 IV 曲线

表 1 电性能 (AM1.5G)

电池编号	#1	#2	#3	#4	#5	#6
CuO 厚度	236nm		487nm		815nm	
氧化铝	无	有	无	有	无	有
Voc(mV)	332	367	288	325	258	279
Jsc(mA/cm ²)	17.58	22.14	13.04	17.09	9.99	12.33
FF	0.598	0.619	0.568	0.594	0.544	0.561
Eff(%)	3.49	5.03	2.13	3.30	1.40	1.93

3.1.3 CuO 厚度的影响

当存在氧化铝钝化层时，当 CuO 厚度为 236nm 时，效率为 5.03%。当 CuO 厚度为 487nm 时，效率为 3.30%。当 CuO 厚度为 815nm 时，效率为 1.93%。可见，随着 CuO 厚度的增加，效率、开路电压和短路电流密度相应减小，这是由于 CuO 材料的少子寿命太小。下一步工作将改善材料性能，改进制造过程工艺。

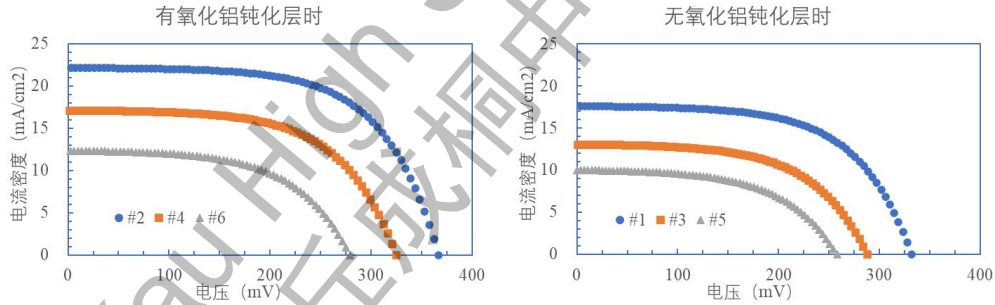


图 3 不同 CuO 厚度对 IV 曲线的影响

3.2 QE 测试分析

3.2.1 QE 测试原理

太阳电池的量子效率 q_e (quantum efficiency) 测试，就是测量在不同波长光照条件下的光生电流。太阳电池 pn 结，主要包括发射层、耗尽层基区，其量子效率 QE 可以表示为^[9]：

$$QE = QE_{emitter} + QE_{depl} + \exp(-\alpha \cdot (xe + W))QE_{base} \quad (6)$$

其中， α 为材料的吸收系数。

3.2.2 氧化铝钝化层的影响

如图 4 所示，当 CuO 厚度为 236nm 时，存在氧化铝钝化层时，在短波长范围的量子效率显著增加。当 CuO 厚度为 487nm 时，氧化铝钝化层起到同样效率。说明氧化铝可以对 CuO 表面进行钝化，减少少数载流子在表面的复合。

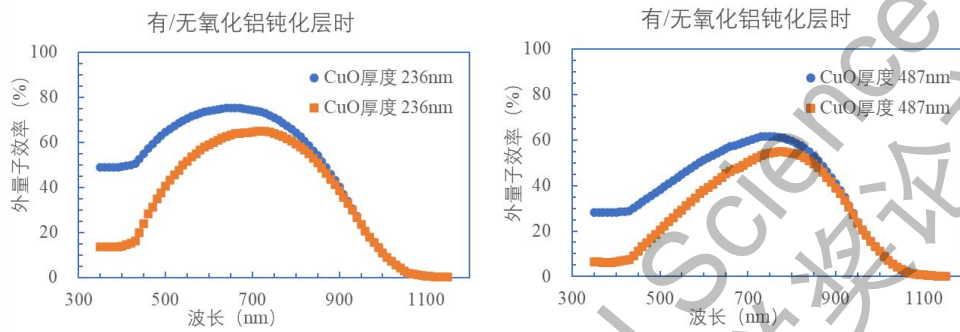


图 4 氧化铝钝化层的影响

3.2.3 CuO 厚度的影响

如图 5 所示电池的量子效率，当 CuO 厚度分别为 236nm、487nm、815nm 时，随着厚度的增加，量子效率减小，说明 CuO 材料中的少数扩散长度较短。目前制备 CuO 薄膜太阳能电池的方法主要有溶胶凝胶法、脉冲激光沉积法、化学气相沉积法、磁控溅射法、热蒸发法等^[4,10,11,12]，各种制备工艺各有优缺点，下一步将优化制造工艺，进一步提升效率。

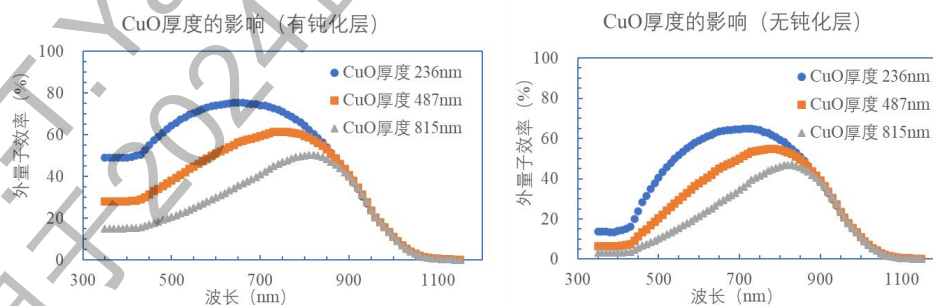


图 5 CuO 厚度的影响

4 结论和展望

本研究探讨了氧化铝钝化层和 CuO 薄膜厚度对 CuO/Si 太阳能电池性能的影响。实验结果表明，5 nm 厚的氧化铝钝化层能够有效减少表面复合，显著提升电池的短路电流密度、开路电压和转换效率，证明了氧化铝在提升电池性能中的关键作用。

同时，CuO 薄膜的厚度对电池性能产生了明显影响，较薄的 CuO 层(236 nm)表现出更高的效率，而随着厚度的增加，效率逐渐下降，说明 CuO 材料中较短的少数载流子扩散长度限制了其性能表现。量子效率测试也表明，氧化铝钝化层在短波长范围内具有显著的增强作用。

尽管本研究展示了 CuO 薄膜太阳能电池的潜力，但薄膜质量、界面复合和 CuO 材料本身的少数载流子寿命等问题仍然限制了其效率提升。未来工作将致力于优化薄膜制备工艺、改进界面钝化技术以及探索新型材料，以进一步提高电池性能。

5 参考文献

- [1] 张君善, 郭林肖, 高斐等. CuO 薄膜的制备及其光伏特性 [J]. 光子学报, 2012, 41(06): 700-703.
- [2] Mittiga, Alberto, Salza, et al. Heterojunction solar cell with 2% efficiency based on a Cu₂O substrate. [J]. Applied Physics Letters, 2006. 247.
- [3] 孙杰. 多晶硅太阳能电池制作及氧化亚铜薄膜制备研究 [D]. 陕西师范大学, 2011.
- [4] 张春萍. CuO 薄膜的制备及其光伏特性研究. Diss. 杭州电子科技大学, 2010.
- [5] Seeger K. Semiconductor physics [J]. Encyclopedia of Modern Optics, 2005, chapter 7(4131): 37-52.
- [6] S M. Sze: Physics of Semiconductor Devices [J]. Microelectronics Education, 1981, 51(1): 38.
- [7] Würfel, Peter. Physics of Solar Cells: From Principles to New Concepts [J]. Journal of Applied Physics, 2005: 11-21.
- [8] 王亮兴, 提高晶体硅太阳能电池效率的多种新机制研究, 复旦大学博士论文, p104-104.
- [9] Hovel H. Solar Cells [M]. New York, Academic Press, 1975: 339.
- [10] Kuddus S I A B M .Fabrication of Facile Synthesized ZnO/CuO Heterojunction Solar Cell Using Spin Coating Technique [J]. Advanced Science, Engineering and Medicine, 2019, 11(6). 2474
- [11] Njoroge W K , Omayio E O , Karimi P M , et al. Current-voltage characteristics of p-CuO/n-ZnO:Sn Solar cell [J]. Natural Sciences Publishing Cor, 2013. 235-238.
- [12] Manibalan G , Murugadoss G , Jayavel R , et al. Facile route of heterostructure CeO₂-CuO nanocomposite as an efficient electron transport material for perovskite solar cells [J]. Environmental Research. Section A, 2023. 115853.

致谢

本研究项目旨在通过一种 CuO 薄膜的研究改进太阳能电池的性能。太阳能电池作为较为成熟的新能源技术，近年来备受关注。该项目由王亮兴老师指导，王老师是我参加上海市航空宇航与力学学科研究生学术论坛当志愿者时认识的，在太阳能光伏方面有着深厚的学术造诣和丰富的实践经验。我的研究题目来源于一次我与王老师关于太阳能发电效率的讨论中，他建议我关注 CuO 薄膜新材料在电池中的应用，并提供了一些相关的文献资料供我参考。在老师的指导下，我确定了研究方向，并制定了初步的研究计划。

实验设计阶段，我通过资料的学习初步完成了实验方案的设计，在王老师的指导下进行了多次修改和完善。在我确认使用制备 CuO 薄膜的实验方案并对实验步骤做出计划后，王老师对实验设计提出了许多宝贵的建议，帮助我学习和理解电子束蒸镀技术，优化了实验流程。实验实施过程中，我严格按照设计方案执行，并记录了所有的实验数据。王老师还亲自参与了部分实验，确保了实验结果的可靠性。

在收集数据的过程中，确保测量数据的可靠性是我面临的一大挑战。由于我对仪器使用不熟练，在镀膜过程中因为一些其他因素的干扰，测得的数据与预计结果出现了偏差，排除原因和决定应该重新测量还是修改猜想和推论成为了一个难题。为了确保实验数据质量，王老师推荐了几种有效的数据清洗方法，包括去除异常值、填补缺失值等，确保了实验数据的质量。

此外，王老师还鼓励我们在研究过程中勇于尝试新的方法和技术，并为我们提供了必要的资源和支持。比如在氧化铝钝化层是否会产生影响时他引导我学习了量子效率这个新的知识领域。在他的指导下，我们不仅完成了这项研究，更在学术能力和研究方法上有了显著提升。

总之，本研究项目的成功离不开王老师的悉心指导和支持。他的专业知识和无私帮助使我们的研究工作得以顺利进行，并取得了预期的成果。在此，我们衷心感谢王老师在研究过程中给予的所有帮助和指导。