



天津中德应用技术大学
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

本科生毕业设计

不同大气质量下硅电池光吸收特性的研究

**Study on optical absorption characteristics of silicon cells
under different air masses**

姓 名 韩嘉发

学 院 能源工程学院

专 业 能源与动力工程

指导教师 陈子坚

职 称 副教授

完成时间 2023.5.27

天津中德应用技术大学

本科生毕业设计（论文）选题申报表

学 院	能源工程学院	申 报 人	姓 名	陈子坚
专 业	能源与动力工程		技术职务	副高
题目名称	不同大气质量下硅电池光吸收特性的研究			
题目类型	应用研究(研究论文)	题目来源	科研课题	
课题来源、背景及意义	该选题主要来源于科研课题。研究不同大气质量的硅电池光吸收特性有助于进一步考虑硅电池的应用地区,实现量身定做硅电池表面光学结构。			
任务及要求	分析总结不同大气质量下的太阳能光谱辐照度分布,研究其对硅电池的光吸收特性影响,形成研究论文。			
工作条件	计算机, 模拟软件, 分光光度计等。			
知识与能力要求	使学生能够了解太阳光谱的相关知识, 理解多层介质光动力学过程, 具备一定的研究能力。			
系（教研室）审查意见： 同意				
负责人(签名): _____ 年 月 日				



天津中德应用技术大学

Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

毕业设计（论文）任务书

题目：不同大气质量下硅电池光吸收特性的研究

学院：能源工程学院

专业：能源与动力工程

学生姓名：韩嘉发

学号：19444010511

起止日期：2022年9月7日~2023年6月4日

指导教师：陈子坚

任务书下达日期：2022年12月4日

任务书填写要求

1. 毕业设计（论文）任务书由指导教师根据各课题的具体情况填写，经专业负责人审查签字后生效。此任务书应在毕业设计（论文）开始前一周内填好并发给学生；
2. 任务书内填写的内容，必须和学生毕业设计（论文）完成的情况相一致；
3. 任务书内有关“学院”、“专业”等名称的填写，应写中文全称，不能写数字代码。学生的“学号”要写全号（如：16014010101）；
4. 有关年月日等日期的填写，应当按照国标 GB/T 7408—94《数据元和交换格式、信息交换、日期和时间表示法》规定的要求，一律用阿拉伯数字书写。如“2004 年 3 月 21 日”或“2004-03-21”。
5. 本毕业设计（论文）课题成果的要求，内容要具体化和数量化。如“毕业设计（论文）一套；A0 号装配图纸 1 张；A2 号电气控制原理图纸 2 张；实物样机 1 台；产品 2 件”等。

毕 业 设 计（论 文）任 务 书

1. 毕业设计（论文）课题背景及意义

在太阳能电池在制作工程中为减少反射损失，要在电池表面制作一层或多层减反射膜，进而提高太阳能电池的光电转换效率。现有文献表明，在同一大气质量下，不同的减反射膜厚度对光吸收效率存在差异；同一减反射膜厚度对不同波长的太阳光吸收效率也是不同的。并且我国不同地区的光照强度不同，大气质量也存在差异，故研究不同大气质量下减反射膜对硅电池的影响差异对定制化光伏电池、空间光伏电池的制备都有很重要的意义。

2. 毕业设计（论文）课题任务的内容和要求

使学生能够了解太阳光谱的相关知识，理解多层介质光动力学过程，具备一定的研究能力。分析总结不同大气质量下的太阳能光谱辐照度分布，研究其对硅电池的光吸收特性影响，形成研究论文。

毕业设计(论文)任务书

3. 毕业设计(论文)课题成果(包括毕业设计论文、图表、实物样品等):

通过分析不同大气质量下的太阳光谱辐照度数据, 尝试通过传输矩阵法模拟其对不同减反射膜的硅电池光吸收特性的影响, 并形成毕业论文,

4. 推荐参考资料:

[1]杨文华,李红波,吴鼎祥.太阳电池减反射膜设计与分析[J].上海大学学报(自然科学版),2004(01):39-42.

[2]Chen Zijian, Ma Zenghong, Jia Haoyuan, Zhang Lian, Sun Yan, Wang Shiyu. Simulation and analysis of polycrystalline silicon photovoltaic cells surface color differences based on transfer matrix method[J]. Optoelectronics Letters, 2021, 17(12):0734-0740.

[3]杨文华,吴鼎祥,李红波.空间高效硅太阳电池减反射膜设计与数值分析[J].半导体学报,2004(09):1118-1122.

[4]王鑫,卢刚,康海涛,张治,杨勇洲.晶硅太阳电池多层减反射膜设计与分析[J].电源技术,2019,43(03):483-485.

[5]邹凯,和江变,李健,马承鸿.物理冶金多晶硅太阳电池叠层钝化减反射结构模拟[J].电子元件与材料,2015,34(06):28-32.

[6]王进福,张国富,王芳,李娥,张蕊,彭柳军.晶体硅太阳电池 ZnS/MgF₂ 减反射膜的设计与分析[J].云南师范大学学报(自然科学版),2022,42(02):14-17.

[7]王安祥,张晓军,李继军.色散效应对钝化硅太阳电池减反射膜系设计的影响[J].红外与激光工程,2018,47(06):202-209.

[8]Shah Deb Kumar, KC Devendra, Umar Ahmad, Algadi Hassan, Akhtar Mohammad Shaheer, Yang OBong. Influence of Efficient Thickness of Antireflection Coating Layer of HfO₂ for Crystalline Silicon Solar Cell[J]. Inorganics, 2022, 10(10):171.

[9]吕欣,崇锋,郭灵山,陈文浩.基于 Matlab 软件 SiN_x/SiO₂ 叠层减反射膜厚度优化的研究[J].太阳能,2016(02):22-25+48.

[10]王辉,朱浩,樊代和,吴平,何钰,马小娟.传输矩阵法在大学物理波动光学教学中的应用[J].物理与工程,2019,29(05):118-122.

[11]王永东,崔容强,徐秀琴.太阳电池减反射膜系统的研究[J].太阳能学

报,2001(03):317-321.

所在专业审查意见:

同意

负责人: 张链

2022年12月11日



天津中德应用技术大学
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

本科生毕业设计（论文）开题报告

题 目： 不同大气质量下硅电池光吸收特性的研究

学 院： 能源工程学院

专 业： 能源与动力工程

学生姓名： 韩嘉发

学 号： 19444010511

起止日期： 2022年9月7日-2023年6月4日

指导教师： 陈子坚

开题日期： 2022年12月23日

一、 开题报告内容（课题的目的意义、与本课题有关的国内外研究（应用）情况及发展趋势、课题主要研究内容、参考文献等）

1. 研究目的意义

现如今，新一轮的能源危机逐步显现，解决能源危机已经成为全球关注的问题，也是亟待解决的问题。而太阳能作为一种可再生资源，对于我们人类来说它是取之不尽，用之不竭的。对于太阳能的利用存在很多方法，太阳能发电则是其中的一种环保的发电方式，因此利用太阳能电池发电便进入了大家的视野。市场上常见的太阳能电池有单晶硅电池、多晶硅薄膜电池、染料敏化太阳能电池和钙钛矿太阳能电池。

但是由于光在硅表面会存在反射而造成光损失，即使经绒面处理后的硅表面，光损失还是较大。因此，在太阳能电池在制作工程中为减少反射损失，要在电池表面制作一层或多层减反射膜，进而提高太阳能电池的光电转换效率。因此，对于减反射膜厚度的研究便成了提高太阳能电池光电转换效率有效措施。减反射膜是利用光在减反射膜的两侧处反射光存在位相差的干涉原理而达到减反射效果^[1]。

现有文献表明，在同一大气质量下，不同的减反射膜厚度对光吸收效率存在差异；同一减反射膜厚度对不同波长的太阳光吸收效率也是不同的，并且我国不同地区的光照强度不同，大气质量也存在差异，故研究不同大气质量下不同减反射膜厚度对硅电池的影响差异对定制化光伏电池、空间光伏电池的制备都有很重要的意义。

但目前新建光伏发电系统时还是以大气质量 AM 为 1.5 作为标准进行计算，这就使一部分太阳能遭到浪费，本研究将利用软件针对不同大气质量进行太阳能电池减反射膜厚度分析，得出其最佳厚度，也可以在特定波长的光照下给出最佳厚度，最大限度地利用太阳能，提高太阳能电池的光电转换效率。

2. 国内外研究（应用）情况及发展趋势

近年来，国内外学者们对减反射膜的优化方法进行了很多研究。杨文华等人通过任选多层减反射膜中的一层，将上下层等效为一个界面，进而整个系统便等效为一个单层膜，然后利用菲涅尔公式求出多层膜系的等效菲涅尔系数，进而求出反射率 R, 然后引入空间 AM=0 的太阳光谱，计算出了加权平均反射率 R_w 。对单层、双层、三层减反射膜分别进行分

析得出折射率大的减反射膜材料厚度的变化对 R_w 的影响较大，并且双层减反射膜厚度的变化对 R_w 的影响较单层来说小。

王鑫等人利用 PC1D 软件模拟仿真了单层、双层、三层减反射膜厚度的太阳电池，得出随着膜层数的增加，电池的电性能、光吸收效率等有了明显的提升，并且三层膜对于入射光短波吸收更有优势，对实际电池的减反射膜设计提供了思路。

马新尖分别对双层 $\text{SiN}_x\text{-SiN}_x$ 减反射膜和带有氧化层的三层 $\text{SiN}_x\text{-SiN}_x\text{-SiO}_2$ 减反射膜进行模拟分析，模拟结果表明：增加了氧化层的三层 $\text{SiN}_x\text{-SiN}_x\text{-SiO}_2$ 减反射膜多晶硅太阳电池电学输出特性优于双层 $\text{SiN}_x\text{-SiN}_x$ 减反射膜多晶硅太阳电池。

邹凯等人采用 PC1D 模拟软件对 P 型物理冶金多晶硅太阳电池的 $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x/\text{SiN}_x$ 叠层钝化减反射结构进行了计算模拟，结果表明：引入 SiO_2 钝化层后可以明显改善电池的表面减反射效果，并最终提高电池转换效率，但随着 SiO_2 膜厚度增大，光电转换效率也会出现明显的下降趋势。

王进福等人使用 TFCalc 软件进行薄膜设计分析，分析得出 ZnS 和 MgF_2 的最佳薄膜厚度分别为 67.86nm 和 119.14nm，最小有效折射率为 $R_{\text{min}}=3.37\%$ 。在其分析过程中对 ZnS 和 MgF_2 的单层膜进行研究，研究过程中对单个膜厚连续增加和减少 10nm，得出 ZnS 的膜厚变化对有效反射率的影响较大，他们还分别对 ZnS 和 MgF_2 各层折射率进行改变，连续增大或减小 0.1 得出适当增大 MgF_2 的折射率可得到更低的 R_e 。

王安祥等人在设计减反射膜的过程中注意到减反射膜材料的折射率在 300~600nm 的波长范围内有较大变化，因此在膜系设计中不容忽略。最后模拟得出对 $\text{MgF}_2/\text{TiO}_2$ ， $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 双层减反射膜，与不考虑色散情形相比，考虑色散下优化后的最小加权平均反射率分别减小了 36.6% 和 37.6%，因此考虑色散后所得的参数更准确。

Shah 等人通过 PC1D 仿真分析对高性能硅太阳能电池氧化铪 (HfO_2) 的厚度进行优化。

最后分析得出厚度为 70nm 的 HfO_2 减反射膜覆盖波长范围为 400 - 1000nm, 平均反射率是最低的为 6.33%。

吕欣等人首次将 AM1.5G 光谱、透过叠层膜到达硅片表面光子数作为衡量标准, 通过 Matlab 软件运用光学导纳的方法最后得出 $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2$ 叠层膜厚度为 70nm+20nm 时, 平均反射率最低为 9.48%; 同时光子产量达到最大, 为 $2.618 \times 10^{17} (1/\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ 。

王永东等人从薄膜光学的角度出发, 对现有的太阳能减反射膜进行了优化设计, 并且应用于实际情况, 将短路电流的平均增益达到了 44.9%, 效率的平均增益达到了 47%。

3. 主要研究内容

目前, 太阳能电池的光电转换效率仍然偏低, 加大对减反射膜厚度的研究可以有效改善该问题。该研究是在前人研究的基础上, 整理出不同大气质量的太阳光谱辐照度数据, 通过 Matlab 软件进行模拟分析, 进而得出不同厚度减反射膜的多晶硅光伏电池吸收光谱模拟图。通过分析该图得出不同大气质量对光吸收效率的影响。

- (1) 将已有的不同大气质量的太阳光谱辐照度数据进行汇总整理, 以备后期模拟计算使用;
- (2) 用传输矩阵法建立光伏电池减反射膜厚度的模型;
- (3) 通过 MATLAB 软件将不同大气质量下的数据转化为不同厚度减反射膜的光伏电池光吸收效率图像;
- (4) 分析图像, 得出结论;

4. 参考文献

- [1] 杨文华, 李红波, 吴鼎祥. 太阳电池减反射膜设计与分析[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2004(01): 39-42.

[2] Chen Zijian, Ma Zenghong, Jia Haoyuan, Zhang Lian, Sun Yan, Wang Shiyu. Simulation and analysis of polycrystalline silicon photovoltaic cells surface color differences based on transfer matrix method[J]. Optoelectronics Letters, 2021, 17(12):0734-0740.

[3] 杨文华, 吴鼎祥, 李红波. 空间高效硅太阳能电池减反射膜设计与数值分析[J]. 半导体学报, 2004(09):1118-1122.

[4] 王鑫, 卢刚, 康海涛, 张治, 杨勇洲. 晶硅太阳能电池多层减反射膜设计与分析[J]. 电源技术, 2019, 43(03):483-485.

[5] 邹凯, 和江变, 李健, 马承鸿. 物理冶金多晶硅太阳能电池叠层钝化减反射结构模拟[J]. 电子元件与材料, 2015, 34(06):28-32.

[6] 王进福, 张国富, 王芳, 李娥, 张蕊, 彭柳军. 晶体硅太阳能电池 ZnS/MgF₂ 减反射膜的设计与分析[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2022, 42(02):14-17.

[7] 王安祥, 张晓军, 李继军. 色散效应对钝化硅太阳能电池减反射膜系设计的影响[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(06):202-209.

[8] Shah Deb Kumar, KC Devendra, Umar Ahmad, Algadi Hassan, Akhtar Mohammad Shaheer, Yang OBong. Influence of Efficient Thickness of Antireflection Coating Layer of HfO₂ for Crystalline Silicon Solar Cell[J]. Inorganics, 2022, 10(10):171.

[9] 吕欣, 崇锋, 郭灵山, 陈文浩. 基于 Matlab 软件 SiN_x/SiO₂ 叠层减反射膜厚度优化的研究[J]. 太阳能, 2016(02):22-25+48.

[10] 王辉, 朱浩, 樊代和, 吴平, 何钰, 马小娟. 传输矩阵法在大学物理波动光学教学中的

应用[J]. 物理与工程, 2019, 29(05):118-122.

[11]王永东, 崔容强, 徐秀琴. 太阳能电池减反射膜系统的研究[J]. 太阳能学报, 2001(03):317-321.

二、进度及预期结果

起止日期	主要内容	预期结果
一、2022.10-2022.11 二、2022.11-2022.12 三、2022.12-2023.01 四、2023.01-2023.03 五、2023.03-2023.05 六、2023.05-2023.06	一、确认毕业设计题目、进行双选 二、撰写开题报告 三、查找并参考相关文献、学习相关知识 四、整理数据、利用软件进行模拟分析 五、撰写论文 六、准备答辩	一、题目确认 二、如期提交开题报告 三、文献整理完成、相关知识具备 四、数据整理完成、模拟分析完成 五、如期提交毕业论文 六、完成毕业论文答辩
完成课题的现有条件	计算机、Matlab 软件、相关文献	
指导教师 意见	无 指导教师: _____ 年 ____ 月 ____ 日	

开题答辩

小组意见

组 长： _____ 年 ____ 月 ____ 日

天津中德应用技术大学

本科生毕业设计（论文）的声明

本人郑重声明：所呈交的毕业设计（论文），是本人在指导教师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本毕业设计（论文）的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或没有公开发表的作品内容。对本设计（论文）所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本毕业设计（论文）原创性声明的法律责任由本人承担。

毕业设计（论文）作者签名：

年 月 日

本人声明：该毕业设计（论文）是本人指导学生完成的研究成果，已经审阅过设计（论文）的全部内容，并能够保证题目、关键词、摘要部分中英文内容的一致性和准确性。

毕业设计（论文）指导教师签名：

年 月 日

摘 要

太阳能电池作为直接将太阳能转化为电能的半导体器件，它在人们的日常生活中越来越受到重视。但是迄今为止市场上太阳能电池的利用效率还是不高，目前已知的一个原因就是硅电池的光电转换效率不高，其中存在有一些波段光吸收的效率不高的情况。并且在实际应用中不同地区的太阳光谱辐照度分布不同，而商用硅电池大多是用大气质量值 1.5 的太阳光谱辐照度分布为标准制作的，这就使得硅电池在使用中不能与其所在地区太阳光谱辐照度分布完全匹配，进而影响光吸收特性。特别是对于航空航天事业蓬勃发展的我国，其空间装备供电解决方案——空间光伏电站，地球外太阳光谱辐照度分布的差异尤为明显，无法很好地匹配现有的低价商用电池。

该研究主要是从两个方面对这个问题进行改进，一种是利用传输矩阵法可以模拟仿真获得不同波长对应的硅电池吸收率，再与不同大气质量下的太阳光谱辐照度分布进行叠加汇总，最终得出硅电池在不同大气质量下的总的可吸收功率密度，进而可获得不同大气质量下的硅电池最佳减反射膜厚度。实验结果显示大气质量为 0 时减反射膜的最佳厚度为 64nm，大气质量为 1 和 1.5 时减反射膜的最佳厚度为 66nm，同时模拟了减反射膜折射率变化对最佳厚度的影响；另一种是在硅电池表面涂抹 CdSe 量子点，通过下转换机制即发射的光子能量低于吸收的光子能量，将硅电池吸收效率不高的短波长光转换为吸收效率高的长波长光，进而改善太阳能电池的光吸收特性，最终改善其光电转换效率。实验结果显示针对商用硅电池，需要优化旋涂工艺来进一步完善量子点在硅电池表面形成的特异结构，以实现硅电池性能的改进。

根据模拟仿真与实验结果分析可以发现，需要进一步优化减反射膜厚度及其相关制作工艺以生产硅电池可匹配不同大气质量下的太阳能光谱辐照度分布，同时可引入量子点对现有商用硅电池进行改进，以使其在不同大气质量下的性能进一步提升。

关键词：减反射膜厚；大气质量；吸收光谱；量子点；太阳光谱辐照度

ABSTRACT

Solar cells, as semiconductor devices that directly convert solar energy into electrical energy, are increasingly valued in people's daily lives. However, the utilization efficiency of solar cells on the market is still not high, and one known reason for this is the inefficiency of silicon solar cells in converting light into electricity, especially in absorbing some bands of light. In addition, the spectral irradiance distribution of solar radiation varies in different regions, and commercial silicon solar cells are mostly made with the standard of the solar spectral irradiance distribution of air mass 1.5, which means that they cannot perfectly match the spectral irradiance distribution of solar radiation in their actual region of use, thereby affecting their light absorption characteristics. This is particularly problematic for China's thriving aerospace industry, where the power supply solution for space equipment - space photovoltaic power stations - faces the challenge of matching the solar spectral irradiance distribution in outer space, which is significantly different from that on Earth, with the currently available low-cost commercial cells.

This study focused on improving the efficiency of solar cells from two aspects. The first approach is to use the transfer matrix method to simulate and obtain the absorption rate of silicon solar cells at different wavelengths. By combining the spectral irradiance distribution of solar radiation at different air masses, the total power density that can be absorbed by silicon solar cells under different air masses can be calculated. This can ultimately determine the optimal thickness of anti-reflective coatings for silicon solar cells at different air masses. The experimental results showed that the optimal thickness of the anti-reflective coating was 64 nm under air mass 0, and 66 nm under air masses 1 and 1.5. The study also simulated the effect of changes in the refractive index of the anti-reflective coating on its optimal thickness. The second approach is to coat the surface of silicon solar cells with CdSe quantum dots. Through the down-conversion mechanism where emitted photons have lower energy than absorbed photons, the low efficiency of silicon solar cells in absorbing short-wavelength light can be improved by converting it

into higher efficiency long-wavelength light, thus improving the light absorption and conversion efficiency of solar cells. The experimental results showed that for commercial silicon solar cells, it is necessary to optimize the spin coating process to further improve the specific structure formed by quantum dots on the surface of silicon cells, in order to achieve the desired improvement in the overall performance of silicon solar cells.

Based on the simulation and experimental results, it was found that there is a need to further optimize the thickness and related fabrication process of the anti-reflective coatings to produce silicon solar cells that can match the spectral irradiance distribution of solar radiation at different air masses. Additionally, introducing quantum dots could improve the performance of existing commercial silicon solar cells, enabling further enhancements under different air masses.

Keywords: anti-reflection film thickness; air mass; absorption spectrum; quantum dots;
solar spectral irradiance

目 录

第一章 绪论	1
1.1 项目背景	1
1.2 研究现状	2
1.3 研究内容	3
第二章 太阳能电池模拟与实验所用基础知识	5
2.1 MATLAB 与 Origin 介绍	5
2.2 太阳能电池相关基础知识	5
2.3 传输矩阵法基础知识	7
2.4 AM 基础知识	9
2.5 光吸收特性基础知识	10
第三章 不同 AM 下硅电池光吸收特性的模拟研究	11
3.1 实验方案设计	11
3.2 模拟实验	11
第四章 量子点下转换硅电池光吸收特性实验研究	19
4.1 量子点简介	19
4.2 实验方案设计	19
4.3 测量不同量子点层数的太阳能电池电学性能	20
第五章 结论与展望	26
参考文献	27
致 谢	29

第一章 绪论

1.1 项目背景

现如今，能源危机日益显现，而解决能源危机便成为了全球关注的热点问题，这也是全球亟待解决的问题。太阳能作为地球上的清洁可再生能源，具有源源不断的特点，对我们人类来说是无穷无尽的资源。目前，对于太阳能的利用有很多方法，利用太阳能发电便是其中最常见的一种方式，因此对于光伏发电的研究也就进入了大家的视野，越来越多的光伏电站也拔地而起。

2020 年 9 月，我国政府公布了到 2030 年“碳达峰”和 2060 年“碳中和”的目标，这一目标的提出标志着我国在应对气候变化、推动绿色低碳发展方面又向前迈出了一步。因此今后新能源必定会成为未来发展的大趋势，并且太阳能时取之不尽用之不竭的清洁能源，人类利用太阳能发电便是其中最主要的能源利用方式。而在这众多能源利用方式中，利用太阳能硅电池发电逐渐受到人们的关注，但是目前太阳能电池光电转换效率（Photoelectric conversion efficiency, PCE）低，使得太阳能利用效率低下。

但由于光在硅表面会存在反射而造成光损失，因此在制作太阳能电池的时候要在硅表面镀一层或多层减反射膜，减反射膜是利用光在减反射膜的两侧处反射光存在位相差的干涉原理而达到减反射效果^[1]，进而提高 PCE。虽然在近几十年间，太阳能光电转换技术有了很大的提高，但是其转换效率仍然是我们要解决的问题。

并且目前的研究表明，处于同一大气质量（Air mass, AM）下的不同减反射膜厚度的太阳能电池对于光吸收的效率存在差异，而且太阳能电池对不同波长的光吸收率也是不一样的。目前在制备太阳能电池时没有细致考虑该光伏电站的建设地点及其对应的 AM 下太阳能光谱辐照度分布情况，这就使得部分太阳能不能得到合理利用，进而影响光吸收率。因此若将不同 AM 下的硅电池最佳减反射膜厚度得出，这就可以大大提高太阳能的利用率，也可以根据光伏电站建设具体位置给出定制化的太阳能电池。

1.2 研究现状

近年来,对于晶硅太阳电池的减反射膜进行研究越来越多,有的学者进行多层减反射膜的设计与分析;有的学者将减反射膜的材料进行改变,进而研究不同减反射膜材料下的最佳厚度及不同材料对有效反射率的影响效果。王鑫等人利用 PC1D 软件模拟仿真了单层、双层、三层减反射膜厚度的太阳电池,得出随着膜层数的增加,电池的电性能、吸收光谱等有了明显的提升,并且三层膜对于入射光短波吸收更有优势,对实际电池的减反射膜设计提供了思路。

2022 年王进福^[1]通过 TFCalc 软件进行薄膜设计分析,分析得出 ZnS 和 MgF₂ 的最佳薄膜厚度分别为 67.86nm 和 119.14nm,最小有效折射率为 $R_{\min}=3.37\%$ 。在其分析过程中对 ZnS 和 MgF₂ 的单层膜进行研究,研究过程中对单个膜厚进行增加和减少 10nm,对比单层膜厚对 R_e 的影响,得出 ZnS 的膜厚变化对有效反射率的影响较大,因此在实际制备过程中要严格控制好膜厚;他们还对这两种减反射膜的折射率进行改变,连续增大或减小 0.1,得出 MgF₂ 折射率变化对于 R_e 的影响较 ZnS 要大。并且在各层达到理论设计值后, R_e 会随着 ZnS 的增大而增大,而在随 MgF₂ 增大时,会在 0.1 的范围内先减小然后在逐渐增大。

2020 年马新尖^[2]通过对双层 SiN_x-SiN_x 减反射膜和带有氧化层的三层 SiN_x-SiN_x-SiO₂ 减反射膜进行模拟分析,最后得出增加了氧化层的三层 SiN_x-SiN_x-SiO₂ 减反射膜多晶硅太阳电池电学输出特性优于双层 SiN_x-SiN_x 减反射膜多晶硅太阳电池。在全波范围内,三层减反射膜比双层减反射膜多晶硅电池具有更好的减反射效果和钝化效果,并且其电学性能测试的结果均优于双层减反射膜。

2015 年邹凯等人^[3]采用 PC1D 对 P 型物理冶金多晶硅太阳电池的 SiO₂/SiN_x/SiN_x 叠层钝化减反射结构进行了计算模拟,结果显示加入 SiO₂ 钝化层后电池的表面减反射效果有了明显的改善,进而提高电池转换效率,并且 SiO₂ 膜厚度也存在最佳值,超过此最佳值后 PCE 便会出现明显的下降趋势。他们在模拟计算的过程中还发现 PCE 的提高基本来自于电池短路电流的提升,其开路电压数值变化不大。

2007 年白一鸣等人在研究色散效应对晶硅太阳能电池反射率的影响时发现色散情形下的反射率与实验数据更加符合，而在 2018 年王安祥等人^[4]进一步在色散效应上加入膜系优化设计，最后模拟得出对 $\text{MgF}_2/\text{TiO}_2$ ， $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 双层减反射膜，与不考虑色散情形相比，考虑色散下优化后的最小加权平均反射率分别减小了 36.6% 和 37.6%，因此考虑色散后所得的参数更准确，这为制备空间硅电池减反射膜提供了理论依据。

2004 年杨文华等人^[5-6]根据光学薄膜原理，采用计算机程序进行模拟仿真，得到了反射率与波长之间的关系曲线。通过分析曲线得出，改变折射率大的材料的厚度对于其反射率的影响较大，虽然每一种材料都有其对应的最佳膜厚，但是减反射效果较好的情况只在中心波长的范围内，在较宽波长范围内的减反射效果不是很好。而进行双层优化设计以后的减反射效果会有明显的改善。

许多科学家对光伏电池特别是硅电池表面的光学结构进行很多细致的研究，但最主要的问题是这些研究都是基于 AM1.5 太阳光谱辐照度分布的，对于不同 AM 下光伏电池表面光学结构的研究是几乎没有的，这也导致了实际应用时可能现有表面光学结构不能很好地匹配使用地区的太阳光谱辐照度分布，这在空间光伏电站应用中是更为重要的。

1.3 研究内容

太阳能电池 PCE 是总的输出功率与太阳电池表面吸收太阳光的总功率的比值，故太阳能电池对太阳光的吸收特性影响 PCE。为了提高太阳能电池 PCE，学者们进行了大量的实验及模拟得出结论：通过将太阳能电池表面改变为绒面和在其表面镀减反射膜可以有效提高其 PCE。但是目前在制备太阳能电池时没有细致考虑光伏电站的建设地点及其对应的 AM 下太阳能光谱辐照度分布情况。此次课题将以此为出发点进行模拟及实验，最终得出结论，为今后定制化太阳能电池提供更加坚实的基础。

此次模拟及实验是基于美国航空航天局（National Aeronautics and Space Administration, NASA）发布的太阳辐射的光谱分布数据，利用 MATLAB 软件通过传输矩阵法进行模拟仿真，可以得出不同 AM 下硅电池最好的减反射膜厚度。同

时在研究过程中还发现硅电池的吸收光谱和太阳光谱不匹配，而 CdSe 量子点可以吸收 300-500nm 的光，并且通过调节量子点尺径可以发射出发射峰为 628nm 的光，恰好符合硅电池吸收光谱。目前，前人对地基光伏电池已经做出了大量的研究，而对于空间电池的研究却很少。因此，本次研究涂抹量子点的硅电池主要是用于太空中的空间电池，即认为在 AM0 下，涂抹量子点后的硅电池效率会有较明显提升。

本研究在两个方面着手研究，一种是研究不同 AM 下的最佳减反射膜厚度，另一种是通过在硅电池表面涂抹量子点，使得太阳光谱与硅电池吸收光谱基本一致，二者均是为了减少光损失从而提高 PCE。

本论文的研究工作主要分以下四部分进行研究：

第一部分：查找相关文献。通过查找相关文献了解前人在此方面的研究方法以及结论，并且还要将 NASA 发布的太阳辐射的光谱分布数据进行整理，以便今后模拟计算时使用。

第二部分：将数据导入 MATLAB 软件，得出图像。首先要学习传输矩阵法原理以及基于此原理编写出的软件程序。对得出的图像进行分析讨论，得出不同 AM 下的最佳减反射膜厚度。

第三部分：在硅电池表面涂抹量子点，通过测量硅电池性能参数分析量子点对于光伏电池性能的影响。

第四部分：总结现有实验，对后续实验及应用提出展望。

第二章 太阳能电池模拟与实验所用基础知识

2.1 MATLAB 与 Origin 介绍

在 20 世纪 70 年代，美国新墨西哥大学计算机科学系主任 Cleve Moler 编写了最早的 MATLAB，旨在减轻学生编程的负担。到 20 世纪 90 年代，MATLAB 已成为国际控制界的标准计算软件，用于很多领域。MATLAB 企业 MathWorks 将矩阵和实验室两个词组合在一起成为其名字，它是面向科学计算中自动化设计、数值分析、矩阵计算、科学数据可视化和非线性动态系统的建模和仿真的环境。此外，本课题也使用了 Origin 软件，它是科学绘图和数据分析软件，提供各种 2D/3D 图形和数据分析功能，例如信号处理、曲线拟合和峰值分析，同时支持多种格式数据。

本次课题主要使用 MATLAB 软件，利用传输矩阵法得出不同 AM 下减反射膜厚度的最佳值，并使用模拟结果指导实验操作。而 Origin 软件则提供强大的数据导入功能，能够支持多种格式的数据，并且提供多样化的图形输出格式，包括 JPEG、GIF、EPS、TIFF、bmp 等。

总之，MATLAB 和 Origin 是科学计算和数据分析领域中常用的两种软件，它们为各个科学领域和工程设计提供了全面的解决方案，并取代了传统的非交互式程序设计语言的编辑模式。在本课题中，这两种软件都起到了至关重要的作用，为研究人员提供了有力的支持和指导。

2.2 太阳能电池相关基础知识

2.2.1 太阳能电池简介

目前，利用太阳能电池发电已经成为最常见的新能源发电方式，因此，科研人员一直在探索提高太阳能发电效率的方式。截至目前，太阳能电池主要有三个发展阶段，第一阶段是以硅片为基础，其技术和发展已经成熟，但是单晶硅要求纯度太高，以至于生产成本太高；第二阶段是基于薄膜材料的太阳能电池，其比传统晶硅

电池更具有经济性能；第三阶段即采用更加先进的技术，制造出的染料敏化电池和钙钛矿电池等。

太阳能电池的减反射膜可以增加更多的光吸收,可以增大光电流。同时,减反射膜对硅片还有保护和钝化作用,对提高光伏电池的电性能有很大帮助。在本篇论文中根据不同地区的 AM 值可以得出最佳减反射膜厚度,对于定制光伏电池、空间光伏电池的制备很有意义。

2.2.2 太阳能电池工作原理

太阳能电池是一种半导体器件,其工作原理是半导体 P-N 结的光生伏特效应。光生伏特效应指的是当光照射到 P-N 结表面时,会产生大量电子-空穴对,在 P-N 结附近的载流子被内部电场吸引,电子流入 N 区,空穴流入 P 区,导致 N 区储存了过剩电子, P 区储存了过剩空穴,形成电势差,从而产生电动势。这个电动势可以通过外部电路连接并输出电能。因此,当太阳能电池受到阳光的照射时,会产生大量电子-空穴对,这些电子和空穴受到 P-N 结电场的作用而分别在 N 型区和 P 型区汇集,并通过外部电路形成电流进行功的输出。

常见的太阳能电池材料有硅、锗、铜、镉、镓、硒等。此外,改变 P-N 结的结构和化学成分、添加掺杂剂、采用多层结构等方法也可以提高太阳能电池的效率和稳定性。在 P-N 结两端引出电极然后再接入负载便会有电流流出,这样便把太阳能转化为了电能。如图 1-1 为单晶硅电池结构示意图。

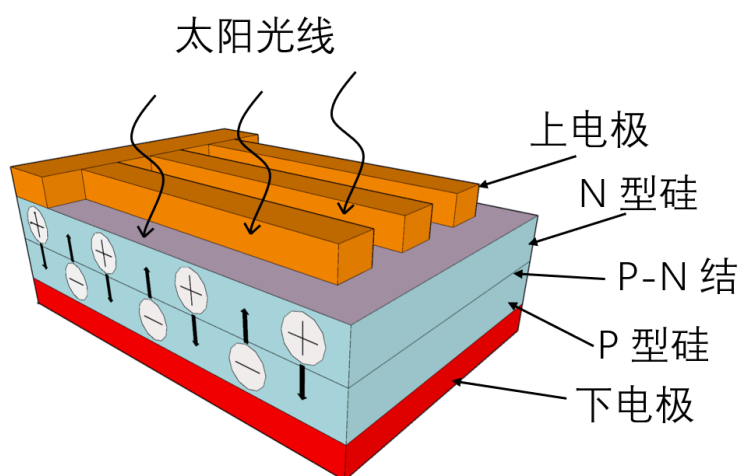


图 1-1 单晶硅电池结构示意图

2.2.3 太阳能电池的电学特性

太阳能电池收到光照时产生的电能与光源辐照度、电池温度和照射光的光谱分布有关，因此在测量太阳电池功率的时候，就要规定测试条件，目前国际上统一规定的太阳电池的标准测试条件是光源辐照度为 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 、测试温度为 25°C 且 AM1.5 的太阳光谱辐照度分布。

对处于光照条件下的太阳能电池测定其端电压和工作电流，将这些数据记录下来并制作成曲线，即可得出图 1-2 太阳能电池伏安特性曲线。通过这条曲线可以看出太阳能电池的最大输出功率，对应的点为最佳工作点。最大输出功率 P_m 与开路电压 U_{oc} 和短路电流 I_{sc} 乘积的比值定义为填充因子，用 FF 表示，如公式(2-1)：

$$FF = \frac{P_m}{U_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (2-1)$$

FF 越接近 1，电池效率越高，伏安特性曲线就越弯曲。

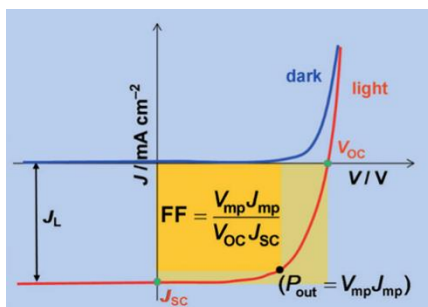


图 1-2 太阳能电池伏安特性曲线

电池的输出电功率 P_m 与入射光功率 P_{in} 的比值定义为 PCE，用 η 表示，其公式为 (1-2)：

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} \cdot 100\% = \frac{FF \cdot U_{oc} \cdot I_{sc}}{P_{in}} \cdot 100\% \quad (2-2)$$

2.3 传输矩阵法基础知识

如今光学薄膜在人们的日常生活中所起的作用日益增长，被应用到了诸多领域，如减反射膜、光学仪器、照明设备、光伏太阳能电池等。而在太阳能电池中会有多层减反射膜存在，因此对于一个多层薄膜来说，光会在薄膜界面来回进行反射和折射，这就不可避免地会发生光的干涉，引入传输矩阵法后就会使得光束干涉就

算变得简单。薄膜光学是物理学中的一个重要分支^[7-8]，主要研究薄膜对光的反射、透射等，即是研究光在分层介质中传播的规律。而传输矩阵法就多被用于多层介质前后电磁场之间的关系，它的实质就是每层薄膜特征矩阵的乘积。具体就是通过麦克斯韦方程组求解其界面上的电场和磁场，将电场和磁场分量组合成线性方程组的形式，通过使用传输矩阵法，在得出单层介质的最优反射膜厚度后，可以进一步得出传输矩阵，将单层结论推广到整个介质。通过这种方法，可以得出多层介质的透射系数和反射系数，从而对多层介质的光学特性做出精确的预测和分析。假设目前有 n 层介质，如图 2-1^[9]所示：

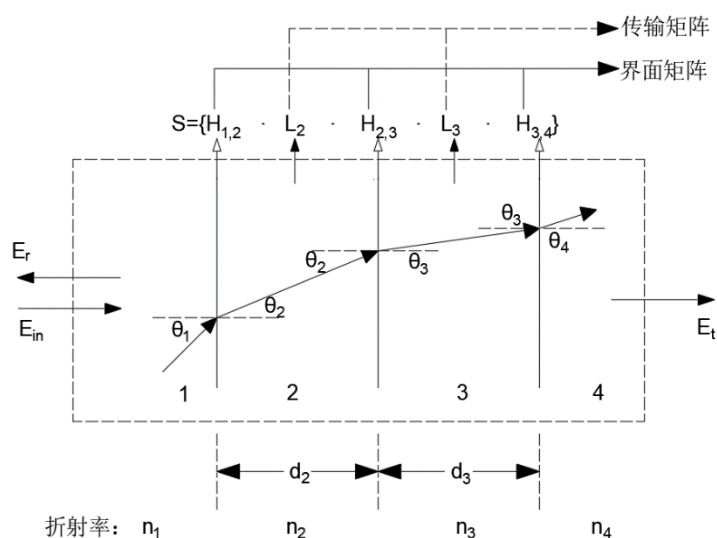


图 2-1 传输矩阵示意图

从第一层介质反射的波 E_r 与入射波 E_{in} 的复振幅的比值即为系统的总反射系数 r ；从第 n 层透射的波 E_t 与入射波 E_{in} 的复振幅的比值即为系统的总透射系数 t ：

$$E_r = r \cdot E_{in} \quad (2-3)$$

$$E_t = t \cdot E_{in} \quad (2-4)$$

对于整个系统而言，入射波场分量振幅和相位与 $(n-2)$ 层介质和 $(n-1)$ 个介质分界面有关，并且对应应有 $(n-2)$ 个传播矩阵 L_2, \dots, L_{n-1} 和 $(n-1)$ 个界面矩阵 $H_{n-1,n}$ 。界面矩阵元由菲涅尔公式：

$$H_{n-1,n} = \frac{1}{t_{n-1,n}} \begin{bmatrix} 1 & r_{n-1,n} \\ r_{n-1,n} & 1 \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

公式中, $r_{n-1,n}$, $t_{n-1,n}$ 为第 (n-1) 和第 n 层分界面上的反射系数和透射系数, 传播矩阵可表示为:

$$\begin{aligned} L_i &= \begin{bmatrix} \exp(-jk_{iz}d_i) & 0 \\ 0 & \exp(jk_{iz}d_i) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \exp(-jk_i d_i \cos \theta_i) & 0 \\ 0 & \exp(jk_i d_i \cos \theta_i) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2-6)$$

由 n 个介质组成的系统, 总的传输矩阵为:

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

根据总的传输矩阵 S , 总的反射系数 r 和透射系数 t 为:

$$r = \frac{S_{12}}{S_{22}} \quad t = \frac{1}{S_{22}} \quad (2-8)$$

2.4 AM 基础知识

大气层的密度和压强会使太阳光线产生折射、散射等现象, 影响其在大气中的传播。因此, 为进一步研究太阳光在大气中的传播和反射特性, 科学家们引入了 AM 这一概念。在 1 个标准大气压和 0°C 时, 海平面上太阳光线垂直入射时的路径被定义为 $AM=1$, 因此 AM 可以用于表示太阳光线穿过大气层时的路径长度和大气密度的综合影响。AM 越大, 太阳光线经过的路径长度就越长, 受到的阻滞和散射就越强, 因此其能量损失就更大。在实际应用中, AM 常常被用于表达太阳能电池板的性能指标和太阳光照度等重要参数。太阳在其他位置时, AM 都大于 1。地面光伏应用中统一规定 AM 为 1.5, 通常写成 AM1.5。而对于太阳光照射到地球大气以外的情况, 一般写成 AM0。

如图 2-2 为地平坐标系, 地面上的 AM 计算公式如式 (2-7) 为:

$$AM = \sec \theta_z = \frac{1}{\sin \alpha} \quad 0^\circ < \alpha < 90^\circ \quad (2-9)$$

θ_z 为太阳光线 OP 与地平面法线 QP 之间的夹角, 即天顶角。

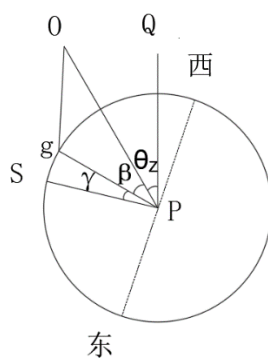


图 2-2 地平坐标系

2.5 光吸收特性基础知识

当光照射到光伏电池上时，会出现三种可能的情况：吸收、反射和透射。当太阳光照射到光伏电池表面时，光子能量可能被光伏电池吸收，也有可能被反射，或是透过光伏电池形成透射。如果原始入射光强度为 I_0 ，发生反射的光的强度为 I_R ；被吸收而转化为电能的光的强度为 I_A ；剩余的光强将透过光伏电池而不被吸收或反射，该部分光的强度为 I_T 。此时有：

$$I_0 = I_R + I_A + I_T \quad (2-10)$$

反射光强、吸收光强、和透射光强与入射光强的比值称为反射率、吸收率和透射率，分别用 R 、 A 和 T 表示：

$$1 = R + A + T \quad (2-11)$$

一般认为光伏电池是不透光的，因此式 (2-9) 可简化为：

$$1 = R + A \quad (2-12)$$

第三章 不同 AM 下硅电池光吸收特性的模拟研究

3.1 实验方案设计

本次模拟实验主要是为了探究出太阳能硅电池在不同 AM 下的最佳减反射膜厚度，从而指导太阳能电池在实际生产过程中制作出最佳的减反射膜厚度^[14-16]，进而增加吸收光谱，提高 PCE。此次研究采用模拟加实验的方法来进行，大致分为三个阶段，首先是实验准备阶段，完成对相关文献的阅读，并且将实验所需要用到的光谱数据进行汇总整理，最后导入到 MATLAB 软件中。第二个阶段是模拟阶段，在这个阶段需要利用 MATLAB 软件得出不同 AM 下吸收光谱最大对应的最佳减反射膜厚图像。第三个阶段是进行实验操作。将模拟得出的 AM 为 0 时对应的最佳减反射膜厚度应用于太阳能电池中，然后对该电池进行电学性能测试，检测其 PCE 是否有所增大，进而判断其吸收光谱。

3.2 模拟实验

3.2.1 分析 MATLAB 软件程序

本次模拟实验是借鉴前人的实验程序，在该程序中进行了必要参数的赋值，例如：真空介电常数、普朗克常数和光速等，之后通过调用导入 MATLAB 软件中的数据以及使用传输矩阵法，最终可得出不同 AM 下的最佳减反射膜厚度和不同减反射膜厚度下光谱吸收率与波长之间的关系图。

3.2.2 进行模拟实验

硅电池及其上的 SiN_x 薄膜可以近似地看作是平面介质结构。硅电池具体示意图如图 3-1 所示：

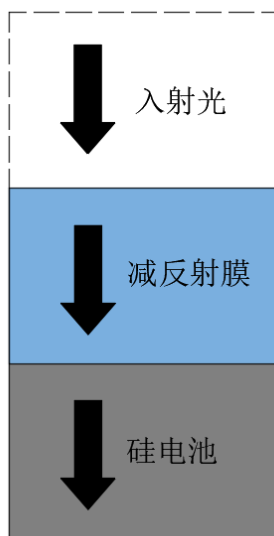


图 3-1 硅电池结构示意图

在现有数据^[12]中选取其中波长为 0.36 到 1.2 μm 的太阳光导入 Origin，可以得到标准太阳光谱辐照度分布曲线，如图 3-2 所示：

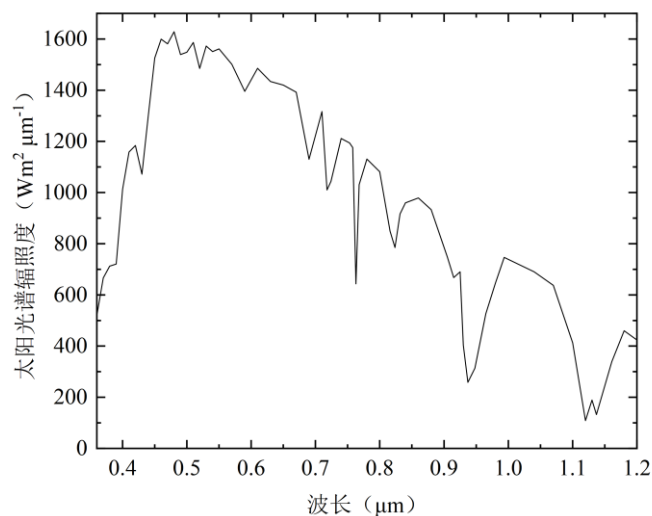


图 3-2 标准太阳光谱辐照度分布曲线

观察标准太阳光谱辐照度分布曲线图可以发现，太阳光谱辐照度在太阳光波长为 0.48 μm 处达到最大值 1628.3 $\text{Wm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ ，波长大于该值时虽然太阳光谱辐照度仍存在上下波动现象，但整体上还是呈现出下降的趋势。

把光谱数据导入到 Origin 软件中，可得到不同 AM 下光谱辐照度图像曲线，如图 3-3、图 3-4、图 3-5 和图 3-6 所示：

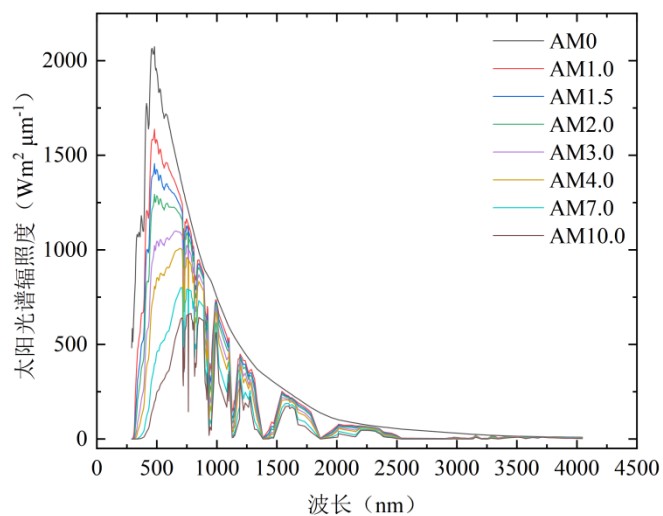


图 3-3 不同 AM 下太阳光谱辐照度 ($\alpha=1.3 \beta=0.02$)

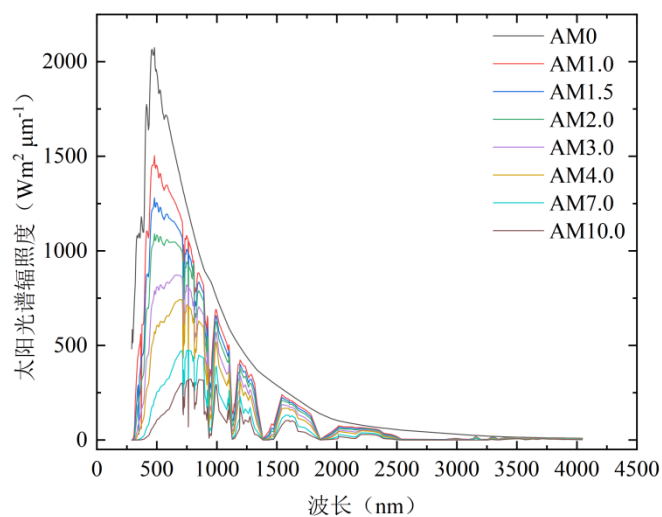


图 3-4 不同 AM 下太阳光谱辐照度 ($\alpha=1.3 \beta=0.04$)

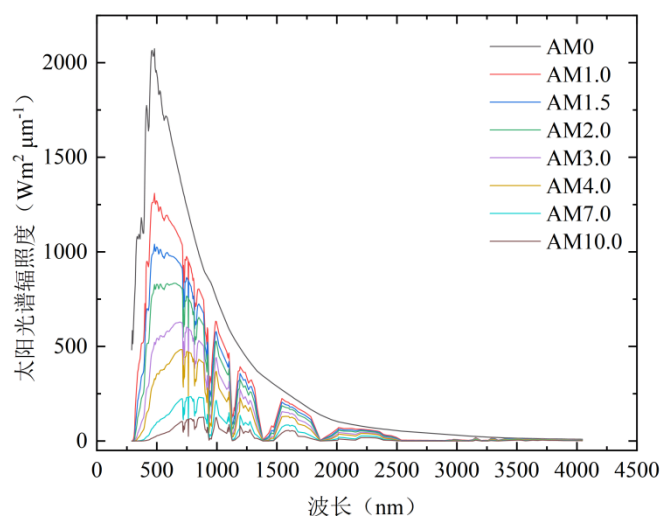
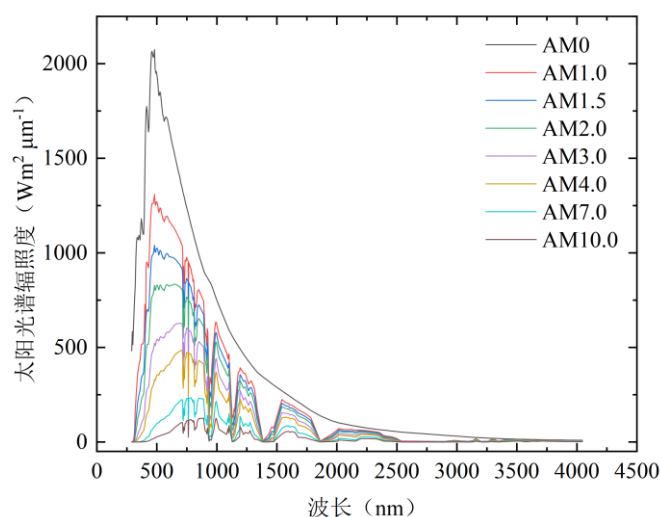
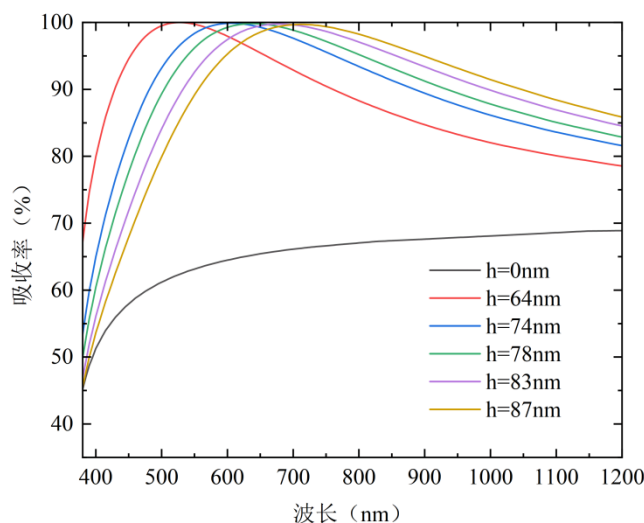
图 3-5 不同 AM 下太阳光谱辐照度 ($\alpha=0.66$ $\beta=0.085$)图 3-6 不同 AM 下太阳光谱辐照度 ($\alpha=0.66$ $\beta=0.17$)

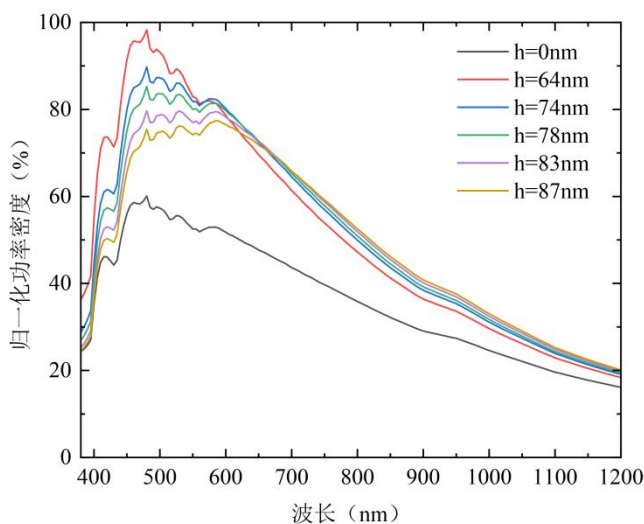
图 3-3、图 3-4、图 3-5 和图 3-6 中 α 和 β 表示大气浊度指数。其中， α 是与气溶胶大小有关的波长指数， β 表示埃浊度系数；当 $0.01 < \beta < 0.02$ 时，为一般大气情况，当 $\beta > 0.02$ 时，为浑浊大气情况，分别对比图 3-3、图 3-4、图 3-5 和图 3-6 中相同的 AM 值可知随着埃浊度系数的增加，太阳光谱辐照度呈现出下降的趋势。

在 MATLAB 软件程序中分别将减反射膜厚度定义为 0nm、74nm、78nm、83nm 和 87nm 最终可以得到波长与吸收率之间的关系曲线，如图 3-7^[10-11]所示：

图 3-7 SiN_x 膜厚不同的太阳能电池吸收率和波长关系图

通过观察此图可以发现减反射膜的存在使得太阳能光伏电池在各个波段上的光吸收率大大提高，并且随着减反射膜厚度的增加吸收率最高所对应的波长也随之增加。对于未镀膜的太阳能电池来说，其在 380nm 处的吸收率约为 45%，而在 800nm 处也才达到约 67%，可见大部分照射到太阳能电池表面的太阳光被反射了。

在图 3-7 的基础上对 AM0 做归一化处理以后，可以将上述太阳能电池吸收率和波长关系转化为波长与归一化后功率密度关系图：

图 3-8 SiN_x 膜厚不同的归一化功率密度和波长关系图

观察图 3-8 可以发现选用 SiN_x 膜厚为 64nm 的太阳能电池在 380-1200nm 波段的功率密度最大，且在 480nm 处达到最大值 98.3%性能最好，并且随着 SiN_x 减反射膜厚度的增加，太阳能电池的功率密度呈现下降的趋势。

将太阳光谱辐照度用 F 表示，则 $F(\lambda)$ 表示不同波长处的太阳光谱辐照度，将硅电池的吸收率用 A 表示，则 $A(\lambda)$ 表示不同波长处的硅电池吸收率。用 I 表示硅电池获得的功率密度，则 $I(\lambda)$ 表示不同波长处的硅电池获得的功率密度，如式 (3-1)：

$$I(\lambda) = F(\lambda) \cdot A(\lambda) \quad (3-1)$$

将每一个波长处的功率密度叠加汇总则可得出硅电池吸收的总的功率密度，而总功率密度最高所对应的减反射膜厚度即为该 AM 下的最佳减反射膜厚度。用 $\sum_{\lambda=380}^{\lambda=1200} I_S(\lambda)$ 表示太阳能从 380-1200nm 的总的太阳光谱辐照度， $A(\lambda, h)$ 表示硅电池在某一减反射膜厚度某一波长处的吸收率， $I(h)$ 表示硅电池在某一减反射膜厚度某一波长处所获得功率密度，如式 (3-2)：

$$I(h) = \sum_{\lambda=380}^{\lambda=1200} I_S(\lambda) \cdot A(\lambda, h) \quad (3-2)$$

由式 (3-1) 和式 (3-2) 和图 3-3 等可以得到在一定的 AM 下，不同减反射膜厚度对应的功率密度，如图 3-9 和图 3-10 所示：

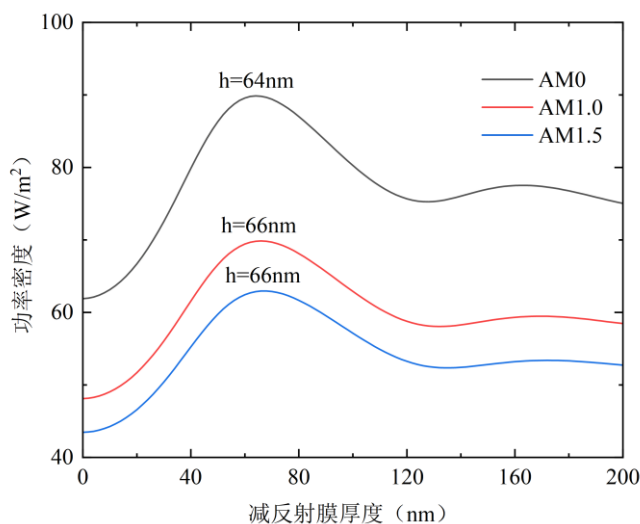


图 3-9 AM 不同 SiN_x 层膜厚与功率密度变化曲线 ($\alpha=1.3$ $\beta=0.02$)

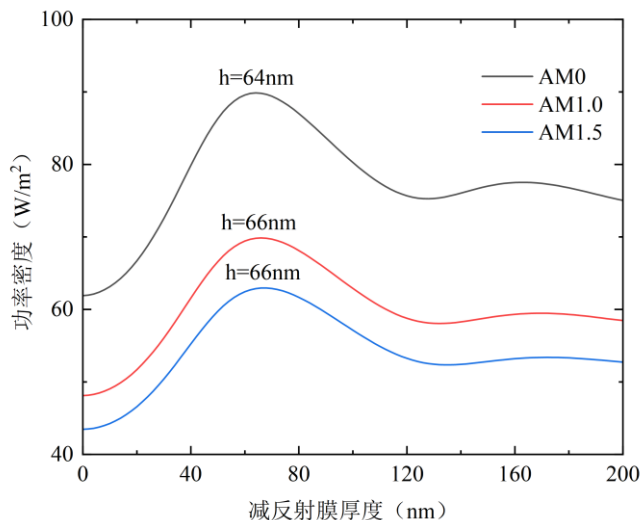


图 3-10 AM 不同 SiN_x 层膜厚与功率密度变化曲线 ($\alpha=1.3 \beta=0.04$)

对比图 3-9 和图 3-10, 可以发现埃浊度系数变化较小时, 减反射膜厚度对太阳能电池光吸收的影响不大, 且从这两幅图可以推断在太空中 (AM=0), 当 SiN_x 层厚度为 64nm 时, 两层 SiN_x/Si 太阳能功率密度最大, AM 为 1.0 时最佳膜厚度为 66nm, AM 为 1.5 时最佳膜厚度为 66nm。

上述膜厚与功率密度等都是在 SiN_x 折射率为 2.05 的情况下设计的, 当固定 AM 改变 SiN_x 的折射率又可以得出不同 SiN_x 折射率所对应的最佳减反射膜厚度, 图 3-11、3-12 和 3-13 分别展示了 AM 分别为 0、1.0 和 1.5 下 SiN_x 折射率和功率密度之间的关系, 从图中也可以清晰地看出不同 SiN_x 折射率的最佳减反射膜厚度。

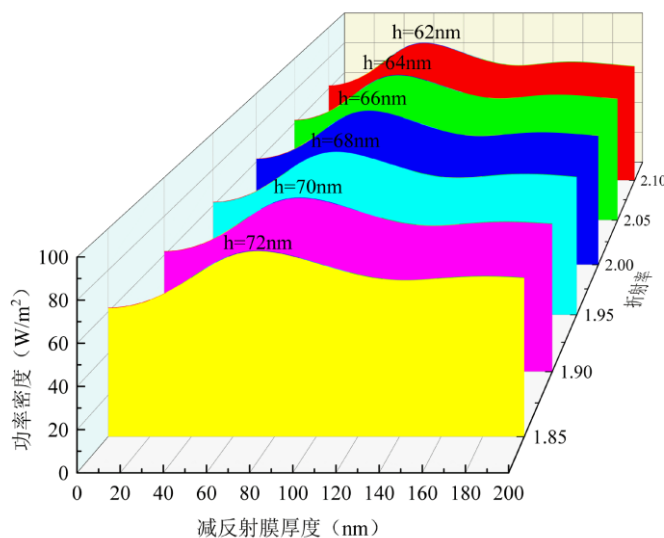


图 3-11 AM0 时不同 SiN_x 折射率对应最佳减反射膜厚

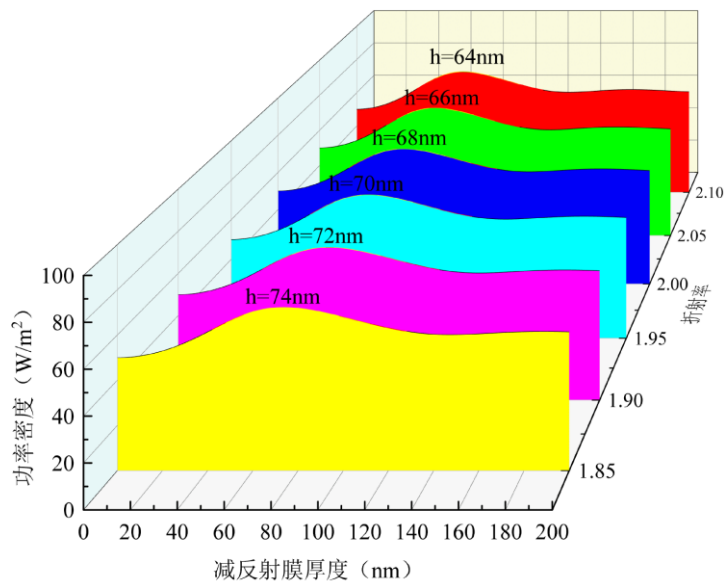


图 3-12 AM1 时不同 SiN_x 折射率对应最佳减反射膜厚

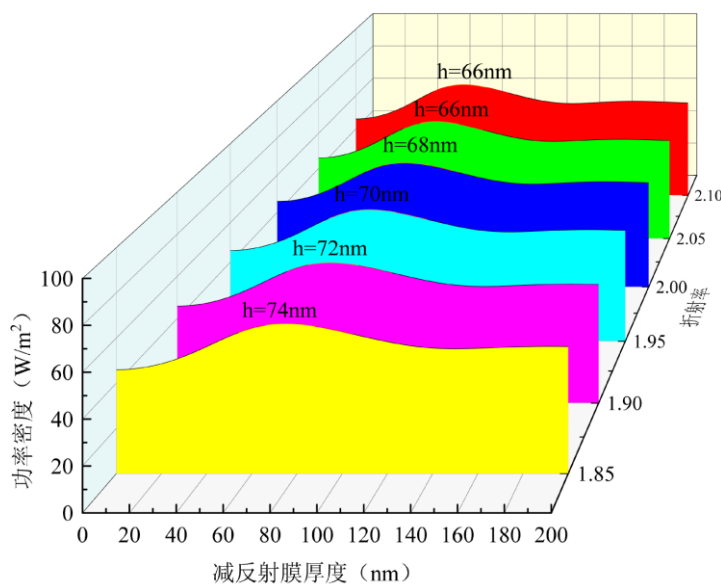


图 3-13 AM1.5 时不同 SiN_x 折射率对应最佳减反射膜厚

通过观察图 3-11、图 3-12 和图 3-13 可以看出在 AM 值相同时，不同 SiN_x 折射率对应一个最佳减反射膜厚度，并随着 SiN_x 折射率增大，最佳减反射膜厚度逐渐减小。经过分析，若将该太阳能电池运用在太空中，可得当 SiN_x 的折射率为 2.0，膜厚为 66nm 时，太阳能电池可获得最大功率密度归一化后的值 89.865w/m²，SiN_x 的折射率为 2.05，膜厚为 64nm 时，太阳能电池可获得最大功率密度归一化后的值 89.863w/m²，因此通过分析可知 SiN_x 的折射率对能量密度的影响很小。

第四章 量子点下转换硅电池光吸收特性实验研究

4.1 量子点简介

根据图 3-2 可以发现太阳能电池在 450-700nm 处太阳光谱辐照度较高, 再根据图 3-8 可以得出, 太阳能电池对于波长位于 450-650nm 之间的太阳光的吸收率较高, 而在低于 450nm 处的吸收率不高, 为了能够尽可能地提高太阳能利用效率, 本次实验条件采用在太阳能电池片表面涂抹量子点, 量子点可以将波长位于 300-350nm 之间的光吸收而发射出 600-700nm 的光, 正好弥补太阳能电池的在低波长处吸收效率低的缺陷, 进而提高太阳能电池的 PCE。

本次实验采用 CdSe 量子点, 在 CdSe 量子点的吸收光谱中, 可以看到有强烈的紫光吸收峰, 还有一个稍微弱一些的黄绿光吸收峰, 可以将 300-500nm 之间的光吸收, 通过调整量子点尺径可以发射出发射峰为 628nm 的红光。其大致吸收和发射光谱如图 4-1^[17]:

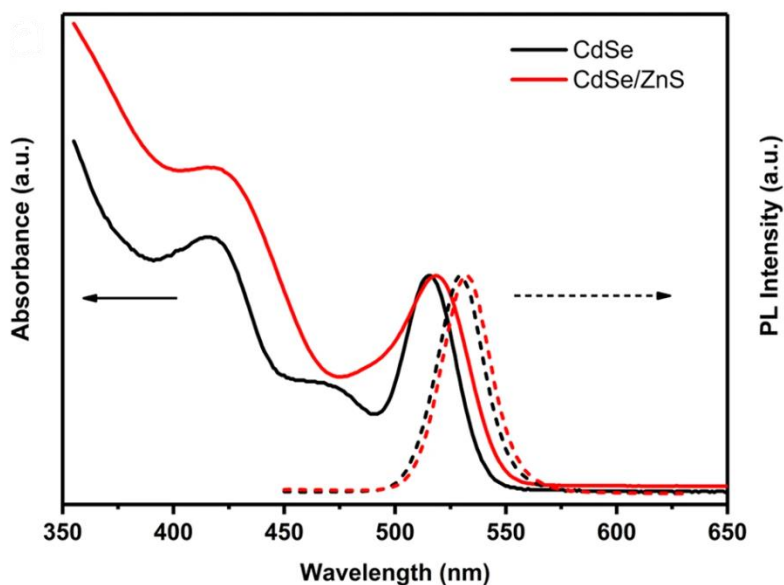


图 4-1 CdSe 吸收和发射光谱

4.2 实验方案设计

首先图 4-2 为涂敷量子点后的硅电池结构示意图：

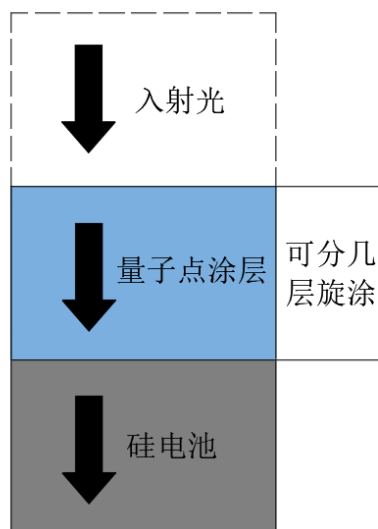


图 4-2 涂敷量子点后的硅电池结构示意图

由于实验条件的限制，本次实验将量子点镀层数分为一层、二层、三层和不镀层，每种镀层情况均采用三片电池片作为比较。

本次实验分别在天津爱旭太阳能科技有限公司和中电科十八所测试 AM1.5 和 AM0 下的电池片电学性能参数，旨在研究电池片中量子点的镀层数对电池性能的影响。在实验中，对每种镀层情况下的电池片均进行了参数测量，并将每种镀层情况下的电池片分别放置在 AM1.5 和 AM0 的特定光源下照射，再次测量了它们的电学性能，以确保实验的可靠性和有效性。通过实验的数据分析和处理，我们将能够确定量子点镀层对电池性能的影响程度，以及不同光源下电池性能的差异。同时，我们也能够深入了解量子点对电池性能的改善机制，从而提出更加有效的优化方案和改进措施。

4.3 测量不同量子点层数的太阳能电池电学性能

将准备好的十块电池编号，并在 AM1.5 的光源下测量电池片的开路电压、短路电流、FF 等电学性能参数，用以确保实验使用的电池片正常，并且可以与后续实验参数进行对比。实验前测量的数据如表 4-1 所示：

表 4-1 AM1.5 下太阳能电池性能参数表

序号	开路电压 (V)	短路电流 (mA)	FF (%)	输出功率 (mW)	PCE (%)
1	0.698091	14.01345	80.80336	790.47207	23.73435
2	0.697634	13.9704	81.11398	790.55512	23.73683
3	0.697936	14.0082	80.86487	790.60185	23.73822
4	0.69798	13.99432	81.10692	792.23256	23.78721
5	0.696685	13.99384	81.0361	790.04512	23.72151
6	0.697794	14.00463	80.90949	790.67559	23.74044
7	0.701866	14.02129	80.20253	789.27845	23.6985
8	0.695883	13.96228	81.35264	790.43147	23.73313
9	0.696803	13.99875	80.9761	789.87092	23.71629
10	0.697559	13.96477	81.10983	790.11121	23.72349
平均值	0.697823	13.99319	80.94758	790.434487	23.733

将电池片分别镀上不同量子点层数并放置在 AM=1.5 的特定光源下, 得出其开路电压、短路电流、FF 等电学性能参数。如表 4-2~表 4-4 所示:

表 4-2 AM1.5 下一层量子点太阳能电池性能参数表

序号	开路电压 (V)	短路电流 (mA)	FF (%)	输出功率 (mW)	PCE (%)
1	0.695443	13.91227	80.70506	780.83685	23.44505233
2	0.696563	13.95896	80.85746	786.20094	23.60609009
3	0.697719	13.97373	80.93248	789.07039	23.69223607
4	0.695767	13.58871	80.49083	761.00667	22.84962725
平均值	0.696373	13.85842	80.74646	779.25417	23.39825144

表 4-3 AM1.5 下二层量子点太阳能电池性能参数表

序号	开路电压 (V)	短路电流 (mA)	FF (%)	输出功率 (mW)	PCE (%)
1	0.693911	13.76468	80.92015	772.90581	23.20689941
2	0.695501	13.86796	81.01138	781.36935	23.46102075
3	0.696327	13.79972	81.11863	779.47846	23.40425999
平均值	0.695246	13.81079	81.01672	777.91416	23.35739338

表 4-4 AM1.5 下三层量子点太阳能电池性能参数表

序号	开路电压 (V)	短路电流 (mA)	FF (%)	输出功率 (mW)	PCE (%)
1	0.700685	13.74687	80.18437	772.35394	23.1903305
2	0.696752	13.7474	81.09232	776.74509	23.32218894
3	0.697764	13.82205	80.89658	780.20940	23.42619562
平均值	0.6984	13.77211	80.72442	776.44312	23.31290502

将表 4-1 至表 4-4 各自平均值显示在柱状图 4-3 至图 4-7 中：

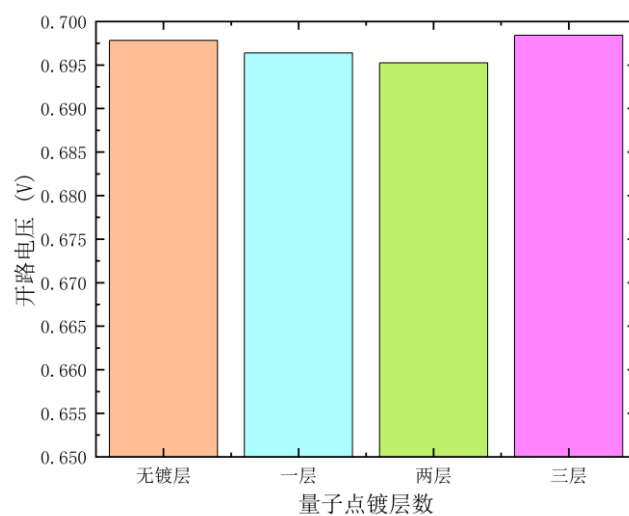


图 4-3 开路电压对比图

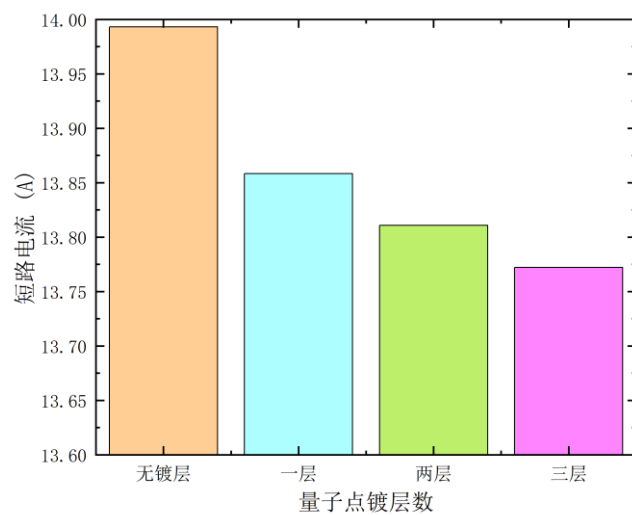


图 4-4 短路电流对比图

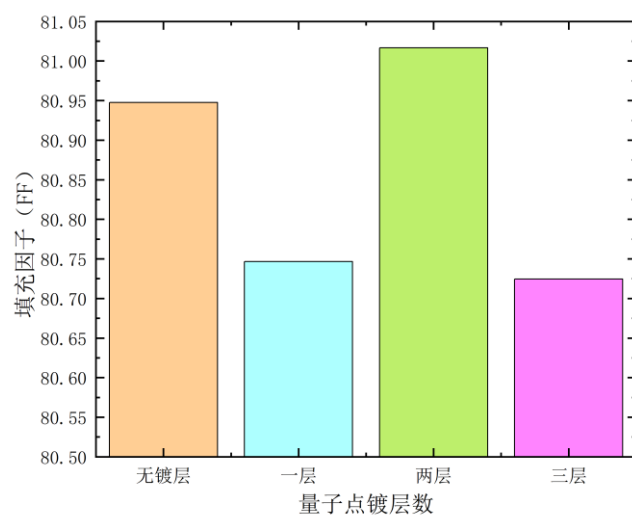


图 4-5 FF 对比图

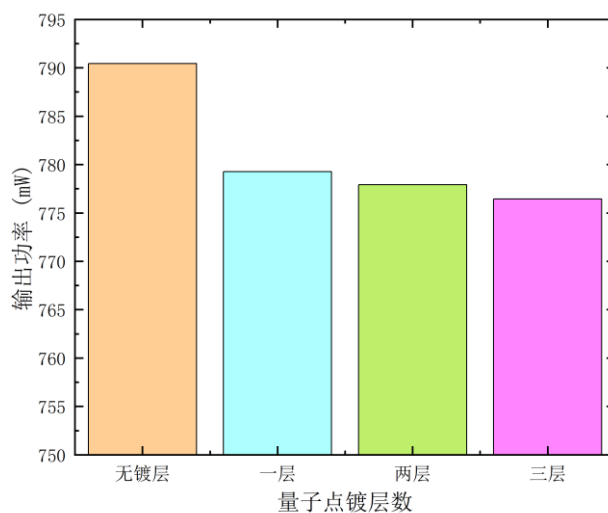


图 4-6 输出功率对比图

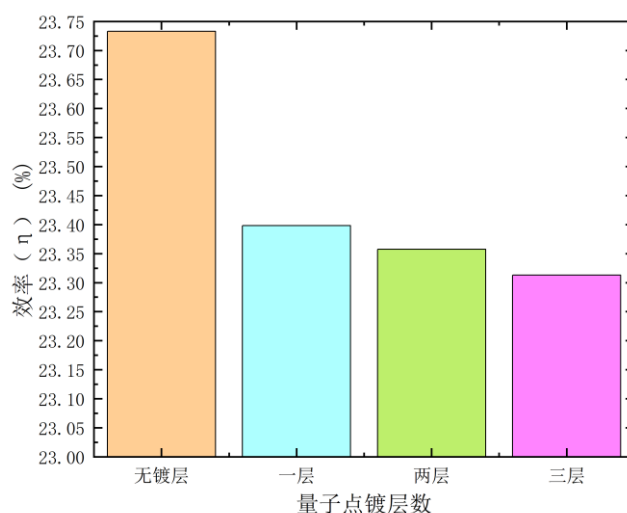


图 4-7 PCE 对比图

虽然量子点可以吸收 300-350nm 之间的光吸收而发射出 600-700nm 的光，理论上可以增大电池片的电学性能参数，但是通过图 4-3~图 4-7 可以发现，随着量子点的加入，除了开路电压基本保持不变以外，电池片的短路电流、输出功率均有所下降，其中 PCE 下降约 1% 左右。而从 FF 的角度来看，旋涂两层量子点后有所提高，这反映出电池的性能确实有所提升。而对比旋涂一层量子点后 4 号电池片与其他旋涂一层量子点电池片的参数可知电学性能参数均有所上升。这是由于 4 号电池片在旋涂量子点时由于操作不规范和不迅速，造成在量子点结膜之前没能将

其旋涂均匀，存在多次旋涂现象。而在改进操作方法之后就有效避免了这一现象的发生。造成此现象的原因是由于量子点的旋涂方式为手涂，旋涂时的力度、均匀度等参数不能很好地控制，使得电池片表面有所划伤。另外就是量子点的浓度较高，当量子点滴于电池片表面时，会在电池片表面留下圆形的痕迹，使得量子点旋涂不均匀。后续应采用匀胶机并控制参数来优化旋涂过程。

本研究目前缺乏 AM0 的实验数据，后续会改进量子点旋涂方式，并在 AM0 的光源下继续完成实验。AM0 实验的意义主要是在其太阳光谱辐照度分布在紫外区间有一个较强的辐照区域，可以更好地实现量子的下转换激发，从而改善硅电池性能。这可以进一步分析量子点下转换机制在空间光伏电池领域中的应用价值，为我国未来在太空中逐步建立大型光伏电站提供实验依据。

第五章 结论与展望

在此次实验中，通过《光伏器件 第 3 部分：地面用光伏器件的测量原理及标准光谱辐照度数据》，选取其中波长为 0.36 到 1.2 μm 的太阳光，得出太阳光谱辐照度在太阳光波长为 0.48 μm 处达到最大值 1628.3 $\text{Wm}^2 \mu\text{m}^{-1}$ ，通过 MATLAB 软件程序以及 NASA 数据得出了太阳能电池在 AM 分别为 0、1 和 1.5 下的最佳减反射膜厚度分别为 64nm、66nm 和 66nm。

在同一 AM 下， SiN_x 折射率相同时，通过改变 SiN_x 减反射膜厚度进而观察功率密度，得到 AM 为 0 减反射膜厚度为 64nm 时功率密度最大。此外固定 AM，改变 SiN_x 的折射率得到不同折射率对应的最佳减反射膜厚度。当 SiN_x 的折射率为 2.0，膜厚为 66nm 时，太阳能电池可获得最大功率密度归一化后的值 89.865 w/m^2 ， SiN_x 的折射率为 2.05，膜厚为 64nm 时，太阳能电池可获得最大功率密度归一化后的值 89.863 w/m^2 ，因此通过分析可知 SiN_x 的折射率对能量密度的影响很小。

前期研究生的实验结果表明通过在硅电池表面涂抹量子点可以提高硅电池 PCE，但本实验所测电池片 PCE 下降约 1% 左右。经分析原因为量子点的涂抹方式为手涂，涂抹时的力度、均匀度等参数不能很好地控制，使得电池片表面有所划伤。第二式量子点的浓度较高，会在电池片表面留下圆形的痕迹，使得量子点涂抹不均匀。另外本研究目前缺乏 AM0 的实验数据，后续会改进量子点涂抹方式，且在 AM0 的光源下继续完成实验。完成在 AM0 光源下的实验后，可以具体研究涂抹量子点后是否可以提高空间电池 PCE，提高效果如何。并且可以与 AM1.5 的情况进行对比，确定量子点运用在空间光伏电池中是否比运用在地表效果好。

希望本研究可以为晶体硅太阳能电池今后的发展提供依据和支撑，可以在光伏产业日益发展的今天，在光伏电站大面积应用的未来，为定制化光伏电站的出现提供理论依据和实验案例。为我国未来加速发展空间光伏电站提供指导意见。

参考文献

- [1] 王进福, 张国富, 王芳, 等. 晶体硅太阳能电池 ZnS/MgF₂ 减反射膜的设计与分析[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2022, 42(02): 14-17.
- [2] 马新尖. 三层 SiN_x-SiN_x-SiO₂ 减反射膜对多晶硅太阳能电池性能的影响[J]. 人工晶体学报, 2020, 49(03): 521-525.
- [3] 邹凯, 和江变, 李健, 等. 物理冶金多晶硅太阳能电池叠层钝化减反射结构模拟[J]. 电子元件与材料, 2015, 34(06): 28-32.
- [4] 王安祥, 张晓军, 李继军. 色散效应对钝化硅太阳能电池减反射膜系设计的影响[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(06): 202-209.
- [5] 杨文华, 李红波, 吴鼎祥. 太阳能电池减反射膜设计与分析[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2004(01): 39-42.
- [6] 杨文华, 吴鼎祥, 李红波. 空间高效硅太阳能电池减反射膜设计与数值分析[J]. 半导体学报, 2004(09): 1118-1122.
- [7] 李祥. 基于传输矩阵法的有机太阳能电池光学性能分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [8] 张小翠. 一种基于传输矩阵模型确定薄膜光学常数的方法[J]. 电脑知识与技术, 2018, 14(03): 216-218.
- [9] 王辉, 朱浩, 樊代和, 等. 传输矩阵法在大学物理波动光学教学中的应用[J]. 物理与工程, 2019, 29(05): 118-122.
- [10] 陈子坚. 多晶硅光伏电池和组件表面色差及光吸收特性的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022.
- [11] Chen ZJ, Ma ZH, Jia HY, et al. Simulation and analysis of polycrystalline silicon photovoltaic cells surface color differences based on transfer matrix method[J]. Optoelectronics Letters, 2021, 17(12): 0734-0740.
- [12] Photovoltaic devices - Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data: IEC 60904-3:2019 [S/OL]. [2019-02-15]. <http://webstore.iec.ch/publi-cation/64682#additionalinfo>

- [13] 王鑫, 卢刚, 康海涛, 等. 晶硅太阳能电池多层减反射膜设计与分析[J]. 电源技术, 2019, 43(03): 483-485.
- [14] 吕欣, 崇锋, 郭灵山, 等. 基于 MATLAB 软件 $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2$ 叠层减反射膜厚度优化的研究[J]. 太阳能, 2016(02): 22-25+48.
- [15] 王永东, 崔容强, 徐秀琴. 太阳能电池减反射膜系统的研究[J]. 太阳能学报, 2001(03): 317-321.
- [16] Shah DK, KC D, Umar A, et al. Influence of Efficient Thickness of Antireflection Coating Layer of HfO_2 for Crystalline Silicon Solar Cell[J]. Inorganics, 2022, 10(10). 171.
- [17] Hao JJ, Liu HC, Miao J, et al. A facile route to synthesize CdSe/ZnS thick-shell quantum dots with precisely controlled green emission properties: towards QDs based LED applications[J]. Scientific Reports, 2019, (09): 12048-12055.

致 谢

时光荏苒，岁月如梭。四年的大学生涯已然接近尾声，回首过去的四年，心中充满了感激与不舍，在此我真心感谢陪我度过大学四年的老师、同学、朋友。

首先我要感谢我的父母，感谢他们的养育之恩。我的父母是我最亲密的伙伴和最坚实的后盾，他们给予了我无私的关爱和无尽的支持。他们对我的鼓励和支持，才让我有信心面对人生的挑战和困境，让我在学业和生活中得以顺利前行。同样要感谢各位老师的悉心教导，让我学到了基础的专业知识技能，特别是我的论文指导老师——陈子坚老师，陈老师的教诲使我得到深厚的启示，他不局限于一成不变的思维框架，富有创新精神，开阔了我的视野。他以循循善诱的教导方式，通过灵活多样的方法，让我的思维得到了充分发挥，并且开拓新的知识领域。还要感谢仲晏华和裴柳师兄帮我开拓研究思路，指导我完成实验以及论文的写作，以及天津爱旭太阳能科技有限公司杨二存经理对我实验的大力支持。

在大学四年的时光里，除了老师，我最亲密的伙伴莫过于我的同学们。正是在和同学们一起学习、生活的过程中，我与同学们结下了深厚的情谊。四年间，我们互相鼓励、互相支持，一起度过了诸多难忘的时刻。这些体验和回忆将随着时间的推移成为我宝贵的人生财富。

毕业论文到此也就要结束了，最后祝愿父母、老师身体健康，工作顺利；愿 19 能动五班的同学们前程似锦，事业有成！