

SiO₂微孔薄膜耦合ZnO纳米棒的FDTD模拟研究

何家伟, 周艺琳, 张祥瑞, 皮高旭

天津工业大学物理科学与技术学院, 天津

收稿日期: 2025年1月24日; 录用日期: 2025年2月28日; 发布日期: 2025年3月10日

摘要

为了应对能源枯竭和环境污染这一关乎人类生存的重要问题, 太阳能电池是利用太阳能这一低廉并且对环境友好的清洁能源的有效手段。但是光伏器件易受灰尘、粉尘等固体微颗粒污染物的影响, 从而大大减少光电转化效率, 因此在光伏器件表面引入超疏水自清洁薄膜则成为一种潜在有效的清洁手段。基于前人研究并参考“荷叶表面微观结构”, 提出了一种具有高透光的SiO₂微孔膜耦合ZnO纳米棒的分级自清洁结构, 通过FDTD方法对设计的薄膜结构进行相应的数值模拟, 得到了三组透过率、反射率和吸收率等数据曲线, 以及膜结构内部不同截面的电场分布。从模拟结果来看, 该膜结构在微纳分级复合结构保证超疏水性的同时, 具有优异的光学性能和极强的推广可行性。

关键词

自清洁, 超疏水, 微纳复合, FDTD, 仿真

The Simulation Study of SiO₂ Mesoporous Films Coupled with ZnO Nanorods Using the FDTD Method

Jiawei He, Yilin Zhou, Xiangrui Zhang, Gaoxu Pi

School of Physical Science and Technology, Tiangong University, Tianjin

Received: Jan. 24th, 2025; accepted: Feb. 28th, 2025; published: Mar. 10th, 2025

Abstract

To address the critical issue of energy depletion and environmental pollution that threatens human

survival, solar cells represent an effective means of harnessing solar energy, a low-cost and environmentally friendly clean energy source. However, photovoltaic devices are susceptible to the influence of solid particulate pollutants such as dust and powder, which can significantly reduce their photoelectric conversion efficiency. Therefore, introducing a superhydrophobic self-cleaning film on the surface of solar panels has become a potentially effective cleaning solution. Based on previous research and inspired by the microstructure of lotus leaf surfaces, we propose a hierarchical self-cleaning structure composed of a highly transparent silica microporous film coupled with zinc oxide nanorods. The designed film structure was numerically simulated using the FDTD method, yielding three sets of data curves for transmittance, reflectance, and absorptance, as well as the electric field distribution at different cross-sections within the film structure. The simulation results indicate that the film structure maintains super-hydrophobicity through its micro-nano hierarchical composite structure while exhibiting excellent optical properties and strong feasibility for widespread application.

Keywords

Self-Cleaning, Super-Hydrophobicity, Micro-Nano Composite, Finite-Difference Time-Domain (FDTD), Simulation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

Kane Yee 在 1966 年首次提出时域有限差分(FDTD)算法, 也被称为 Yee 网络空间离散方式, 它的主要内容是通过建立时间离散的递进序列, 在时间和空间为坐标构建的网格空间中交替计算磁场及电场, 从而把麦克斯韦旋度方程转变成有限差分方程式, 进而对电磁场直接时域进行求解[1]。FDTD 方法具有非常显著的优点, 不仅可以直接对场的分布进行模拟, 还可以同时保证模拟结果具有较高的精度, 是目前使用较为广泛的数值模拟方法之一[2]。

随着近几十年来计算机硬件和软件技术的高速发展, 基于 FDTD 算法的商业软件和开源软件层出不穷[3]。每个软件都各有其优势和劣势。根据实际情况, 本文计算使用的是加拿大 Lumerical 公司出品的商业软件 FDTD Solutions。该款软件使用多参数拟合合法拟合出不同材料在可见光和红外波段内的色散曲线, 使计算更精确[4]。另外, 软件人机界面友好, 操作简便。

近年来, 随着地球非可再生能源的过度开发以及环境污染程度的不断加深, 世界各国都开始不断地调整和更新能源产业结构。为了应对能源枯竭和环境污染这一关乎人类生存的重要问题, 一个亟待解决的问题是如何获得低廉并且对环境友好的清洁能源。开发太阳能是实现这一目标的有效手段[5]。地球表面接受的光辐射能量为 1.2×10^{17} W, 而目前世界的所有能源总产能仅为 1.4×10^{13} W。太阳能电池则被广泛认为是利用太阳能最有效的手段之一[6]。

由于光伏组件占地面积较大且对日照条件要求苛刻, 越来越多的太阳能发电站选择安装在人烟稀少但是自然环境较为恶劣的多尘地区, 比如荒凉的戈壁和沙漠地带。这些地方有着极其丰富的太阳能资源, 同时由于那里的土地很难用作其他的用途, 太阳能电站的安装无疑也极大地提高了土地利用效率。然而, 光伏电池组件所处的自然环境中广泛存在着灰尘、粉尘等固体微颗粒污染物, 容易被太阳能面板表面所吸附, 对光伏发电系统的转换效率和使用寿命产生着严重影响[7]。污染物的长期附着不但清洁困难, 还

有可能引起热斑效应, 损坏光伏组件, 进而降低电池的使用寿命。因此, 在太阳能板表面引入超疏水自清洁薄膜则成为一种潜在有效的清洁手段。

2024年, 张惠[8]等人参考天然荷叶表面, 利用聚二甲基硅氧烷(PDMS)弹性体作为软模板, 结合紫外光固化技术制备出具有微乳凸结构的超疏水表面, 其表面静态水接触角达到了 150° 。2015年, Fang [9]等人研究了蝶翼表面的微观结构、润湿性, 并在Cassie方程的基础上, 建立了蝶翼表面疏水性的微纳结构模型。2020年, 张德虎[10]等采用溶胶凝胶法, 通过控制四乙氧基硅烷与聚丙二醇的混合比例在衬底材料上制备一层硅膜并对其加以修饰后, 得到静态水接触角为 159° 的超疏水硅膜。2022年, Saini [11]等人利用纳米 TiO_2 , 对 TiO_2 薄膜的自清洁特性进行了深入研究, 发现薄膜的自清洁能力非常明显, 其存在能够提高约4%的发电量。Elminir [12]等人通过对自清洁原理的详细研究以及太阳能表面粉尘对其系统性能的影响估计, 发现无法进行自清洁的光伏发电系统其输出功率每月下降约17.4%。

2. 仿真

2.1. 模型简介

自1997年德国植物学家Barthlott和Neinhuis首次报道了荷叶表面微结构与荷叶表面自清洁功能的关系以后, 越来越多的研究人员将目光放在了仿生超疏水自清洁功能层上。一般来说, 超疏水表面与水滴或灰尘接触时, 只存在很小的接触面积, 导致表面污染物在气流或水滴等外力的作用下易被清走, 从而达到表面自清洁的效果, 即为“荷叶自清洁效应”。“荷叶自清洁效应”的结构原理图如图1所示。荷叶表面具有微米级的乳突, 乳突上有纳米级的蜡晶物质, 这种微纳复合结构可以大幅度提高水滴在其上的接触角, 导致水滴极易滚落。应用到器件表面, 则能大大降低表面清洁所需的能耗。

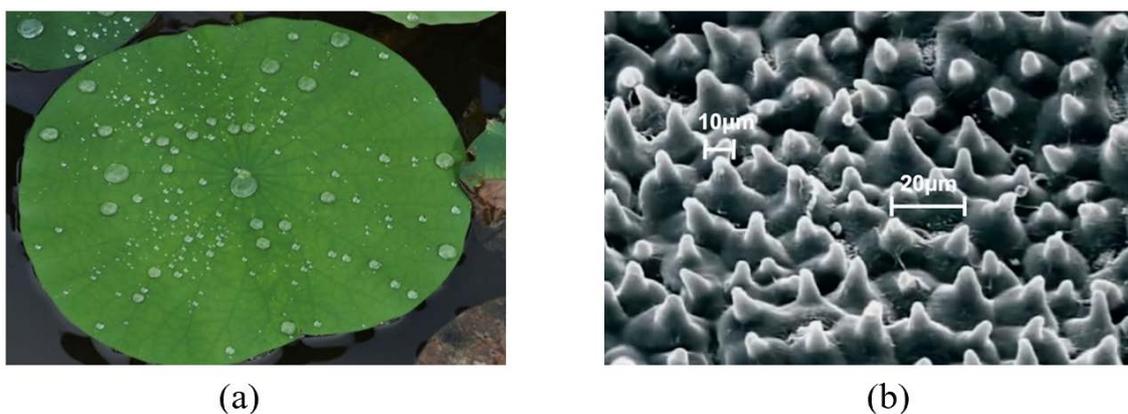


Figure 1. Macroscopic(a) and microscopic(b) structure of lotus leaf surface (source material from the internet)

图 1. 荷叶表面宏观(a)与微观(b)结构图(素材来源于网络)

基于前人研究并参考“荷叶表面微观结构”[13], 我们拟在光伏器件的迎光面构筑具有高透光的 SiO_2 微孔膜耦合 ZnO 纳米棒的分级自清洁结构, 即在FTO玻璃基底上旋涂一层聚苯乙烯悬浊液, 高温固定后在其上旋涂 SiO_2 悬浊液, 然后通过高温煅烧使聚苯乙烯微球消失, 在 SiO_2 薄膜上留下微米孔洞, 接着 SiO_2 微孔膜上生长 ZnO 纳米棒, 构造微纳分级复合结构, 从而实现光伏器件的自清洁功能, 避免粉尘污染影响光伏器件的性能。相比于“微乳凸结构[8]”、“硅膜结构[10]”等, SiO_2 微孔膜耦合 ZnO 纳米棒的分级自清洁结构通过微孔膜与纳米棒的结合, 形成了分级结构, 大大增加了材料的比表面积, 能够有效捕获和分散污染物, 同时利用光催化作用分解污染物, 实现更加高效的自清洁。此外, 通过高温煅烧在 SiO_2 薄膜上留下的微米孔洞能够直接有效地增加太阳光的透射率, 从而增加光伏器件的光电转换效率。

在此, 我们利用 FDTD 方法对该结构进行仿真模拟, 探究该结构的光学性能。该膜结构的设计示意图如图 2 所示。

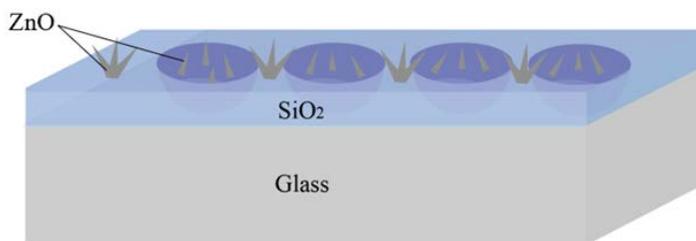


Figure 2. Schematic diagram of self-cleaning film structure design

图 2. 自清洁薄膜结构设计示意图

2.2. 模型构建

在光学模拟阶段, 我们采用时域有限差分法(FDTD)研究了该模型的光学性能, 测试所构建的模型对太阳光的透射率 T 、反射率 R , 并根据 $A = 1 - R - T$ 编程计算吸收率。此外, 通过合理设置场分布监视器, 我们得到了各个模型在不同截面、不同位置处的电场分布, 从而得到模型内部的光强分布, 更加直观地研究模型的光学性能。在模型构建过程中, 由于聚苯乙烯微球在旋涂完成后, 会经过高温煅烧彻底消失, 在二氧化硅表面留下微米孔洞结构, 因此我们利用 mesh order 设置将聚苯乙烯去除, 并赋予聚苯乙烯微球(即 etch)属性, 确保模型构建完成后聚苯乙烯微球不会影响该结构的光学性能。此外, 由于氧化锌生长过程在宏观看来是一个黑匣子, 尺寸和形态具有较大的不确定性, 因此我们在模型构建过程中对氧化锌模型做了相应的简化, 将氧化锌视为圆柱体进行建模。

ZnO 的带隙为 3.2~3.4 eV, 对应的发光波长为 380 nm 左右。由于 ZnO 的存在, 该膜结构会在紫外光波段具有较大的吸收率, 因此“ZnO 的密度”对该膜结构的透光性能来说是一个重要影响因素。在仿真过程中, 我们构建了三组仿真模型, 将“仅一层 SiO₂ 结构”作为对照组, “SiO₂ 微孔膜耦合低密度 ZnO 纳米棒结构”作为实验组 1, “SiO₂ 微孔膜耦合高密度 ZnO 纳米棒结构”作为实验组 2, 利用 FDTD 方法对以上三组仿真模型进行数值模拟。

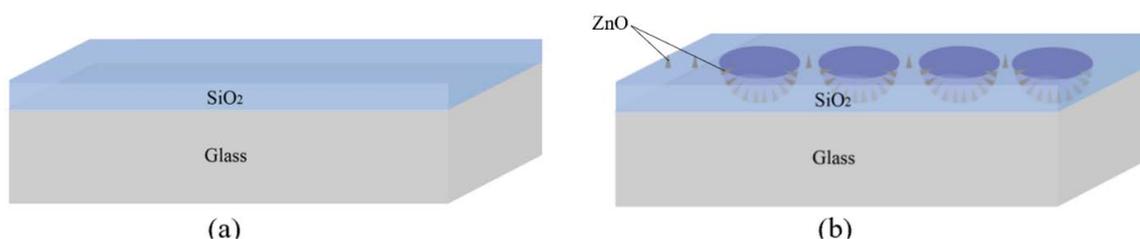


Figure 3. Schematic diagram of simulation model of control group (a) and experimental group 1 (b)

图 3. 对照组(a)和实验组 1 (b)的仿真模型示意图

对照组的仿真模型如图 3(a)所示, 结构上从上到下分别为一层 400 nm 厚的 SiO₂ 玻璃底板和 1000 nm 厚的 SiO₂ 玻璃基底, 以验证我们的模型在保证超疏水性的同时具有增透作用。实验组 1 的仿真模型如图 3(b)所示, 结构上从上到下分别为 800 nm 直径的聚苯乙烯微球, 直径、高度为 60 nm 的氧化锌纳米棒, 厚度为 400 nm 的 SiO₂ 玻璃底板, 厚度为 1000 nm 的 SiO₂ 玻璃基底, 测试所构建模型在增透方面的性能。实验组 2 在实验组 1 的基础上, 增加了氧化锌的密度, 详细模型示意图如图 4 所示。结构上与图 3(b)类似, 不同的是氧化锌的排列更加紧密, 数量多密度大。在这里我们对模型进行了适当简化, 即以理想化

的方式排列氧化锌纳米棒，事实上氧化锌纳米棒在生长过程中可能发生堆叠，生长方向也不可能完全直立向上。

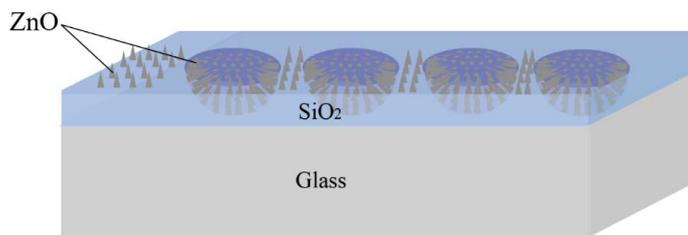


Figure 4. Schematic diagram of simulation model for experimental group 2
图 4. 实验组 2 仿真模型示意图

在以上三组仿真中， SiO_2 的复折射率来自 FDTD 材料库， ZnO 材料的复折射率来源于光学材料库(网址：<https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=ZnO&page=Aguilar>)，并作为光学模拟参数输入到 FDTD 材料库中。 ZnO 复折射率的详细数据见图 5。此外，在仿真过程中，我们将 400 nm 厚的 SiO_2 玻璃底板的底面设置为 $z=0$ 的 $x-y$ 平面，玻璃底板底面以上为 z 轴正方向，各监视器位置如图 6 所示。

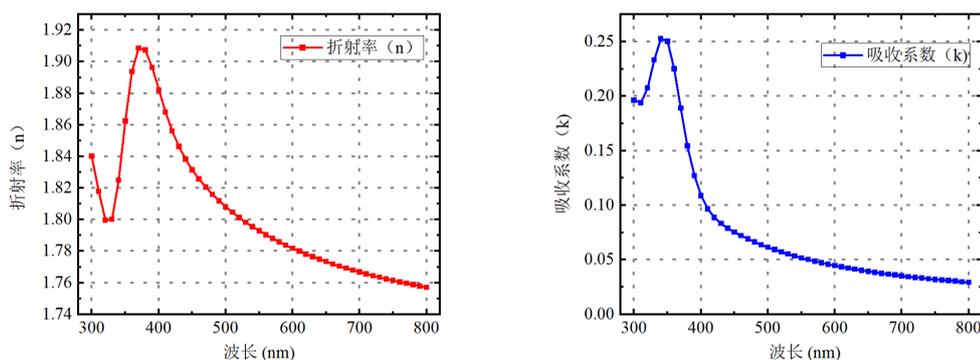


Figure 5. Complex refractive index data of ZnO
图 5. ZnO 复折射率数据

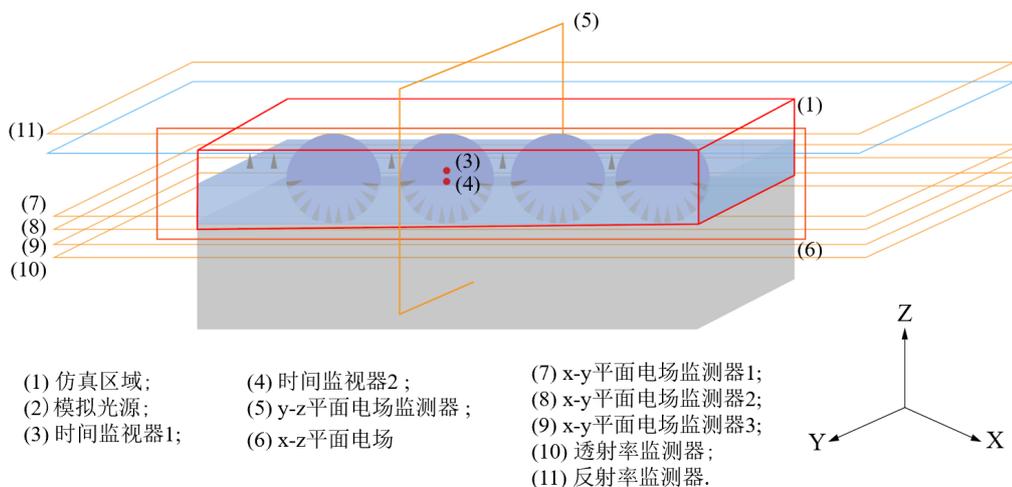


Figure 6. Simulation model and position of each monitor
图 6. 仿真模拟模型及各监测器位置

在 FDTD 中, 我们设置了波长范围为 300 nm 到 800 nm 之间, 沿 z 轴负方向垂直入射进入模型表面的平面波, 以模拟自然界的太阳光。图中粉色箭头表示光的入射方向, 蓝色箭头表示光的偏振方向即电场方向与 X 轴方向平行。该波源放置在空气中, 在 X 轴和 Y 轴方向设置周期边界条件, 使在整个设计的结构中出现周期性, 以减少仿真区域的大小, 从而减少运算量。此外, 为了避免电磁波的寄生发射和吸收, 在 Z 轴方向我们设置了完美匹配层(PML)边界条件。完美匹配层(PML)是一种高级吸收边界条件, 在有限差分法(FDTD)模拟中被广泛应用。PML 旨在通过在仿真区域边缘设置一层复杂材料属性的结构来吸收离开仿真区域的波, 而不将它们反射回计算区域内, 从而减少或消除不真实的反射, 使得仿真结果更加准确。在所有仿真情况中, 网格大小均为 5 nm。在实验组仿真情况中, 实验组 1 和 2 的仿真区域、光源位置、各监测器的数量、位置等等均相同。在 FDTD 光学仿真过程中, 三组仿真模型的材料以及仿真参数均相同。

2.3. 结果分析与讨论

对照组与实验组 1 的模拟数据如图 7 所示。模拟数据曲线表明, 实验组 1 的模型在全波长波段的透过率都接近于 1, 光学性能优异。但是与对照组相比, 模拟得到的实验数据并不理想, 实验组 1 与对照组在对光的“透射率”方面并无明显优势。从图 7 中可以看出, 实验组 1 的模型在紫外光波段对光的“吸收率”略高于对照组, 这得益于氧化锌的性质, 氧化锌的带隙为 3.2~3.4 eV, 对应的发光波长为 380 nm 左右, 推断实验组 1 模型模拟数据不理想是在氧化锌的密度方面存在问题。

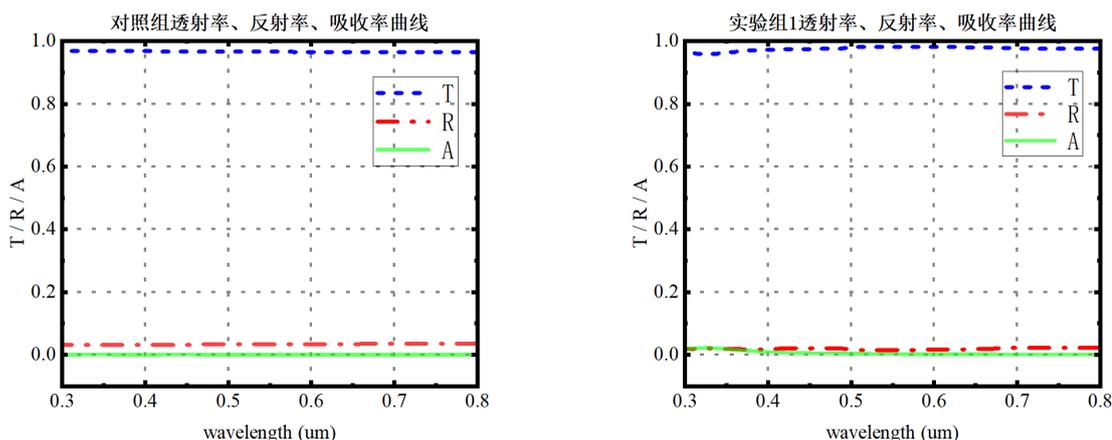


Figure 7. Curves of transmittance T, reflectance R and absorptivity A of control group and experimental group 1 simulated by FDTD method

图 7. 利用 FDTD 方法模拟得到的对照组与实验组的 1 透过率 T、反射率 R、吸收率 A 曲线

通过 FDTD 数值模拟得到的对照组与实验组 2 的模拟反射率、透过率曲线如图 8 所示。模拟反射率曲线表明, 两组模型结构对模拟太阳光的反射率随波长变化的趋势大致相同, 但是实验组 2, 即“SiO₂微孔薄膜耦合高密度 ZnO”结构对模拟太阳光具有更小的反射率。这是由于 SiO₂微孔薄膜具有多孔结构, 其折射率从空气到薄膜内部逐渐变化, 这种渐变折射率结构能够有效减少光在不同介质界面处的反射。微孔结构可以增加光在薄膜中的传播路径, 使光在微孔中发生多次反射和散射, 从而减少直接反射, 这种散射作用也有助于降低反射率。此外, 高密度 ZnO 在可见光区域具有较高的透明度, 并且 ZnO 本身具有一定的光吸收特性, 与 SiO₂微孔薄膜的复合结构可以形成多层膜结构, 利用光的干涉效应进一步降低反射率。模拟透射率曲线表明, 两组模型结构对模拟太阳光的透射率随波长变化的趋势相反。对照组即“仅一层 SiO₂”结构对模拟太阳光的透射率随波长增加逐渐减小, 透射率最大值出现在 300 nm 紫外光

波段处, 容易损坏光伏器件。这是由于 SiO_2 的折射率随波长的变化而变化, 通常在紫外和可见光区域, 折射率随波长的增加而减小。随着波长的增加, 折射率会逐渐减小, 导致光在材料中的传播损耗增加, 从而降低透射率。相反, 实验组 2 即“ SiO_2 微孔薄膜耦合高密度 ZnO ”结构对模拟太阳光的透射率随波长增加先减小后变大, 在紫外光波段的透射率远小于对照组, 且透射率最小值出现在波长 300~350 nm 之间, 在波长 550 nm 之后透射率逐渐平稳接近于 1。这主要是由于纳米氧化锌在紫外波段具有较大的吸收峰以及 SiO_2 微孔薄膜的多孔结构会增加光的散射, 特别是在紫外光波段, 光子能量较高, 更容易与微孔结构发生相互作用, 导致更多的光被散射或吸收, 从而大大降低透射率。将两组模型结构的模拟透射率 T 、反射率 R 、吸收率 A 绘制在一幅图中, 得到实验组 2 模型对太阳光的模拟透过率、反射率、吸收率曲线, 如图 9 所示。将模拟数据与对照组进行对比, 可以看出“ SiO_2 微孔薄膜@ ZnO 纳米棒分级复合结构(实验组 2 模型)”相比于“仅一层 SiO_2 结构(对照组的模型)”, 在保证微纳分级复合结构具有超疏水性的同时, 对太阳光具有更大的“透射率”, 即该结构具有优良的增透性, 光学性能优异。此外, 得益于 ZnO 的物理性质, 该结构在紫外光波段具有较大的“吸收率”, 可以大大减少紫外光对光伏器件的损害, 而且氧化锌在吸收紫外光后, 会发射可见光, 从而增加光的“透射率”, 进一步增强该膜结构的光学性能, 使光伏器件具有更大的光电转化效率。

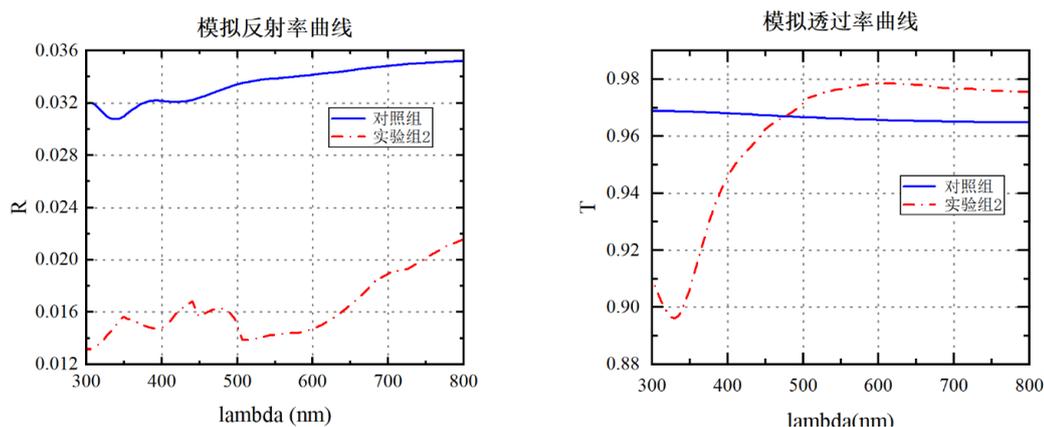


Figure 8. Simulated reflectance and transmittance curves of control group and experimental group 2

图 8. 对照组与实验组 2 的模拟反射率、透过率曲线

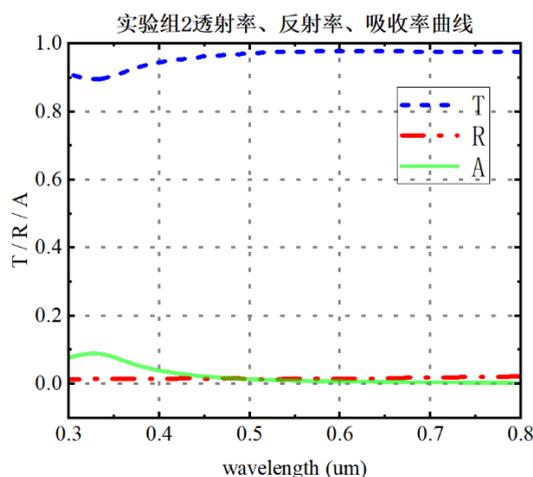


Figure 9. Curves of simulated solar transmittance, reflectivity and absorptivity of experimental group 2 model

图 9. 实验组 2 模型对太阳光的模拟透过率、反射率、吸收率曲线

通过对对照组、实验组 1 和实验组 2 的透射率(T)、反射率(R)和吸收率(A)曲线进行分析,我们发现:对照组(仅一层 SiO₂ 结构)表现出较高的透射率和较低的反射率,表明 SiO₂ 材料对光的吸收较少,绝大部分光能够透过,符合其“透明”的光学特性。实验组 1 (SiO₂ 微孔膜耦合低密度 ZnO 纳米棒结构)的透射率相对于对照组有所下降,反射率有所上升,表明低密度 ZnO 纳米棒的引入增加了光的散射和吸收,特别是在紫外光波段,这与纳米氧化锌的紫外吸收峰相对应。实验组 2 (SiO₂ 微孔膜耦合高密度 ZnO 纳米棒结构)的透射率进一步下降,反射率进一步上升,表明高密度 ZnO 纳米棒对光的散射和吸收效应更为显著,尤其是在紫外光波段,吸收率显著增加。实验组 2 的高密度 ZnO 纳米棒结构在紫外光波段表现出较高的吸收率,适合需要高效紫外光吸收的应用场景。这些结果对于设计和优化具有特定光学性能的膜结构提供了重要的指导意义,特别是在需要调控紫外光吸收和透射性能的应用中。

各个场监视器得到的模拟电场分布如图 10 所示。实验组 2 的 SiO₂ 微米孔洞结构在多个平面和位置(包括 x-z 面、y-z 面以及 x-y 面的不同位置)均显示出显著的电场聚焦效应,特别是在孔洞的上半部分,电场强度明显增强。这表明 SiO₂ 微米孔洞结构起到了类似凹透镜的作用,能够将太阳光在自由空间范围内重新分布并聚焦,从而显著提高入射光的光照强度,间接增强了结构的透光性能。相比之下,如图 10(b)所示,对照组(仅一层 SiO₂ 结构)的电场分布较为均匀,缺乏明显的聚焦效应,其透光性能主要依赖于 SiO₂ 材料本身的透明性,而未通过结构设计实现光的优化利用。实验组 2 在 x-y 平面不同位置的模拟电场分布进一步揭示了该结构的聚焦效果:在 z = 200 nm 处,电场分布显示出强烈的聚焦效应;在 z = 0 nm 处,电场分布较为均匀但仍有一定聚焦;而在 z = -200 nm 处,聚焦效应明显减弱。这种电场分布的梯度变化表明, SiO₂ 微米孔洞结构对光的反射和聚焦作用,在空间上具有非均匀性,且主要集中在微米孔洞的上半部分。

因此,实验组 2 的结构设计通过引入微米孔洞和 ZnO 纳米棒,显著优化了光的分布和利用率,特别是在增强透光性能方面表现出色。这一结果为设计高效光学器件,尤其是需要高透光性和光聚焦能力的应用场景,提供了重要的理论支持和实验依据。

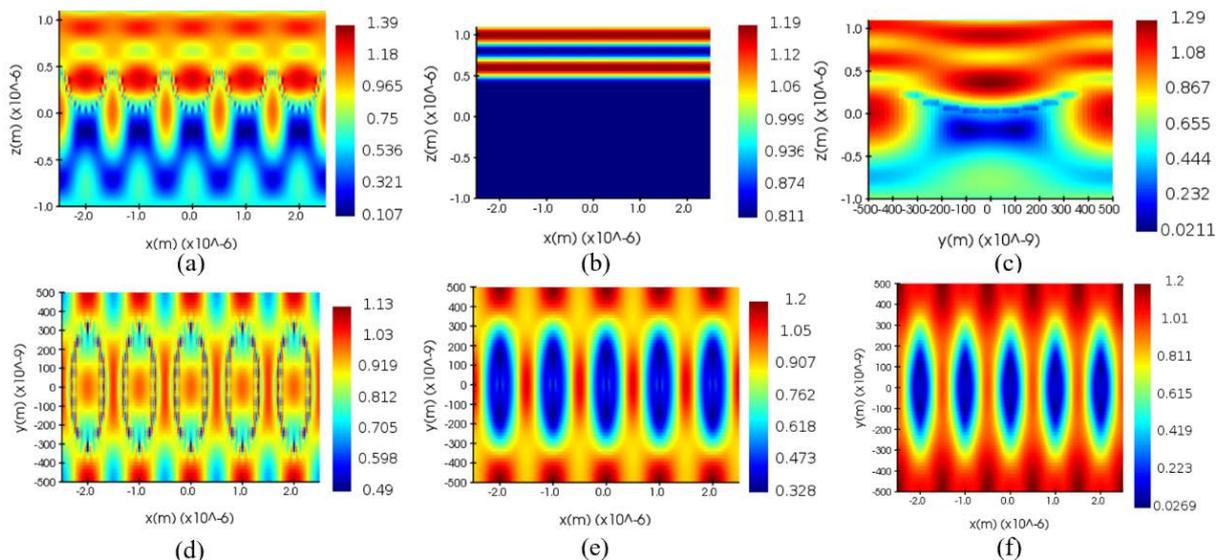


Figure 10. (a) Experimental group 2 x-z plane; (b) The x-z plane simulated electric field distribution in the control group; (c) y-z plane simulated electric field distribution; (d) (e) (f) The x-y plane simulated electric field distribution at z = 200 nm, z = 0 nm, and z = -200 nm, respectively

图 10. (a) 实验组 2 的 x-z 面; (b) 对照组 x-z 面模拟电场分布; (c) y-z 面模拟电场分布; (d) (e) (f) z = 200 nm 时、z = 0 nm 时、z = -200 nm 时的 x-y 面模拟电场分布

3. 结论与展望

基于前人研究并参考“荷叶效应”，我们设计了一种具有创新性的超疏水薄膜结构，并通过 FDTD 方法对设计的薄膜结构进行相应的数值模拟，得到了三组透过率、反射率和吸收率等数据曲线。模拟结果表明，该结构在保证微纳分级复合结构具有超疏水性的同时，在模拟光的全波长段具有更大的平均“透射率”。另外，由于在该结构表面生长了大量 ZnO 纳米棒，使得该结构在紫外光波段对模拟太阳光具有较大的“吸收率”，从而减少紫外光对光伏器件的损害，而且 ZnO 在吸收紫外光后，会发射可见光，从而增加入射光照强度，进一步增强该膜结构的光学性能，使光伏器件具有更大的光电转化效率。同时我们模拟了膜结构内部 x-y、y-z、x-y 不同截面的电场分布。模拟结果表明 SiO₂ 薄膜上的微米孔洞相当于一个反射镜，使模拟太阳光在自由空间范围内重新分布，大部分聚焦在微米孔洞的上半部分，从而大大增加入射太阳光的光照强度，间接增强该结构的光学性能。从模拟结果来看，该膜结构在微纳分级复合结构保证超疏水性的同时，具有优异的光学性能，发展前景广阔。此外，该膜结构具有轻、薄、平的特点，可以推广运用于许多领域，比如汽车挡风玻璃表面、超净试验台表面、玻璃幕墙的防尘自清洁等。该仿生自清洁薄膜结构还可以推广至航空航天、军工、建筑等零部件的防尘自清洁，具有极强的推广可行性。

本文所研究的自清洁薄膜的光学性能还与很多因素有关，包括仿真模型的优化、模型参数的量化、模拟太阳光的入射角度等一系列问题，因此还有很多工作亟待开展：

1) 改进 ZnO 纳米棒的建模方法，使其与实际生长结构更相似；

2) 明确定义和量化文章所提及的 ZnO 纳米棒“低密度”和“高密度”，采用迭代法得出最佳工艺制备参数；

3) 探讨不同 ZnO 纳米棒尺寸、排列方式以及密度对光学性能(太阳光透过率、反射率和吸收率)的影响，找出最佳的结构参数；

4) 在模拟太阳光的不同入射角度下，研究该自清洁薄膜的光学性能。

未来，我们会针对上述问题进行更深入的探讨，希望该研究可以为超疏水薄膜的研发以及光伏应用提供新的思路和方法。

参考文献

- [1] 黄友铭. 局域表面等离子体增强 CsPbIBr₂ 钙钛矿光伏器件研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津工业大学, 2022.
- [2] 邵伟佳. 基于表面等离子体激元的光学滤光片与完美吸收超材料的设计及数值模拟[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- [3] 李斌, 徐立, 王浩, 等. 电磁计算与电磁工业软件[J]. 电子科技大学学报, 2024, 53(6): 803-815.
- [4] 张永贤. 基于扩展 FDTD 的场路耦合方法在电磁仿真软件中的应用[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2024.
- [5] 王海波, 林虹, 宋文龙, 等. 2024 年上半年中国电池行业运行情况[J]. 电池, 2024, 54(4): 445-449.
- [6] 王敏. 中国科学技术大学钙钛矿电池稳态效率破世界纪录[N]. 中国科学报, 2024-07-08(3).
- [7] 王颖. 钙钛矿薄膜的制备技术及应用研究[J]. 山西冶金, 2024, 47(9): 82-84, 111.
- [8] 张惠, 陈焯, 王静, 等. PDMS@P25 复合涂层织布的制备及其光催化与自清洁性能研究[J]. 武汉工程大学学报, 2024, 46(1): 11-17.
- [9] Fang, Y., Sun, G., Bi, Y. and Zhi, H. (2015) Multiple-Dimensional Micro/Nano Structural Models for Hydrophobicity of Butterfly Wing Surfaces and Coupling Mechanism. *Science Bulletin*, **60**, 256-263. <https://doi.org/10.1007/s11434-014-0653-3>
- [10] 张德虎, 邓佳明, 薛珊珊, 等. 二氧化硅/环氧树脂/硅橡胶超疏水涂层的制备及其性能研究[J]. 塑料工业, 2020, 48(11): 170-173.

- [11] Saini, A. and Ratan, J.K. (2022) Formulation and Evaluation of Surface-Fluorinated Microsized-TiO₂ Based Self-Cleaning Cement: Characterization, Self-Cleaning, Depollution and Antimicrobial Study. *Chemical Papers*, **76**, 3201-3214. <https://doi.org/10.1007/s11696-022-02093-4>
- [12] Elminir, H.K., Ghitas, A.E., Hamid, R.H., El-Hussainy, F., Beheary, M.M. and Abdel-Moneim, K.M. (2006) Effect of Dust on the Transparent Cover of Solar Collectors. *Energy Conversion and Management*, **47**, 3192-3203. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.02.014>
- [13] Huang, Y., Wu, Y., Xu, X., Qin, F., Zhang, S., An, J., *et al.* (2022) Nano Ag-Enhanced Photoelectric Conversion Efficiency in All-Inorganic, Hole-Transporting-Layer-Free CsPbIBr₂ Perovskite Solar Cells. *Chinese Physics B*, **31**, Article ID: 128802. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/ac89e8>