

银纳米颗粒局域表面等离子激元增强型Sb₂S₃光伏器件的模拟研究

安嘉凯, 陈耀威, 姚敏, 戎沿锴

天津工业大学物理科学与技术学院, 天津

收稿日期: 2024年4月14日; 录用日期: 2024年5月14日; 发布日期: 2024年5月22日

摘要

当入射光与金属纳米颗粒相互作用时, 会在颗粒表面引发局域表面等离子激元共振, 这一效应能够显著增强近场强度。这种增强作用可以有效提高Sb₂S₃材料的激发态密度, 从而加强光伏器件对入射光的吸收能力, 并进一步提升其光电转换效率。此外, 金属纳米颗粒的引入还能利用前散射效应增加入射光在光吸收层内的传播路径, 进一步增强光吸收。基于这些原理, 本文设计了一种新型的Sb₂S₃光伏器件, 其中集成了银纳米颗粒以实现局域表面等离子激元的增强效应。选择银纳米颗粒是因为其成本较低且制备相对容易。所设计的器件结构为FTO/ZnO/CdS/Sb₂S₃/C/Au。为了深入了解器件的性能, 我们采用时域有限差分法进行了数值模拟。模拟结果展示了器件在不同平面下的电场分布以及其对不同波长入射光的吸收率曲线。模拟数据表明, 银纳米颗粒的引入有望显著提升Sb₂S₃光伏器件的性能, 为实验制备高效能的Sb₂S₃光伏器件提供了理论支撑和指导。

关键词

Sb₂S₃光伏器件, 时域有限差分法, 局域表面等离子激元

Simulation Study of Localized Surface Plasmon Enhanced Sb₂S₃ Photovoltaic Devices with Silver Nanoparticles

Jiakai An, Yaowei Chen, Min Yao, Yankai Rong

School of Physical Science and Technology, Tiangong University, Tianjing

Received: Apr. 14th, 2024; accepted: May 14th, 2024; published: May 22nd, 2024

Abstract

When incident light interacts with metal nanoparticles, it can trigger localized surface plasmo-

文章引用: 安嘉凯, 陈耀威, 姚敏, 戎沿锴. 银纳米颗粒局域表面等离子激元增强型 Sb₂S₃ 光伏器件的模拟研究[J]. 现代物理, 2024, 14(3): 101-109. DOI: 10.12677/mp.2024.143012

resonance (LSPR) on the surface of the particles, significantly enhancing the near-field intensity. This enhancement effectively increases the excited state density of Sb_2S_3 material, thereby strengthening the absorption capability of photovoltaic devices for incident light and further improving their photoelectric conversion efficiency. Additionally, the introduction of metal nanoparticles can utilize the forward scattering effect to increase the propagation path of incident light within the light absorption layer, further enhancing light absorption. Based on these principles, this paper designs a novel Sb_2S_3 photo-voltaic device that integrates silver nanoparticles to achieve the enhancement effect of LSPR. Silver nanoparticles are chosen due to their low cost and ease of preparation. The designed device structure is $\text{FTO}/\text{ZnO}/\text{CdS}/\text{Sb}_2\text{S}_3/\text{C}/\text{Au}$. To gain a deeper understanding of the device's performance, we conducted numerical simulations using the finite-difference time-domain (FDTD) method. The simulation results the electric field distribution of the device at different planes and its absorption curves for different wavelengths of incident light. The simulation data suggests that the introduction of silver nanoparticles has the potential to significantly enhance the performance of Sb_2S_3 photovoltaic devices, providing theoretical support and guidance for the experimental preparation of high-efficiency Sb_2S_3 photovoltaic devices.

Keywords

Sb_2S_3 Solar Cell, FDTD, Localized Surface Plasmon

Copyright © 2024 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

碲基硫属太阳能电池是一种新兴的薄膜太阳能电池技术，近年来其发展势头迅猛，已引起了广大研究者和业界的高度关注。其独特的光电转换效率已成功达到 10.75% [1]，这一显著成果证明了其在新型太阳能电池材料中的重要地位。在全球面临传统能源枯竭和环境污染的双重压力下，各国政府，特别是我国的党中央和国务院，对碳达峰和碳中和工作给予了前所未有的重视。为此，已相继发布了《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》和《2030 年前碳达峰行动方案》，体现了对这一议题的顶层设计和战略思考。值得一提的是，太阳每天为地球提供的辐射能量远超全球日常消耗的能量，这种巨大的能量差异为利用太阳能提供了巨大的潜力[2] [3]。因此，通过光伏器件高效利用太阳能这种清洁、可再生的能源，被认为是实现碳达峰和碳中和目标的关键途径之一。

硫化碲太阳能电池，因其元素地球储量丰富、材料清洁环保、成本低廉、可见光波段的吸收系数超过 10^5 cm^{-1} 、带隙可调(1.1 eV~1.7 eV) [4] [5]等优势，成为了当下流行的太阳能电池光吸收层材料[1]。光伏器件对入射光的吸收能力对于其性能来说至关重要，一般来说会通过提高光吸收层厚度或是改善入射光角度，以此提高光程，提升器件对入射光的吸收，进而改进光伏器件的效率，但由于硫化碲准一维链状结构的特性，导致其光吸收层厚度一般较薄，光程降低使其光吸收能力较差，这直接导致硫化碲太阳能电池的 PCE 较低(7.5%) [6] [7]，与 33%的理论光电转换效率[8]有较大差距。利用表面等离激元的方法来增强光伏器件如今已屡见不鲜[9] [10]。Chen [11]和 Park [12]的研究团队均探索了将金纳米颗粒(Au NPs)融入光伏器件的方法，他们的研究成果表明，Au NPs 的表面等离激元特性对于提升电池的光吸收能力和光电流密度具有显著作用。

本文设计了一种新型的 Sb_2S_3 光伏器件，该器件利用银纳米颗粒的局域表面等离激元效应进行优化。通过引入银纳米颗粒，我们期望提升 $\text{FTO}/\text{ZnO}/\text{CdS}/\text{Sb}_2\text{S}_3/\text{C}/\text{Au}$ 结构的光伏性能。为了验证设计的有效性，

我们绘制了相关的能带图，并采用时域有限差分法(FDTD)进行了深入的模拟分析。在模拟过程中，我们特别关注了吸收率曲线的变化，讨论了不同尺寸银纳米颗粒对吸收率的影响，并确定了最佳的银纳米颗粒尺寸。此外，我们还对光伏器件内部的电场分布进行了模拟，分析了银纳米颗粒加入后电场分布的变化。根据 FDTD 模拟的结果，我们发现银纳米颗粒的加入可以显著提升光伏器件的性能。这一模拟研究对于指导 Sb_2S_3 光伏器件的开发具有重要的参考价值。

2. 光伏器件结构与模型

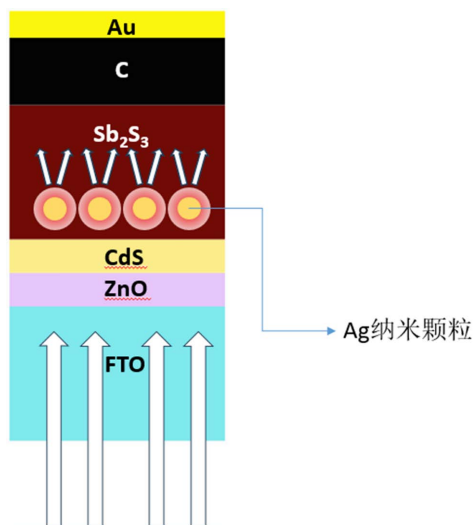


Figure 1. Structural schematic diagram of localized surface plasmon enhanced Sb_2S_3 based photovoltaic devices based on silver nanoparticles

图 1. 基于银纳米颗粒的局域表面等离激元增强型 Sb_2S_3 基光伏器件的结构示意图

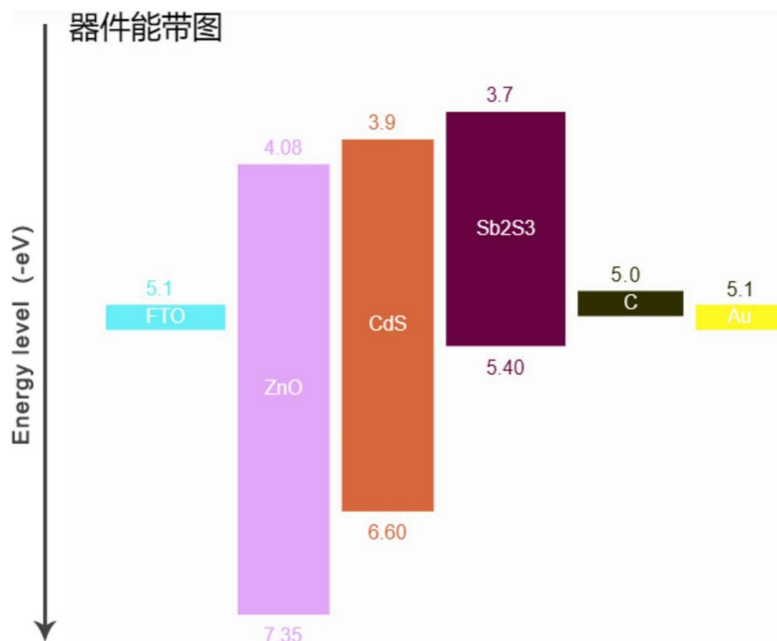


Figure 2. Energy band diagram of localized surface plasmon enhanced Sb_2S_3 based photovoltaic devices based on silver nanoparticles

图 2. 基于银纳米颗粒的局域表面等离激元增强型 Sb_2S_3 基光伏器件的能带图

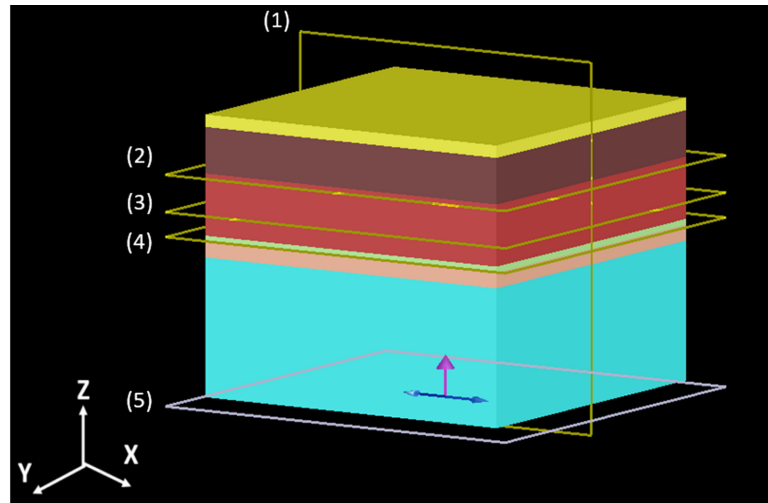


Figure 3. 3D structure and detection surface of localized surface plasmon enhanced Sb_2S_3 based photovoltaic devices based on silver nanoparticles

图 3. 基于银纳米颗粒的局域表面等离子体增强型 Sb_2S_3 基光伏器件的 3D 结构及检测面图

在众多金属纳米颗粒当中，银纳米颗粒由于其稳定性强，成本低廉，合成过程可控等优异性质得到了广泛应用[12] [13]，本研究中，我们将银纳米颗粒放置于光吸收层中，如图 1 所示，入射光在银纳米颗粒附近时会发生局域表面等离子体共振效应(LSPR)，入射光在银纳米颗粒区域发生散射，光线方向发生改变，光程便因此增加[14] [15]。这对于光吸收层对于入射光的吸收有正向改善，而光伏器件的性能又与光吸收层对入射光的吸收能力息息相关，所以器件的性能也有一定的提高。图 1 为本文所研究器件的模拟结构，在入射光的照射下，银纳米颗粒产生了有效的 LSPR 效应，入射光因散射而在光吸收层内的光程提高。在相同介质中，银纳米颗粒的光散射通常是对称的，这一特性在多个方向上都保持不变[16]，当入射光激发银纳米颗粒，并满足特定的色散关系时，会产生所谓的表面等离子体共振[17] [18] [19]。这种共振本质上是一种电磁场，其电场强度显著超过入射光场强度，从而形成近场增强效应。表面等离子体的一个重要应用是增强物质的荧光强度[20] [21]。荧光强度的提高进一步促进了硫化锑光伏器件的开路电压的提升。值得注意的是，光伏器件的性能指标——光电转换效率(PCE)是由开路电压、短路电流密度等因素共同决定的[22]。因此，通过引入银纳米颗粒，我们可以预期硫化锑光伏器件的 PCE 会得到一定程度的提升。

图 2 展示了 FTO/ZnO/CdS/ Sb_2S_3 /C/Au 光伏电池的能带结构示意图。当太阳光照射到 Sb_2S_3 光吸收层时，吸收层受到激发产生电子空穴对。随后，电子通过复合电子传输层传递到 FTO 阳极，而空穴则通过 C-Au 电极传输到阴极。这一过程基于科学原理，确保了本文设计的光伏器件结构在理论上的可行性。因此，我们有理由相信这一结构在实际应用中也将展现出良好的性能。

本文旨在深入探讨银纳米颗粒对 Sb_2S_3 光伏器件性能的影响。为实现这一目标，我们运用 FDTD 方法构建了光伏器件的详细模型，并对其内部光场、光学特性等进行了系统模拟。如图 3 所示，图中黄色平面代表不同的监测面，红色部分表示光吸收层。平面 2 与平面 4 分别用以监测透过率和反射率的变化，而平面 3 专注于监测 X-Y 平面内的电场分布情况。此外，平面 1 用于监测 $Y = 0$ 时 X-Z 平面的电场分布，而白色平面标明了光源的具体位置，箭头则指示了光路的方向。这些设置旨在全方位解析银纳米颗粒引入后对 Sb_2S_3 光伏器件性能的影响机制，为进一步的优化和设计提供理论依据。

根据器件的设计结构，构建了 FTO/ZnO (100 nm)/CdS (100 nm)/ Sb_2S_3 (400 nm)/C/Au (80 nm)，其中，FTO 的厚度对模拟几乎无影响，本文粗略将其设置为 400 nm，C 的厚度在实际实验中由于方法大多为刮

涂法, 其厚度难以调控, 在本文中将其设置为 300 nm 厚度来进行模拟。并将单个银纳米颗粒置于 Sb_2S_3 光吸收层中进行模拟, 将其尺寸设置为梯度变化尺度进行参考, 模拟的结果也会对后续的实验制作银纳米颗粒的尺寸进行相关指导。我们预计在 Sb_2S_3 光吸收层内制备 50~100 nm 尺寸的银纳米颗粒, 300~1200 nm 波长的平面波被设置为光源, 分别在光吸收层前后设置光波的频率监测截面(即为图 3 中的 (2), (4)位置), 并以此结果来计算吸收率。电场监测则分别监测银纳米颗粒周围的 X-Y 平面以及整个器件的 X-Z 平面。

3. 结果与讨论

3.1. 光伏器件的场分布分析

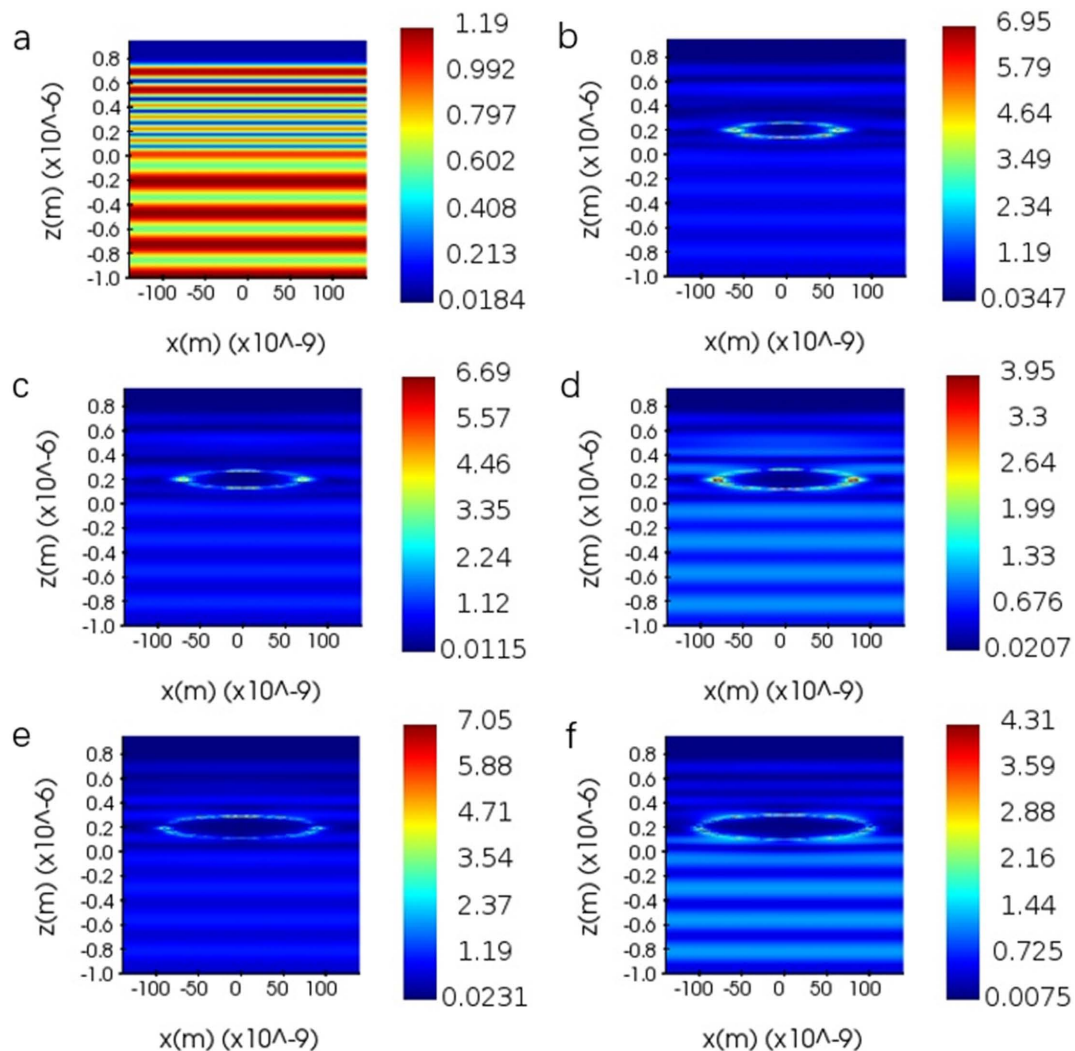


Figure 4. $Y = 0$, the simulated electric field distribution in the overall X-Z plane of the photovoltaic device, (a) - (f) are the electric field distribution maps under silver free nanoparticles and 60~100 nm silver nanoparticles, respectively, $\lambda = 724$ nm
图 4. $Y = 0$ 时, 光伏器件内整体 X-Z 平面的模拟电场分布, (a)-(f) 分别为无银纳米颗粒, 60~100 nm 的银纳米颗粒下的电场分布图, 其中 $\lambda = 724$ nm

图 4 展示了在 $Y = 0$ 时, 光伏器件内部整体 X-Z 平面的模拟电场分布二维图。图中, 入射光波长为 724 nm, 监测位置对应于图 3 中的(1)处。 Sb_2S_3 光吸收层主要位于 $40 < Z < 440$ nm 的区域, 其中嵌入了

银纳米颗粒。图 4 中的(a)至(f)分别展示了无银纳米颗粒以及银纳米颗粒尺寸在 $60 \text{ nm} < Z < 100 \text{ nm}$ 范围内的情况。整体上, 图 4 可划分为几个区域: $-1000 \text{ nm} < Z < -100 \text{ nm}$ 为阴极区, $-100 \text{ nm} < Z < 40 \text{ nm}$ 为复合电子传输层区, $40 \text{ nm} < Z < 440 \text{ nm}$ 为 Sb_2S_3 光吸收层区, 而 $440 \text{ nm} < Z < 820 \text{ nm}$ 则为阳极区。从图 4(b)~(f)中可以看出, 当光入射到光伏器件时, 银纳米颗粒周围的电场明显增强, 展现出了近场增强效应。这是银纳米颗粒的局域表面等离子共振(LSPR)所导致的。此外, 由于银纳米颗粒的趋肤效应, 电场主要集中在颗粒的表面, 而颗粒内部则显示为蓝色区域, 表明内部电场强度并不高。这进一步证实了银纳米颗粒的引入并没有对光伏器件本身的结构造成显著影响。综上所述, 通过模拟分析, 我们观察到银纳米颗粒在光伏器件中的 LSPR 近场增强效应, 以及其对电场分布的影响。这为进一步优化基于 Sb_2S_3 的光伏器件提供了重要的理论依据和实践指导。

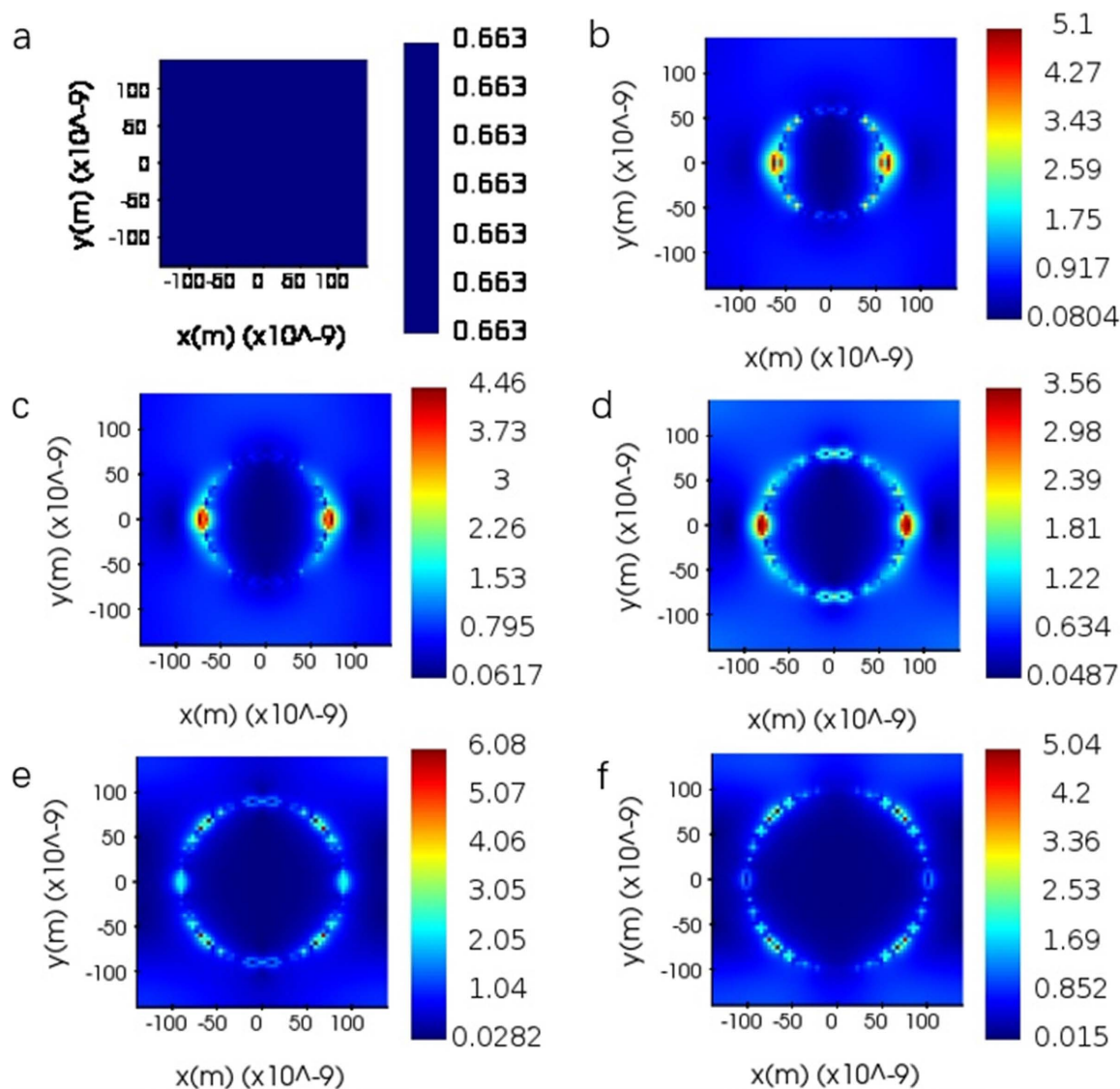


Figure 5. The simulated electric field distribution in the X-Y plane is concentrated around silver nanoparticles at the position of $Z = 200 \text{ nm}$. (a) is a device without silver nanoparticles, and (b)~(f) are devices with silver nanoparticles of $60 \sim 100 \text{ nm}$ size, respectively, $\lambda = 724 \text{ nm}$

图 5. X-Y 平面内的模拟电场分布, 集中在银纳米颗粒周围, 位置为 $Z = 200 \text{ nm}$ 处, (a)为无银纳米颗粒的器件, (b)~(f)分别为 $60 \sim 100 \text{ nm}$ 尺寸银纳米颗粒的器件, $\lambda = 724 \text{ nm}$

图 5 展示了 X-Y 平面内的模拟电场分布情况, 鉴于本文重点关注银纳米颗粒在增强光伏器件性能方面的作用, 因此主要观察点集中在银纳米颗粒周边。观察位置定于 $Z = 200 \text{ nm}$ 处, X 轴范围限制在 -150 nm 至 150 nm 之间。与图 4 类似, 模拟结果揭示了一个有趣的现象: 银纳米颗粒周围的电场强度并非随其尺寸单调递增, 而是在某一特定尺寸时达到最佳效果。这 6 张图直观地展现了银纳米颗粒的引入对其周围电场产生的显著影响。不仅颗粒附近的电场得到了大幅度提升, 图中较浅蓝色区域的整体场强也明显高于其他区域。图 5(a) 展示了无银纳米颗粒时的电场强度情况, 该截面电场强度仅为 0.663。然而, 在引入银纳米颗粒后, 不仅颗粒周围的电场强度有所增强, 其他区域的电场强度也有所提升。通过对比图 5(b)~(f) 右侧的场强数据, 我们可以清晰地看到图 5(e) 中的场强峰值最高。这一数据进一步印证了银纳米颗粒对电场分布的影响。值得注意的是, 引入银纳米颗粒后, 各器件的电场分布展现出一定的相似性, 这为进一步优化光伏器件设计提供了新的视角。经过分析和对比, 我们可以明确以下结论: 当引入 90 nm 的银纳米颗粒时, 器件的 Sb_2S_3 光吸收层内展现出最高的电场强度, 相较于其他尺寸的银纳米颗粒。此外, 从相关图像中观察到, 银纳米颗粒的引入导致电场分布呈现特定模式, 即在颗粒的左右两侧形成了明显的暗区。这一现象归因于局域表面等离子体共振(LSPR)的近场增强效应, 该效应在银纳米颗粒附近产生高电场强度, 从而在一定程度上降低了其紧邻区域的电场强度。值得注意的是, 尽管银纳米颗粒周围的局部电场强度有所提升, 但在某些区域, 尤其是颗粒附近的某些位置, 电场强度反而有所下降。这同样是由于 LSPR 近场增强效应引起的。然而, 从整体来看, 银纳米颗粒的引入显著提高了 Sb_2S_3 光吸收层的电场强度, 不仅增强了颗粒周边的电场, 还在整个监测面内平均电场强度上实现了显著提升。综上所述, 银纳米颗粒的引入不仅增强了 Sb_2S_3 光吸收层的整体电场强度, 还在其周围形成了 LSPR 近场增强效应, 从而有效延长了光程并提升了光的发散效应。这些效应共同提升了光伏器件的性能, 为优化器件设计提供了新的思路。由图 5 电场强度可知, 90 nm 的银纳米颗粒周围的电场强度最高(无论是峰值还是周围高场强区域), 故而 90 nm 尺寸的银纳米颗粒的引入为最佳。

3.2. 银纳米颗粒对入射光吸收的影响

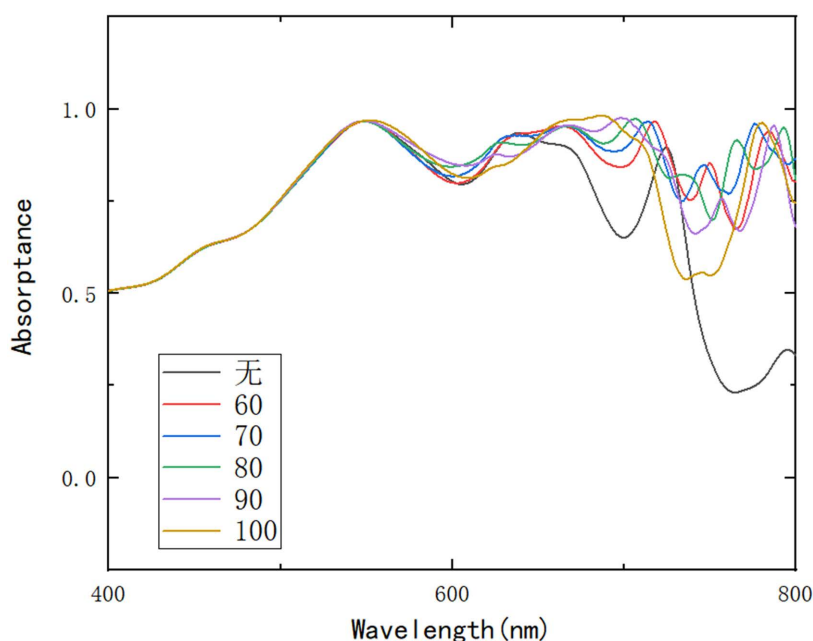


Figure 6. Absorption curve simulated using FDTD software (400~800 nm)

图 6. 利用 FDTD 软件模拟得出的吸收率曲线(400~800 nm)

图 6 展示了通过 FDTD 软件模拟的吸收率曲线。从模拟结果可以看出, 银纳米颗粒的引入对器件的入射光吸收能力产生了不同程度的增强效果。特别值得注意的是, 吸收峰主要出现在 700 nm 波长处。而接近 800 nm 处的另一个吸收峰可能与银纳米颗粒吸收入射光并转化为热能有关。当对比不同尺寸银纳米颗粒的吸收率曲线时, 我们发现它们对器件吸收率的提升效果总体上相似。虽然在 90 nm 和 100 nm 尺寸处仍有一定的提升并呈现出递增趋势, 但这与之前的电场强度分析结果不完全吻合。这可能是因为随着银纳米颗粒尺寸的增加, 它们更多地吸收入射光并将其转化为热能而非电能, 这可能导致了一部分热耗散。这一发现为我们提供了宝贵的洞见, 有助于进一步优化基于银纳米颗粒的 Sb_2S_3 太阳能电池的设计。通过更精确地调控银纳米颗粒的尺寸和分布, 我们有望在提高器件光吸收效率的同时, 减少不必要的热耗散, 从而实现更高效的能量转换。

4. 结论

本文提出了一种增强型 Sb_2S_3 太阳能电池的设计方案, 该方案利用银纳米颗粒的局域表面等离子激元 (LSPR) 效应。通过采用时域有限差分法 (FDTD) 进行模拟分析, 我们详细研究了不同尺寸银纳米颗粒对器件光吸收性能的影响。模拟结果表明, 银纳米颗粒的引入有效提升了器件对入射光的吸收率, 这一结论得到了电场强度分布分析的进一步支持。此外, 我们还发现, 银纳米颗粒的 LSPR 近场增强效应以及其前向散射导致的光程增加是提升器件光吸收能力的关键因素。特别值得一提的是, 模拟结果暗示 90 nm 尺寸的银纳米颗粒可能对提升器件性能具有最为显著的效果。这些发现为进一步优化基于银纳米颗粒局域表面等离子激元增强型 Sb_2S_3 太阳能电池提供了一定的理论指导。

参考文献

- [1] Barthwal, S., Singh, S., Chauhan, A.K., *et al.* (2023) Design and Simulation of CdS-Free $\text{Sb}_2(\text{S}, \text{Se})_3$ Solar Cells with Efficiency Exceeding 20%. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **12**, 947-958. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c06210>
- [2] Luo, D.Y., Su, R., Zhang, W., *et al.* (2020) Minimizing Non-Radiative Recombination Losses in Perovskite Solar Cells. *Nature Reviews Materials*, **5**, 44-60. <https://doi.org/10.1038/s41578-019-0151-y>
- [3] Lewis, N.S. and Nocera, D.G. (2006) Powering the Planet: Chemical Challenges in Solar Energy Utilization. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **103**, 15729-15735. <https://doi.org/10.1073/pnas.0603395103>
- [4] Tang, R.F., Wang, X.M., Lian, W.T., *et al.* (2020) Hydrothermal Deposition of Antimony Selenosulfide Thin Films Enables Solar Cells with 10% Efficiency. *Nature Energy*, **5**, 587-595. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0652-3>
- [5] Ma, Y.Y., Tang, B.B., Lian, W.T., *et al.* (2020) Efficient Defect Passivation of Sb_2Se_3 Film by Tellurium Doping for High Performance Solar Cells. *Journal of Materials Chemistry A*, **8**, 6510-6516. <https://doi.org/10.1039/D0TA00443J>
- [6] Chen, J.W., Li, G.Y., Xu, Z.H., *et al.* (2024) Recent Advances and Prospects of Solution-Processed Efficient Sb_2S_3 Solar Cells. *Advanced Functional Materials*, **34**, Article 2313676. <https://doi.org/10.1002/adfm.202313676>
- [7] Choi, Y.C., Lee, D.U., Noh, J.H., *et al.* (2014) Highly Improved Sb_2S_3 Sensitized-Inorganic-Organic Heterojunction Solar Cells and Quantification of Traps by Deep-Level Transient Spectroscopy. *Advanced Functional Materials*, **24**, 3587-3892. <https://doi.org/10.1002/adfm.201304238>
- [8] Dhakras, P.A., Comfort, E. and Lee, J.U. (2019) Ideal p-n Diodes from Single-Walled Carbon Nanotubes for Use in Solar Cells: Beating the Detailed Balance Limit of Efficiency. *ACS Applied Nano Materials*, **2**, 7496-7502. <https://doi.org/10.1021/acsanm.9b01424>
- [9] Lu, L., Tan, R.F., Chen, D.F., *et al.* (2019) Surface Plasmon Assisted Laser Ablation of Stainless Steel. *Nanotechnology*, **30**, Article 305401. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab1806>
- [10] Cheng, Y., Chen, C., Chen, X., *et al.* (2017) Considerably Enhanced Perovskite Solar Cells via the Introduction of Metallic Nanostructures. *Journal of Materials Chemistry A*, **5**, 6515-6521. <https://doi.org/10.1039/C6TA10715J>
- [11] Wang, J.Y., Hsu, F.C., Huang, J.Y., *et al.* (2015) Bifunctional Polymer Nanocomposites as Hole-Transport Layers for Efficient Light Harvesting: Application to Perovskite Solar Cells. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **7**, 27676-27684. <https://doi.org/10.1021/acsam.5b08157>

-
- [12] Lee, D.S., Kim, W., Cha, B.G., *et al.* (2016) Self-Position of Au NPs in Perovskite Solar Cells: Optical and Electrical Contribution. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **8**, 449-454. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b09365>
- [13] Spinelli, P., Hebbink, M., De Waele, R., *et al.* (2011) Optical Impedance Matching Using Coupled Plasmonic Nanoparticle Arrays. *Nano Letters*, **11**, 1760-1765. <https://doi.org/10.1021/nl200321u>
- [14] Atwater, H.A. and Polman, A. (2010) Plasmonics for Improved Photovoltaic Devices. *Nature Materials*, **9**, 205-213. <https://doi.org/10.1038/nmat2629>
- [15] Mertz, J. (2000) Radiative Absorption, Fluorescence, and Scattering of a Classical Dipole near a Lossless Interface: A Unified Description. *Journal of the Optical Society of America B*, **17**, 1906-1913. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.17.001906>
- [16] Zubko, E., Kimura, H., Shkuratov, Y., *et al.* (2009) Effect of Absorption on Light Scattering by Agglomerated Debris Particles. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **110**, 1741-1749. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2008.12.006>
- [17] Im, J.-H., Kim, H.-S. and Park, N.-G. (2014) Morphology-Photovoltaic Property Correlation in Perovskite Solar Cells: One-Step versus Two-Step Deposition of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$. *APL Materials*, **2**, Article 081510. <https://doi.org/10.1063/1.4891275>
- [18] Yu, Y.T., Zhang, Q.H. and Xu, B.Q. (2004) Shape-Controlled Syntheses of Metal Nanoparticles. *Progress in Chemistry*, **16**, 520-527.
- [19] Jang, T., Youn, H., Shin, Y.J., *et al.* (2014) Transparent and Flexible Polarization-Independent Microwave Broadband Absorber. *ACS Photonics*, **1**, 279-284. <https://doi.org/10.1021/ph400172u>
- [20] Wu, Y.Z., Ren, S.M., Xu, X.L., *et al.* (2014) Engineered Fluorescence of Quantum Dots via Plasmonic Nanostructures. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **126**, 113-119. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.03.050>
- [21] Lu, L., Zeng, W.Q., Hu, S.S., *et al.* (2018) Polarization-Dependent Fluorescence of CdSe/ZnS Quantum Dots Coupling to a Single Gold-Silver Alloy Nanotube. *Journal of Alloys and Compounds*, **731**, 753-759. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.10.053>
- [22] Li, Z.Q., Liang, X.Y., Li, G., *et al.* (2019) 9.2%-Efficient Core-Shell Structured Antimony Selenide Nanorod Array Solar Cells. *Nature Communications*, **10**, Article No. 125. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07903-6>