

# 银纳米颗粒增强CsPbIBr<sub>2</sub>钙钛矿光伏器件的模拟研究

黄友铭<sup>1</sup>, 吴以治<sup>1\*</sup>, 秦飞飞<sup>2</sup>, 刘玲<sup>1</sup>, 王会杰<sup>3</sup>, 张诗涵<sup>1</sup>, 安嘉凯<sup>1</sup>

<sup>1</sup>天津工业大学物理科学与技术学院, 天津

<sup>2</sup>南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京

<sup>3</sup>山西师范大学物理与信息工程学院, 山西 临汾

收稿日期: 2022年2月24日; 录用日期: 2022年3月23日; 发布日期: 2022年3月31日

## 摘要

在入射光的激发下, 银纳米颗粒(Ag NPs)表面发生的局域表面等离激元共振效应具有近场增强的作用, 这种效应有望增强对CsPbIBr<sub>2</sub>钙钛矿材料的激发态密度从而提高光伏器件的光电转换效率。另外, Ag NPs的前向散射会提高入射光的光程, 有助于提高光吸收。基于此, 本文设计了基于Ag NPs的局域表面等离激元增强型CsPbIBr<sub>2</sub>钙钛矿光伏器件, 利用Ag NPs改善结构为FTO/ZnO/CsPbIBr<sub>2</sub>/Carbon的CsPbIBr<sub>2</sub>光伏器件的性能。我们利用时域有限差分法对基于Ag NPs的局域表面等离激元增强型CsPbIBr<sub>2</sub>钙钛矿光伏器件结构进行了相关的数值模拟, 通过调控模型中FTO衬底表面上Ag NPs的间隔尺寸得到了具有不同Ag NPs表面覆盖比的CsPbIBr<sub>2</sub>钙钛矿光伏器件, 进而模拟得到器件的吸收率以及各光伏器件剖面的电场分布情况。模拟结果表明, Ag NPs的局域表面等离激元增强效应以及前向散射效应有望改善CsPbIBr<sub>2</sub>钙钛矿光伏器件的性能, 在理论上预言了本文设计的可行性, 也为实验制备高效CsPbIBr<sub>2</sub>光伏器件提供了一定的理论指导。

## 关键词

银纳米颗粒, 局域表面等离激元, 时域有限差分法, CsPbIBr<sub>2</sub>钙钛矿太阳能电池

# Simulation Study of Silver Nanoparticles Enhanced CsPbIBr<sub>2</sub> Perovskite Photovoltaic Devices

Youming Huang<sup>1</sup>, Yizhi Wu<sup>1\*</sup>, Feifei Qin<sup>2</sup>, Ling Liu<sup>1</sup>, Huijie Wang<sup>3</sup>, Shihan Zhang<sup>1</sup>, Jiakai An<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Physical Science and Technology, Tiangong University, Tianjin

<sup>2</sup>College of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing Jiangsu

\*通讯作者。

文章引用: 黄友铭, 吴以治, 秦飞飞, 刘玲, 王会杰, 张诗涵, 安嘉凯. 银纳米颗粒增强 CsPbIBr<sub>2</sub> 钙钛矿光伏器件的模拟研究[J]. 光电子, 2022, 12(1): 14-23. DOI: 10.12677/oe.2022.121002

<sup>3</sup>School of Physics and Information Engineering, Shanxi Normal University, Linfen Shanxi

Received: Feb. 24<sup>th</sup>, 2022; accepted: Mar. 23<sup>rd</sup>, 2022; published: Mar. 31<sup>st</sup>, 2022

## Abstract

Under the action of incident light, local surface plasmon resonance (LSPR) would appear around the surface of Ag Nano particles (NPs), and LSPR has the effect of near-field enhancement. In addition, Ag NPs possess the forward scattering effect to the incident light, which can also improve the performance of CsPbIBr<sub>2</sub>-based PSCs to some extent. Considering that these effects are expected to improve the performance of CsPbIBr<sub>2</sub> photovoltaic devices, Ag NPs are designed and prepared for LSP-enhanced CsPbIBr<sub>2</sub> photovoltaic devices. The specific design of this paper is to use Ag NPs for enhancing the performance of CsPbIBr<sub>2</sub> photovoltaic devices with the basic structure of FTO/ZnO/CsPbIBr<sub>2</sub>/Carbon. And then, the finite difference time domain (FDTD) method is employed to simulate the structure of the designed solar cell devices. The device models with different Ag NPs surface coverage ratio (SC) are obtained by controlling the interval size of Ag NPs on the FTO substrate surface. The simulated absorptivity and also the simulated electric field distribution of each cross section are obtained. By analyzing the simulation results, the feasibility of the design in this paper is verified theoretically, which also provides guidance for the subsequent experiments of CsPbIBr<sub>2</sub> perovskite solar cell.

## Keywords

Ag Nanoparticle, Local Surface Plasmons, Finite Difference Time Domain Method, CsPbIBr<sub>2</sub> Perovskite Solar Cells

Copyright © 2022 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

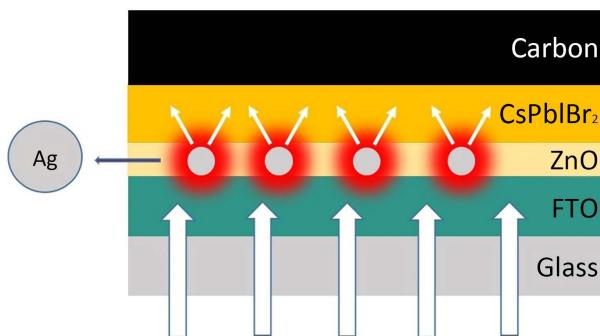
钙钛矿太阳能电池(PSCs)作为一种新型薄膜太阳能电池发展迅速，受到人们的广泛关注。从 2009 年发展至今，其光电转换效率(PCE)已经突破至 25.5%，被认为是最具发展潜力并有望实现商业化的太阳能电池之一[1] [2] [3] [4] [5]。在众多的钙钛矿材料中，CsPbIBr<sub>2</sub> 材料具有出色的稳定性，被应用于开发稳定性更高的全无机 PSCs。但是目前基于 CsPbIBr<sub>2</sub> 的全无机 PSCs 的效率普遍较低，且开路电压也有进一步提高的空间[6] [7] [8] [9] [10]。入射光的吸收能力对光伏器件的性能有着重要的影响，故而可以从提高器件对入射光的吸收的角度对 CsPbIBr<sub>2</sub> 基全无机 PSCs 的性能进行改善。目前表面等离激元在激光加工、太阳能光伏器件等领域皆有应用[11] [12]。利用表面等离激元来增强钙钛矿太阳能电池对入射光吸收的方法，虽然应用时间短、相关研究工作少却在相关领域中表现出很大的应用潜力。Chen [13] 和 Park [14] 调研组都做了将金纳米颗粒(Au NPs)掺入 PSCs 空穴传输层的一些工作，他们的结果显示，Au NPs 的表面等离激元特性能够很大程度上提高电池光吸收能力和光电流密度。Wang [15] 和 Snaith [16] 调研组又将 Au NPs 掺入 PSCs 介孔三氧化二铝结构中，结果同样表明表面等离激元可以增强电池光吸收性能。

本文设计了基于银纳米颗粒(Ag NPs)的局域表面等离激元增强型 CsPbIBr<sub>2</sub> 钙钛矿光伏器件，利用 Ag NPs 改善 FTO/ZnO/CsPbIBr<sub>2</sub>/Carbon 结构光伏器件的性能。此外，本文还通过能带图和数值模拟揭示了该

结构的合理性。通过时域有限差分法(FDTD)对所设计的器件结构进行了相应的模拟,得到了吸收率等数据曲线,并分析了不同表面覆盖比的Ag NPs的分布对器件的光吸收能力的影响。同时模拟得到光伏器件在x-y和x-z平面上的电场分布,并分析了Ag NPs的加入对器件的内部电场分布的影响。根据FDTD方法模拟得到的数据结果,分析Ag NPs的加入对PSCs电池器件的性能所起到的改善作用,模拟得到的结果对开展高效CsPbIBr<sub>2</sub>光伏器件的实验具有一定的指导作用。

## 2. 光伏器件结构与模型

诸多金属纳米颗粒(AuAg, Al等)中,Ag纳米颗粒因稳定性好且价格相对低廉,合成过程可控性高而得到广泛应用[17] [18]。在本研究中,我们将Ag纳米颗粒放置于器件的FTO衬底和ZnO层的界面处,如图1所示。理论上,当入射光照射银纳米颗粒时,会产生局域表面等离激元共振(LSPR)效应,且入射光散射时的角扩散会导致光程的增加[19] [20],从而增强器件的光吸收层对入射光的吸收,最终达到提高太阳能电池光电转换效率的目的。图1显示了本文所设计的器件结构,以及器件性能增强的原理。可以看到在入射光照射下,银纳米颗粒的LSPR近场增强效应将透过ZnO层作用到钙钛矿光吸收层,入射光在器件中的光程因银纳米颗粒前向散射效应而提高。而处于同种介质时,金属纳米颗粒光散射在正反方向一般是对称的[21]金属纳米颗粒在入射光的激发下,满足一定的色散关系时将会产生表面等离激元共振[22] [23] [24]。而这种局域在金属表面的表面等离激元实际上就是一种电磁场,这种电磁场的电场强度远远大于入射光场,形成近场增强效应。银纳米颗粒的局域场作用到CsPbIBr<sub>2</sub>钙钛矿材料光吸收层,由于极强的局域场提高了钙钛矿材料的激发态密度,从而增大了电子空穴对的产生概率。即使有部分电子空穴对发生复合,由于钙钛矿材料是直接带隙,也很容易重新利用辐射光子进而激发电子空穴对,有望极大地提高光生载流子的生成和分离能力。根据之前的研究,表面等离激元可以增强物质的荧光强度[25] [26],在钙钛矿光伏器件中,钙钛矿层的荧光强度与开路电压呈正相关,故而,将表面等离激元引入CsPbIBr<sub>2</sub>钙钛矿光伏器件,亦有望提高器件的开压。

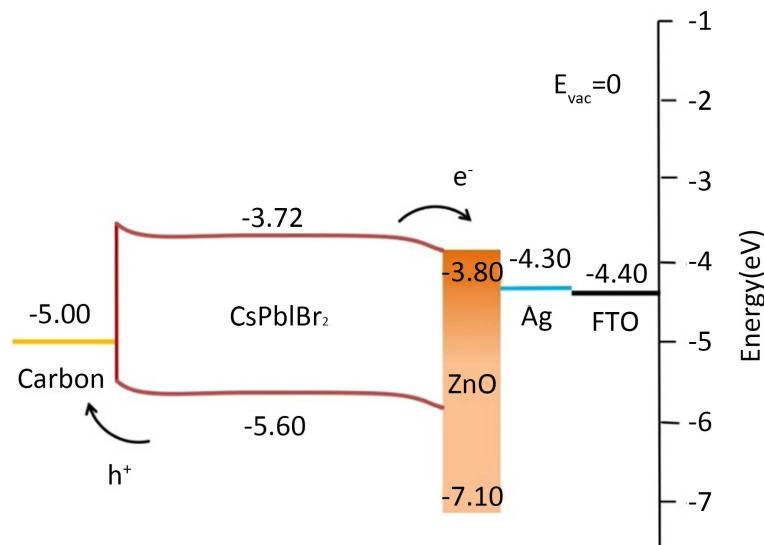


**Figure 1.** Schematic of the LSPR near field enhancement and forward scattering effect of Ag nanoparticles in all-inorganic CsPbIBr<sub>2</sub> perovskite solar cells

**图1.** 基于Ag NPs的局域表面等离激元增强型CsPbIBr<sub>2</sub>基PSCs器件的结构示意图

图2为FTO/(Ag NPs)/ZnO/CsPbIBr<sub>2</sub>/Carbon电池结构的能带示意图。CsPbIBr<sub>2</sub>钙钛矿吸收层吸收太阳光受激后,产生电子空穴对。电子经电子传输层(ZnO)注入到FTO(阳极),空穴则注入到碳电极(阴极),因此本文所设计的器件结构在理论上是科学可行的。

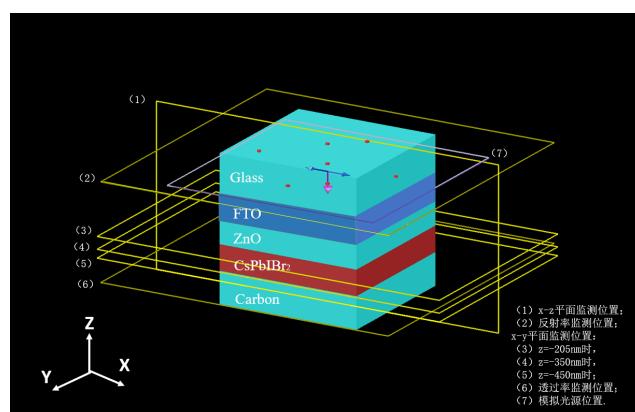
为了深入探究Ag NPs在入射光下的LSPR近场增强特性以及对入射光的前向散射对PSCs性能的影响,本文利用FDTD方法对整个器件建立了模型,对器件内部光场、光学性质进行数值模拟。模型设置及各监测平面位置,如图3所示,其中z方向使用完全匹配的边界条件,x/y方向使用周期性边界条件。



**Figure 2.** Energy band diagram of the perovskite solar cells based on FTO/Ag-NPs/ZnO/CsPbIBr<sub>2</sub>/Carbon structure

**图 2.** 基于 FTO/Ag-NPs/ZnO/CsPbIBr<sub>2</sub>/Carbon 结构的能带匹配示意图

根据设计的器件结构，构建了结构为玻璃/FTO (380 nm)/(Ag NPs) ZnO (200 nm)/CsPbIBr<sub>2</sub> (300 nm)/Carbon (20 μm) 的模型，单个球形银纳米颗粒被嵌入到 FTO/ZnO 界面处，而 FTO/ZnO 界面被设置为 z = 0 的 x-y 平面。其中玻璃层和碳浆涂层尺寸过厚，在建模时取了方便观测的尺寸，并不影响模拟结果。我们实验室实际制备出的纳米颗粒，尺寸不是固定的，其共振吸收峰宽较大。基于实验室的条件，将大小较为适中(直 150 nm 左右)的银纳米颗粒的尺寸用于模拟。模拟结果也为下一步将制备出的银纳米颗粒引入具体器件的实验进行指导。将银纳米颗粒的直径设置为 150 nm，通过改变两个粒子之间的间隔可以获得不同的表面覆盖比(SC)。为了避免银纳米颗粒与光吸收层直接接触，我们预期在银纳米颗粒与光吸收层中间加入一层 50 nm 的 ZnO 薄膜，故而组成了厚度为 200 nm 的 Ag/ZnO 复合结构。350~700 nm 范围内的平面波被设置成光源，照射到器件上。透射率监视器 T (器件最下方) 和反射率监视器 R (光源上方) 被用于记录器件的反射和吸收谱，并且定义光吸收 A = 1-T-R。电场监视器被放在距离银纳米颗粒不同距离的位置用于记录电磁场分布，监视波长为 605 nm。

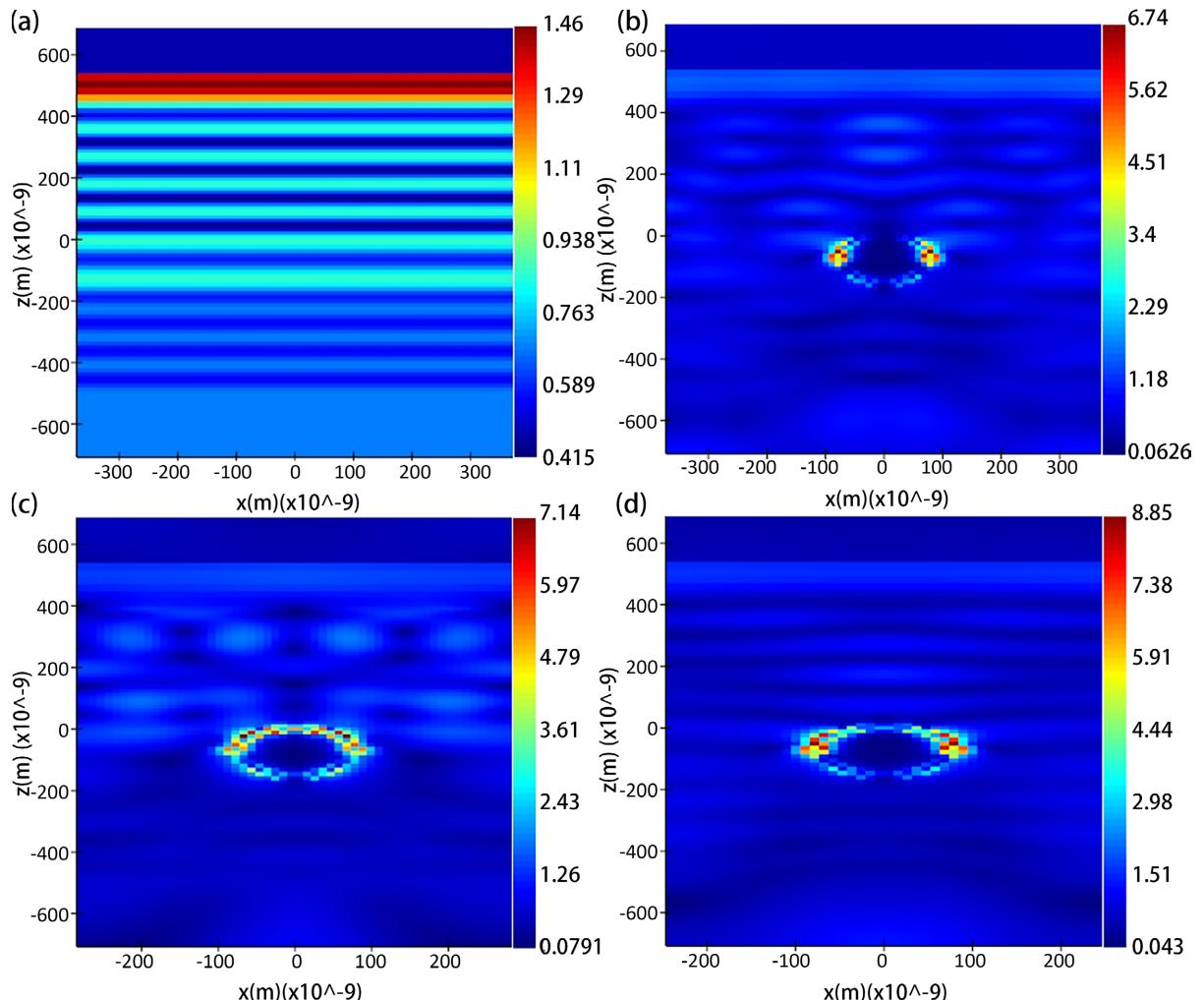


**Figure 3.** Simulation model diagram and monitoring positions of Ag-NPs enhanced CsPbIBr<sub>2</sub> perovskite photovoltaic device

**图 3.** Ag-NPs 增强型全无机 CsPbIBr<sub>2</sub> 钙钛矿光伏器件的模拟模型图及各监测位置

### 3. 结果与讨论

#### 3.1. 光伏器件的场分布分析



**Figure 4.** Simulated electric field distribution in x-z plane ( $y = 0$ ). The simulated electric field distribution of the whole device (a) SC = 0%, (b) SC = 5%, (c) SC = 10%, (d) SC = 15%.  $\lambda = 605$  nm

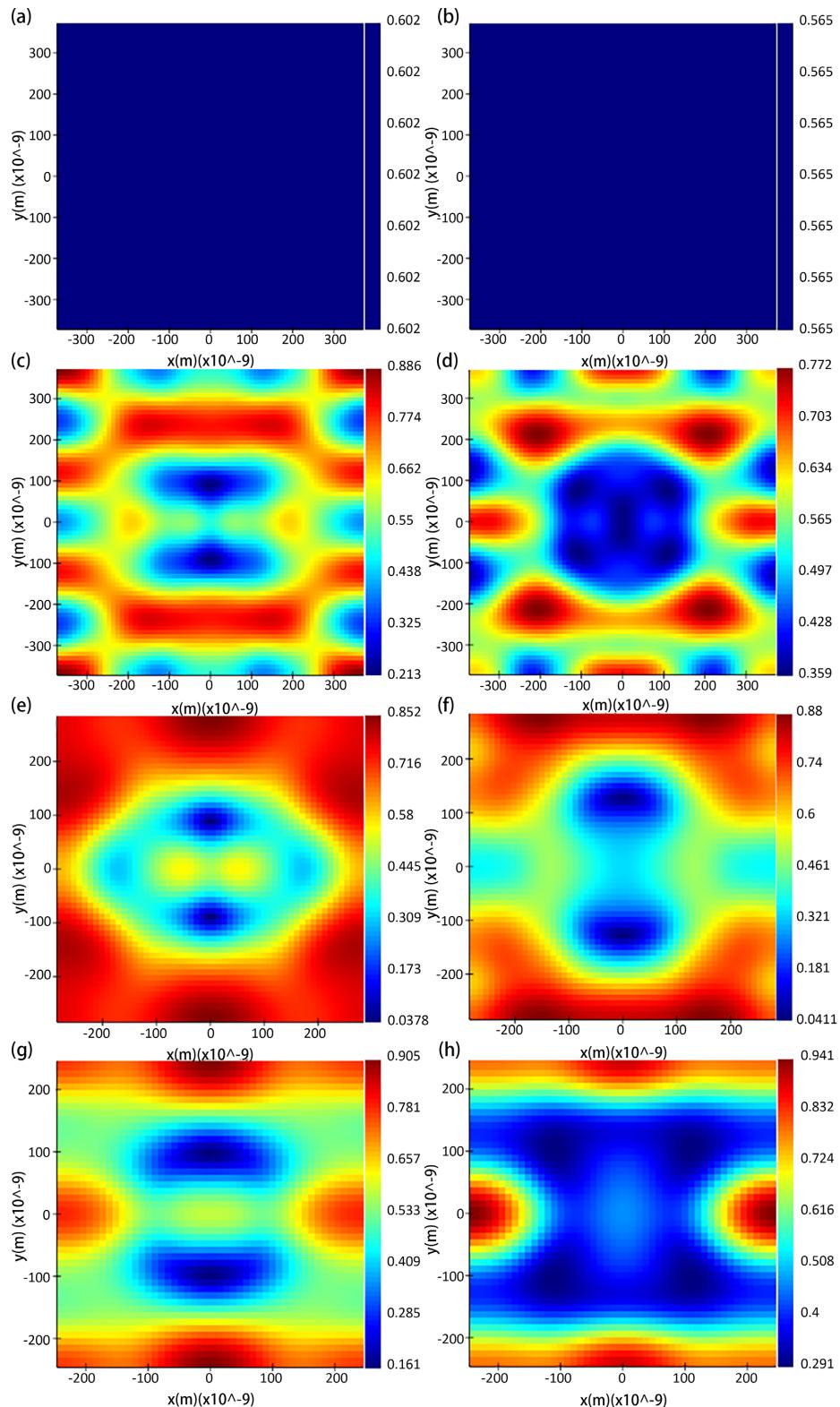
**图 4.**  $y = 0$  时，器件整体 x-z 平面的模拟电场分布(a) SC = 0%，(b) SC = 5%，(c) SC = 10%，(d) SC = 15%。其中  $\lambda = 605$  nm

图 4 显示了  $y = 0$  时，器件内部 x-z 平面电场的二维分布图，其中入射光波长为 605 nm，监测位置为图 3 中(1)处，取  $\lambda = 605$  nm 是由于  $\text{CsPbIBr}_2$  材料的吸收边大约在此处。图 4(a)~(d) 分别是银纳米颗粒表面覆盖比 SC = 0%、SC = 5%、SC = 10%、SC = 15% 的情况。总的来说，图 4 各图主要可以大致分为三个区域：1)  $0 \text{ nm} < z < 380 \text{ nm}$ , FTO 层；2)  $-200 \text{ nm} < z < 0 \text{ nm}$ , ZnO 层；3)  $-500 < z < -200 \text{ nm}$ ,  $\text{CsPbIBr}_2$  层。如图 4(b)~(d) 所示，光入射时，银纳米颗粒周围的电场明显增强，呈现出分散的红色黄色区域，表现出银纳米颗粒的 LSPR 近场增强特性；而银纳米颗粒内部为蓝色区域，由于趋肤效应，电场强度远低于其表面。随着银纳米颗粒表面覆盖比的增加，银纳米颗粒周围的电场最大值也随之增加，这可能是由于银纳米颗粒的增加导致更多的入射光在银纳米颗粒之间进行散射，从而导致银纳米颗粒的 LSPR 近场增强特性更加显著。在  $0 \text{ nm} < z < 380 \text{ nm}$  区域，由于入射光在照射到银纳米颗

粒表面时发生散射，加之银纳米颗粒的近场增强效应，使得电场得到明显增强；由于银纳米颗粒整体嵌在 $-200 \text{ nm} < z < 0 \text{ nm}$ 区域，导致其受到LSPR近场增强的影响显著，这个区域的电场也得到明显增强；在 $-500 \text{ nm} < z < -200 \text{ nm}$ 区域，有银纳米颗粒的情况场强普遍大于 $\text{SC} = 0\%$ 的情况，说明银纳米颗粒的引入增强了钙钛矿层的光吸收，这是银纳米颗粒对入射光的前向散射效应引起的，同时LSPR的近场增强效应可能透过覆盖银纳米颗粒的ZnO层对CsPbIBr<sub>2</sub>层产生了影响。在图4(b)~(d)中可以看到银纳米颗粒的位置，同时可以发现在其正下方区域，靠近两侧边缘的电场的强度明显高于其它地方，且整体显示出明显的角分布(angular distribution)，这是前向散射效应的一个特征。对比图4(b)~(d)，发现各图中颜色最深的区域， $\text{SC} = 10\%$ 时的电场强度最高， $\text{SC} = 15\%$ 的电场强度最小，这说明银纳米颗粒的用量并不是越多越好。综上所述，可以推断银纳米颗粒的引入可以增强器件对入射光的吸收，这种增强是由银纳米颗粒的近场增强效应和前向散射效应引起的，且 $\text{SC} = 10\%$ 时的增强效果可能较好。

图5(a)~(g)为 $z = -205 \text{ nm}$ 时x-y平面上即CsPbIBr<sub>2</sub>层的上边缘附近的模拟电场分布，图5(h)为 $z = -350 \text{ nm}$ 时x-y平面上的模拟电场分布。 $z = -205 \text{ nm}$ 时x-y平面的监测位置对应图3中的(3)， $z = -350 \text{ nm}$ 时x-y平面的监测位置对应图3中的(4)，入射光波长为605 nm。其中图5(a)，图5(b)为 $\text{SC} = 0\%$ 的情况，图5(c)，图5(d)为 $\text{SC} = 5\%$ 的情况，图5(e)，图5(f)为 $\text{SC} = 10\%$ 的情况，图5(g)，图5(h)为 $\text{SC} = 15\%$ 的情况。如图5(a)，图5(b)所示，没有银纳米颗粒时，x-y平面上的电场分布均匀，随着平面位置的下移，电场强度随之降低。另外可以在图5中看到，引入银纳米颗粒后的相应平面上出现了重新分布的明暗相间的光斑，这应该是以局域光场为二级光源，向前发射的光的干涉图样。图5(c)中的平面电场分布变得不均匀，红色和黄色区域的电场强度普遍要高于图5(a)中的对应区域，而平面中心以及平面周边的青色和蓝色区域的电场强度则明显低于图5(a)中对应区域，相应的，图5(d)中的平面电场分布相较于图5(b)也呈现出类似的特性。图5(c)，图5(d)中x-y平面内蓝色的区域应处于图5(b)中所示的银纳米颗粒下方，这个区域由于被银纳米颗粒遮挡，不能被入射光直接照射到，故而相对于x-y平面上的其它区域电场强度低，图5(e)~(h)中也存在这种现象。但是蓝色周围的电场强度与其它区域相比有十分明显的增强，这很大程度上是由于银纳米颗粒对入射光的前向散射造成的。

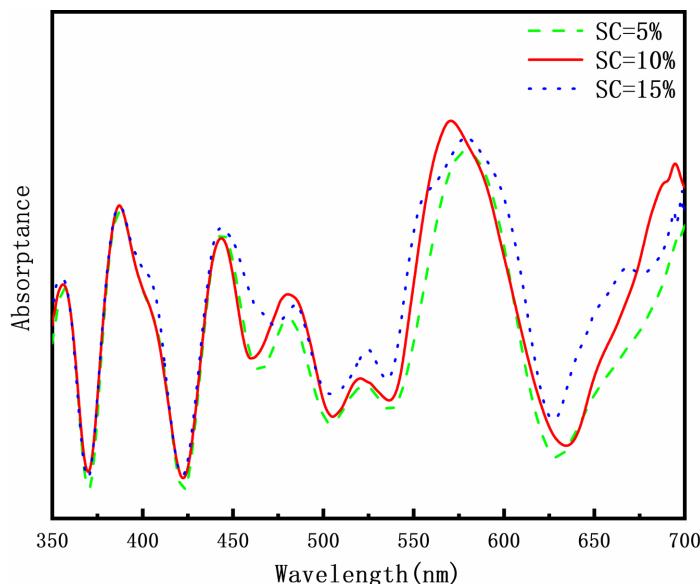
如图5(e)所示， $z = -205 \text{ nm}$ 的电场强度相较于图5(a)增强的区域面积大于图5(c)和图5(g)，钙钛矿其他吸收层的位置也有类似现象，图5(f)中电场强度( $z = -350 \text{ nm}$ )相较于图5(b)增强的区域面积大于图5(d)和图5(h)，这说明 $\text{SC} = 10\%$ 时，钙钛矿层有相对更多的区域对入射光能量的吸收被增强。图5(g)所示的平面内电场强度的最大值高于图5(a)~(e)，但是电场强度相较于图5(a)增强的区域面积小于图5(c)和图5(e)。此外，图5(g)平面中心电场强度提升不明显的蓝色区域相较图5(c)，图5(e)的更大。另外，随着平面位置的下移，图5(f)中场强的最大值及最小值均高于图(e)，类似的图5(h)中场强的最大值及最小值均高于图(g)。这是由于太阳光照射时，入射光会被银纳米颗粒前向散射，散射后的光路与其它入射光路可能在 $z = -350 \text{ nm}$ 时的x-y平面上相互干涉，导致了这种现象。光吸收层也因此会吸收更多的入射光，产生更多的光生载流子。结合图5(d)~(h)，模拟设置银纳米颗粒位于平面中心区域，随着监测平面在器件钙钛矿层中的位置的下移，远离ZnO/CsPbIBr<sub>2</sub>界面，同一x-y平面内电场强度提升明显的区域越远离平面中心，正如图5(b)~(d)中呈现的前向散射特征一样，整体显示出明显的角分布，这同样佐证了银纳米颗粒对入射光的前向散射效应是提升器件钙钛矿层的光吸收能力的重要因素。从图5中可以看到，引入银纳米颗粒后，其下方x-y平面的电场分布并不是均匀的，说明了电场的增强不能简单归因于银纳米颗粒的前向散射效应，也与LSPR近场增强效应有关。结合图4和图5的结果，有理由相信通过银纳米颗粒的近场增强和前向散射可以增强器件的光吸收，从而改善器件的性能。



**Figure 5.** Simulated electric field distribution ( $\lambda = 605$  nm) in x-y plane below the  $\text{CsPbIBr}_2$  layer: (a) (c) (e) (g)  $z = -205$  nm; (b) (d) (f) (h)  $z = -350$  nm. (a) (b) SC = 0%; (c) (d) SC = 5%; (e) (f) SC = 10%; (g) (h) SC = 15%.  $\lambda = 605$  nm

**图 5.** x-y 平面的模拟电场分布: (a) (c) (e) (g)  $z = -205$  nm; (b) (d) (f) (h)  $z = -350$  nm。其中(a) (b)为 SC = 0% 的情况, (c) (d)为 SC = 5% 的情况, (e) (f)为 SC = 10% 的情况, (g) (h)为 SC = 15% 的情况, 其中  $\lambda = 605$  nm

### 3.2. 银纳米粒子对光吸收的影响



**Figure 6.** Simulated absorptivity curves simulated by FDTD method  
**图 6.** 利用 FDTD 方法模拟得到的器件吸收率曲线

图 6 显示了具有不同银纳米颗粒表面覆盖比的  $\text{CsPbIBr}_2$  钙钛矿太阳能电池的吸收率。吸收率是通过模拟透过率和模拟反射率计算得出。反射率的监测位置所在的 FTO 层的上侧 x-y 平面, 即图 3 中(2)处。透过率的监测位置为碳电极靠近钙钛矿层的 x-y 平面, 即图 3 中(6)处。从图 6 吸收率的模拟图中可以看到吸收峰的位置约在 575 nm 处。银纳米颗粒的近场增强特性以及对入射光的前向散射, 使得器件整体的吸收率随着银纳米颗粒表面覆盖比的增加都有不同程度的提升, 其中  $\text{SC} = 10\%$  的情况吸收率最高。 $\text{SC} = 15\%$  的吸收率低于  $\text{SC} = 10\%$  的情况, 说明器件对入射光的吸收虽然可以被银纳米颗粒增强, 但是增强效果与银纳米颗粒的表面覆盖比并不是严格呈正相关的, 过量的银纳米颗粒反而会使得器件对入射光的吸收相对减弱。另外  $\text{CsPbIBr}_2$  钙钛矿材料的禁带宽度约为 2.05 eV, 理论上不能够吸收 605 nm 以内的太阳光。而从图中可以发现, 波长高于 605 nm 的区域, 也有一定的吸收, 原因是这部分的入射光被银纳米颗粒吸收并被热耗散。从模拟结果来看, 银颗粒覆盖比为  $\text{SC} = 10\%$  的器件吸收率高, 预期增强效果好, 比较适合制备光伏器件。

## 4. 结论

本文设计了一种基于银纳米颗粒的局域表面等离激元增强型  $\text{CsPbIBr}_2$  钙钛矿太阳能电池, 通过时域有限差分方法对所设计的器件结构进行相应的数值模拟, 得到吸收率数据曲线, 并分析了不同表面覆盖比的银纳米颗粒对器件的光吸收能力的影响。同时模拟了光伏器件内部 x-y 和 x-z 平面的电场分布, 分析了银纳米颗粒的加入对器件的内部电场分布的影响。模拟结果表明, 银纳米颗粒的加入有利于提高  $\text{CsPbIBr}_2$  基 PSCs 器件的光吸收能力, 并通过分析得到,  $\text{CsPbIBr}_2$  基 PSCs 光吸收能力的增强, 是由银纳米颗粒的 LSPR 近场增强和前向散射效应引起的。从模拟结果来看, 当银纳米颗粒表面覆盖比为 10% 时, 制备的光伏器件性能可能较好。

## 基金项目

天津市教委科研计划项目(2017KJ097); 国家自然科学基金青年项目(No. 21802092)。

## 参考文献

- [1] Qin, M., Xue, H., Zhang, H., Hu, H., Liu, K., Li, Y., et al. (2020) Precise Control of Perovskite Crystallization Kinetics via Sequential a-Site Doping. *Advanced Materials*, **32**, Article ID: 2004630. <https://doi.org/10.1002/adma.202004630>
- [2] Cheng, Y.H., So, F. and Tsang, S.W. (2019) Progress in Air-Processed Perovskite Solar Cells: From Crystallization to Photovoltaic Performance. *Materials Horizons*, **6**, 1611-1624. <https://doi.org/10.1039/C9MH00325H>
- [3] Kojima, A., Teshima, K., Shirai, Y., et al. (2009) Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells. *Journal of the American Chemical Society*, **131**, 6050-6051. <https://doi.org/10.1021/ja809598r>
- [4] Correa-Baena, J.P., Abate, A., Saliba, M., et al. (2017) The Rapid Evolution of Highly Efficient Perovskite Solar Cells. *Energy & Environmental Science*, **10**, 710-727. <https://doi.org/10.1039/C6EE03397K>
- [5] Wu, T., Qin, Z., Wang, Y., et al. (2021) The Main Progress of Perovskite Solar Cells in 2020-2021. *Nano-Micro Letters*, **13**, 18. <https://doi.org/10.1007/s40820-021-00672-w>
- [6] Ma, Q., Huang, S., Wen, X., et al. (2016) Hole Transport Layer Free Inorganic CsPbIBr<sub>2</sub> Perovskite Solar Cell by Dual Source Thermal Evaporation. *Advanced Energy Materials*, **6**, Article ID: 1502202. <https://doi.org/10.1002/aenm.201502202>
- [7] Aamir, M., Adhikari, T., Sher, M., et al. (2018) Fabrication of Planar Heterojunction CsPbBr<sub>2</sub>I Perovskite Solar Cells Using ZnO as an Electron Transport Layer and Improved Solar Energy Conversion Efficiency. *New Journal of Chemistry*, **42**, 14104-14110. <https://doi.org/10.1039/C8NJ02238K>
- [8] Zhang, Q., Zhu, W., Chen, D., et al. (2019) Light Processing Enables Efficient Carbon-Based, All-Inorganic Planar CsPbIBr<sub>2</sub> Solar Cells with High Photovoltages. *Acs Applied Materials & Interfaces*, **11**, 2997-3005. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b17839>
- [9] Zhu, W., Zhang, Q., Chen, D., et al. (2018) Intermolecular Exchange Boosts Efficiency of Air-Stable, Carbon-Based All-Inorganic Planar CsPbIBr<sub>2</sub> Perovskite Solar Cells to over 9%. *Advanced Energy Materials*, **8**, Article ID: 1802080. <https://doi.org/10.1002/aenm.201802080>
- [10] Du, J., Duan, J., Yang, X., et al. (2021) p-Type Charge Transfer Doping of Graphene Oxide with (NiCo)(1-y)FeyOx for Air-Stable, All-Inorganic CsPbIBr<sub>2</sub> Perovskite Solar Cells. *Angewandte Chemie-International Edition*, **60**, 10608-10613. <https://doi.org/10.1002/anie.202016703>
- [11] Lu, L., Tan, R., Chen, D., et al. (2019) Surface Plasmon Assisted Laser Ablation of Stainless Steel. *Nanotechnology*, **30**, Article ID: 305401. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab1806>
- [12] 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>
- [13] 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/acsami.5b08157>
- [14] 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>
- [15] Cui, J., Chen, C., Han, J., et al. (2016) Surface Plasmon Resonance Effect in Inverted Perovskite Solar Cells. *Advanced Science*, **3**, Article ID: 1500312. <https://doi.org/10.1002/advs.201500312>
- [16] Zhang, W., Saliba, M., Stranks, S.D., et al. (2013) Enhancement of Perovskite-Based Solar Cells Employing Core-Shell Metal Nanoparticles. *Nano Letters*, **13**, 4505-4510. <https://doi.org/10.1021/nl4024287>
- [17] 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>
- [18] Mokkapati, S., Beck, F.J., De Waele, R., et al. (2011) Resonant Nano-Antennas for Light Trapping in Plasmonic Solar Cells. *Journal of Physics D—Applied Physics*, **44**, Article ID: 185101. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/18/185101>
- [19] Atwater, H.A. and Polman, A. (2010) Plasmonics for Improved Photovoltaic Devices. *Nature Materials*, **9**, 205-213. <https://doi.org/10.1038/nmat2629>
- [20] 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—Optical Physics*, **17**, 1906-1913. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.17.001906>
- [21] Chylek, P. (1986) Absorption and Scattering of Light by Small Particles. *Applied Optics*, **25**, 3166.
- [22] 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 CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub>. *APL Materials*, **2**, Article ID: 081510. <https://doi.org/10.1063/1.4891275>

- 
- [23] Ahmadi, T.S., *et al.* (1996) Shape-Controlled Synthesis of Colloidal Platinum Nanoparticles. *Science (New York, NY)*, **272**, 1924-1926. <https://doi.org/10.1126/science.272.5270.1924>
  - [24] 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>
  - [25] Wu, Y., Ren, S., Xu, X., *et al.* (2014) Engineered Fluorescence of Quantum Dots via Plasmonic Nanostructures. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **126**, 113-119. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.03.050>
  - [26] Liu, L., Zeng, W., Hu, S., *et al.* (2017) 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>