Optoelectronic

Open

Access

ORIGINAL ARTICLE

The Effect of Au Nanocomposites Periodic Array on the Efficiency of Lead-Free Double Perovskite Solar Cells

Neda Ahmadi^{*}

1 Assistant professor, Department of Basic Sciences, Garmsar Branch, Islamic Azad University, Garmsar, Iran.

Correspondence Neda Ahmadi Email: <u>n.ahmadi@srbiau.ac.ir</u>

How to cite

Ahmadi, N. (2024). The Effect of Au Nanocomposites Periodic Array on the Efficiency of Lead-Free Double Perovskite Solar Cells. Optoelectronic, 6(3), 47-54.

ABSTRACT

In this work, a lead-free double perovskite solar cell has been investigated and the effect of a periodic array of spherical Au nanoparticles coated with Silica (Au@SiO2) and Titania (Au@TiO2) nanorod has been studied and compared to the effect of bare Au nanoparticles. We propose a p-i-n perovskite solar cell with architecture ITO/PEDOT:PSS/ Cs2AgBiBr6/ Tio2/ Ag. In this study, three-dimensional Finite-difference Time-domain method utilizing FDTD module of Ansys-Lumerical software has been used and the wavelength range is from ultraviolet, 300nm to near-infrared (NIR), 1100 nm. The effect of these nanoparticles on light absorption, electric field intensity, short-circuit current density, generation rate, and current from the simulation device has been investigated. The results show that the effect of Au@TiO2 on the efficiency enhancement of solar cells is higher than other nanoparticles. In addition, the current from the simulation device increases by 17.8%, short-circuit current density is enhanced by 17.85%, and the maximum generation rate grows 100 times. This result is due to the plasmonic near-field of nanoparticles and light scattering from them. Moreover, the place of Au@SiO2 periodic array has been changed and the effect of nanoparticles' location inside the perovskite layer has been investigated.

K E Y W O R D S Solar Cells, Lead-Free Perovskite, Plasmonic Effect, FDTD Method.

© 2023, by the author(s). Published by Payame Noor University, Tehran, Iran. This is an open access article under the CC BY 4.0 license (<u>http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</u>). https://jphys.journals.pnu.ac.ir

تاريخ دريافت: 1402/12/19 تاريخ پذيرش: 1403/02/15 DOI: 10.30473/jphys.2024.70613.1187

^{فصلنامه علمی} ا**پتوالکترونیک**

«مقاله پژوهشی»

اثر آرایه تناوبی نانوکامپوزیتهای طلا بر بهرهوری سلولهای خورشیدی پروسکایت دوگانه بدون سرب

ندا احمدی*

1 استادیار، گروه علوم پایه، واحد گرمسار، دانشگاه آزاد اسلامی، گرمسار، ایران.

چکیدہ

در این مقاله، یک سلول خورشیدی پروسکایت دوگانه بدون سرب مورد مطالعهٔ عددی قرار گرفته است و اثر آرایههای تناوبی نانوذرات کروی طلای یوشش داده شده با نانو میلههای سیلیکا¹ و تیتانیا² روی کارایی سلول خورشیدی مطالعه شده و با اثر آرایهٔ نانوذرات طلای خالص مقایسه شده است. ساختار سلول خورشیدی پروسکایت پیشنهادی به صورت p-i-n بوده و معماری اَن به صورت /ITO/PEDOT: PSS Cs2AgBiBr6/ TiO2/Ag است. در این مطالعه از روش تفاضل المان محدود در حوزه زمانی سه بعدی با استفاده از ماژول FDTD پکیج نرمافزاری Ansys-Lumerical استفاده شده است. این مطالعه در محدوهٔ طول موج نور فرابنفش، 300 نانومتر تا مادون قرمز نزدیک، 1100 نانومتر انجام شده و طيف جذب نور، شدت ميدان الكتريكي، نرخ توليد زوج الكترون - حفره، چگالي جريان اتصال كوتاه و جریان خروجی از سلول خورشیدی محاسبه گردیده است. در این تحقیق مشاهده شد که تاثیر Au@TiO2 در افزایش کارایی سلول خورشیدی بیشتر از بقیه نانوذرات است. نتایج این مطالعه نشان ميدهد كه به كار بردن نانوذرات Au@Tio2 باعث افزايش 17/8% جريان الكتريكي خروجي از سلول و افزایش 17/85% جریان اتصال کوتاه میشود. همچنین وجود این نانوذرات سبب افزایش 100 برابری ماكزيمم نرخ توليد الكترون- حفره شده است. اين افزايش كارايي ميتواند به دليل ميدان نزديك پلاسمونی و نوع پراکندگی امواج از طریق این ذرات باشد. همچنین با تغییر مکان نانو آرایه Au@SiO2 در قسمت بالایی، میانی و پایینی لایه پروسکایت، تاثیر مکان نانوذرات بر روی کارایی سلولهای خورشیدی مطالعه شد.

> نویسنده مسئول: ندا احمدی رایانامه: <u>n.ahmadi@srbiau.ac.ir</u> سلول خورشیدی، پر

سلول خورشیدی، پروسکایت بدون سرب، اثر پلاسمونیک، روش تفاضل المان محدود در حوزه زمانی.

استناد به این مقاله:

ندا احمدی (1403). اثر آرایه تناوبی نانوکامپوزیتهای طلا بر بهرموری سلولهای خورشیدی پروسکایت دوگانه بدون سرب. فصلنامه علمی اپتوالکترونیک، 6(3), 47-54. https://jphys.journals.pnu.ac.ir

¹ Au@SiO2

² Au@TiO2

مقدمه

امروزه با توجه به آلودگیهای زیست محیطی حاصل از استفاده از سوختهای فسیلی، استفاده از انرژی خورشیدی به عنوان یکی از منابع تجدیدپذیر انرژی بسیار مورد توجه قرار دارد. اثر فوتوولتایک به عنوان پدیدهای که می تواند انرژی خورشیدی را به انرژی الکتریکی تبدیل کند، استفاده شده است و به این خاطر تحقیق بر روی سلولهای خورشیدی به صورت گسترده انجام می گیرد. انواع موادی که به عنوان لایه جاذب نور در سلول های خورشیدی استفاده می شوند شامل مواد غیر آلی به ویژه سیلیکون، مواد آلی و مواد پروسکایت است [3-1]. اساس کار تکنولوژی فوتوولتاییک تولید الکترون از نور تابیده شده است. اگر چه استفاده از سلول های خورشیدی سیلیکونی هنوز بخش عمدهای از بازار فوتوولتاییک را به خود اختصاص داده است [4] اما با توجه به قيمت بالاي مراحل ساخت سلولهاي خورشیدی سیلیکونی تحقیق بر روی ساخت انواع دیگر سلول های خورشیدی از جمله سلول های خورشیدی پروسکایت در سالهای اخیر گسترش یافته است.

مواد پروسکایت تشکیل شدهاند از طیف وسیعی از مواد با فرمول ABX3 که A یک کاتیون آلی یا غیر آلی است، B یک یون فلزی دو ظرفیتی و X یک آنیون هالوژن است. سلولهای خورشیدی پروسکایت در سالهای اخیر پیشرفت چشمگیری داشتهاند و راندمان تبدیل توان¹ آنها به 25% رسیده است [5]. مواد پروسکایت دارای مزایایی از قبیل قیمت پایین، بازدهی بالا، فرایند ساخت ساده، قابلیت تنظیم بند گپ و خواص الکتریکی و اپتیکی عالی هستند [6-7].

بسیاری از مواد پروسکایتی استفاده شده در سلولهای خورشیدی به صورت ترکیبات مبتنی بر سرب² هستند [34]. سرب به عنوان یک ماده سمی، یرای محیط زیست مضر بوده و به همین جهت محدودیتهایی برای استفاده از آن در محیط زیست وجود دارد [11-8]. برای جایگزین کردن سرب محققان زیادی در حال بررسی انواع مختلفی از یونهای فلزی برای سلولهای خورشیدی پروسکایت هستند. یکی از این فلزات که شباهتهای فیزیکی و الکترونیکی زیادی به سرب دارد، قلع شباهتهای فیزیکی و الکترونیکی زیادی به سرب دارد، قلع بر قلع، راندمان تبدیل توان قابل قبولی را نشان ندادهاند [12]. به این ترتیب تحقیقات گستردهای روی مواد جدید برای جایگزینی با مواد پروسکایت مبتنی بر سرب انجام شده است جایگزینی با مواد پروسکایت مبتنی بر سرب انجام شده است

Cs2AgBiBr6 است که سلولهای خورشیدی ساخته شده با آن به عنوان سلول خورشیدی پروسکایت دوگانه نام گرفت [18]. با توجه به پايين بودن جذب نور در مواد پروسكايت، به ویژه در نواحی طول موج نزدیک به مادون قرمز، میتوان روشهای مختلفی را برای افزایش جذب نور در این سلولهای خورشیدی به کار گرفت [21-19]. یکی از رایجترین این روشها استفاده از نانوذرات پلاسمونیک است. استفاده از این نانوذرات فلزی باعث می شود که قابلیت جذب نور در لایه جاذب بالا رود و به این ترتیب امکان ساخت سلول های خورشیدی پروسکایت با لایه جاذب خیلی نازک به وجود میآید [22]. نوعی از نانوذرات به کار گرفته شده در لایه جاذب سلول های خورشیدی، نانوذرات پیچیده شده در یک ماده عایق است. این ساختار باعث افزایش بیشتر کارایی سلولهای خورشیدی می شود به دلیل اینکه ماده عایق از تماس مستقیم فلز با لایه جاذب جلوگیری کرده و به این ترتیب بازترکیب الكترون - حفره كاهش مي يابد [33،23].

در این مقاله با معرفی نوع جدیدی از نانوذرات، اثر آرایه تناوبی از نانوذرات کروی طلا پوشیده شده با نانو میلههای سیلیکا³ و تیتانیا⁴ بر ویژگیهای اپتوالکترونیکی سلول خورشیدی پروسکایت Cs2AgBiBr6 بررسی شده و مشخص گردید که در طول موجهای نزدیک مادون قرمز به دلیل وجود این نوع نانوذرات افزایش جذب نور به وجود آمده است. نتایج به دست آمده با اثر آرایهٔ نانوذرات کروی طلای خالص مقایسه شده است.

جزييات محاسبات

در سالهای اخیر مدلهای مختلفی از نانو کامپوزیتها ساخته شده و اثر آنها در پزشکی و صنعت بررسی شده است [24]. در این مقاله، نانوذرات کروی طلا در داخل نانو میلههای سیلیکا و تیتانیا پیشنهاد داده میشود و تاثیر آرایهٔ تناوبی این نانو کامپوزیتها بر ویژگیهای اپتوالکترونیکی سلول خورشیدی پروسکایت بررسی می گردد. شکل 1 تصویر سلول خورشیدی پیشنهادی را نشان میدهد. ما میتوانیم آرایهای تناوبی از نانوذرات طلای پوشیده شده با نانومیلههای سیلیکا، Au@SiO2 دا مشاهده کنیم. در مرحله بعد Au@SiO2 دا جایگزین Au@SiO2 خواهیم کرد.

در این ساختار از PEDOT:PSS⁵ با ضخامت 50 نانومتر به عنوان لایه هدایت کننده حفره استفاده شده است و همچنین

¹ Power Conversion Efficiency (PCE)

² Methylammoniu Lead Trihalide, CH3NH3PbX3

³ SiO2

⁴ Tio2

⁵ Poly(3,4-Ethylenedioxythiophene) Polystyrene Sulfonate

Tio2 با ضخامت 70 نانومتر به عنوان لایه هدایت کننده الکترون به کار رفته است. مشخصات این مواد به ترتیب از [25-26] استخراج شده است. همچنین از اکسید قلع ایندیوم ، ITO با ضخامت 178 نانومتر به عنوان آند، و نقره، Ag با ضخامت 150 نانومتر به عنوان کاتد استفاده شده است که ویژگیهای اپتیکی این مواد به ترتیب از [28-27] استخراج شده است. ضمنا لایه فعال این سلول خورشیدی ¹Cs2AgBiBr6 است. ضمنا لایه فعال این سلول خورشیدی ¹Cs2AgBiBr6 بدست آمده است. نانوذرات طلا ی کروی به کار رفته در این بدست آمده است. نانوذرات طلا ی کروی به کار رفته در این سلول خورشیدی دارای شعاع 30 نانومتر بوده و مشخصات اپتیکی طلا از [28] استخراج شده است. همچنین ارتفاع نانو میلهها 100 نانومتر و ضخامت آنها 30 نانومتر میباشد. مشخصات اپتیکی SiO2 نیز از [30] به دست آمده است.

در این مطالعه از روش تفاضل المان محدود در حوزه زمانی سه بعدی، ماژول FDTD نرمافزار Ansys-Lumerical نور استفاده شده است و دمای شبیه سازی 300 کلوین است. نور تابیده شده در این شبیه سازی موج تخت بوده و طول موج به کار رفته از 300نانومتر تا 1100 نانومتر است.

بحث و نتايج

در این بخش ابتدا طیف نور جذب شده توسط لایه پروسکایت از طول موج 300 تا 1100 نانومتر برای حالتهای مختلف بدون نانوذره (رفرنس)، با نانوذرات طلا، با نانو کامپوزیتهای Au@SiO2 و Au@TiO2 بررسی می شود. شکل 2 طیف جذب نور از محدوده نور فرابنفش تا محدوده نزدیک فروسرخ را نشان می دهد.



شكل 1. ساختار سلول خورشيدى پروسكايت پيشنهادى

در این شکل مشخص است که شدت جذب نور در طول موج 436 نانومتر به شدت کاهش مییابد. این اتفاق به این

دلیل رخ میدهد که ضریب خاموشی² ماده پروسکایت Cs2AgBiBr6 در این طول موج به شدت کاهشی است [29]. همچنین از این شکل میتوان دید که اضافه کردن آرایهٔ تناوبی نانوذرات مختلف، می تواند میزان جذب نور را افزایش دهد و این تاثیر به ویژه در طول موجهای بیش از 600 نانومتر بیشتر می باشد. همچنین به نظر می رسد که تاثیر نانوذرات Au@TiO2 نسبت به سایر نانوذرات بیشتر است. ما میتوانیم 2 قله را در طول موجهای 660 نانومتر و 816 نانومتر برای این ذرات مشاهد کنیم. این پدیده به دلیل میزان پراکندگی نور و شدت ميدان الكتريكي اطراف نانوذرات است [31]. دليل همگرایی طیف جذب نور در طول موجهای بالاتر از 1000 نانومتر، میزان ضریب شکست و ضریب جذب لایههای تشکیل دهنده سلول و نانوذرات در این طول موجها است که در نهایت باعث شباهت طيف جذبى سلول خورشيدى براى ساختارهاى مختلف می شود. در مرحله بعد، شدت میدان الکتریکی در لایه پروسکایت ارزیابی می شود. شکل3 (a-d) میدان الکتریکی را در لايه پروسکايت در طول موج مرئي 402 نانومتر براي حالتهای مختلف نشان میدهد. از شکل 3 مشخص است که شدت میدان الکتریکی در اطراف نانوذرات Au@Tio2 بیشتر از سایر حالتها است. علاوه بر این ما شدت میدان الکتریکی را در داخل ماده پروسکایت در 4 حالت، در طول موج 1100 نانومتر بررسی کردیم. شکل 4 (a-d) شدت میدان الکتریکی را



شکل 2. طیف جذب نور توسط لایه پروسکایت برای حالتهای بدون نانو ذره (رفرنس)، با نانوذرات طلا، با نانودرات طلای پوشیده شده با سیلیکا، با نانوذرات پوشیده شده با تیتانیا.

در طول موج 1100 نانومتر در حالتهای مختلف نشان میدهد. در این طول موج نیز شدت میدان الکتریکی در اطراف نانوذرات Au@TiO2 از بقیه حالتها بیشتر است. علت تفاوت در شکل 3 و 4 تغییر ضریب شکست اطراف نانوذرات با تغییر طول موج است [32]. به طور کلی دو پدیدهٔ افزایش پراکندگی نور و افزایش شدت میدان الکتریکی در اطراف نانوذرات در طول موجهای مختلف باعث افزایش جذب نور و افزایش تولید زوج

¹ Cesium Silver Bismuth Bromide

² Extinction Coefficient

الکترون و حفره می گردد.



شکل 3. توزیع میدان الکتریکی درطول موج 402 نانومتر (a) حالت استاندارد بدون نانوذرات، (b) با آرایهٔ تناوبی نانوذرات طلا، (c) با آرایه تناوبی نانوذرات Au@SiO2 , (d) با آرایه تناوبی نانوذرات Au@TiO2



شکل 4. توزیع میدان الکتریکی درطول موج 1100 نانومتر (a) حالت بدون نانوذرات، (d) با آرایهٔ تناوبی نانوذرات طلا، (c) با آرایه تناوبی نانوذرات (d) Au@SiO2 با آرایه تناوبی نانوذرات Au@TiO2

شکل 5 (a-d) نرخ تولید الکترون- حفره را در لایه پروسکایت در حالتهای مختلف بدون نانوذرات و با آرایه تناوبی از نانوذرات مختلف نشان میدهد. همان گونه که در قسمتهای قبل توضیح داده شد، اثر نانوذرات Au@TiO2 در افزایش جذب نور و افزایش شدت میدانهای الکتریکی در اطراف آنها در طول موجهای مختلف، از سایر نانوذرات بیشتر است و بنابراین انتظار میرود که میزان تولید زوج الکترون -

حفره در لایه پروسکایت، با نانوذرات Au@TiO2 نسبت به سایر حالتها بیشتر باشد. با توجه به شکل 5 میتوان افزایش مقدار تولید زوج الکترون- حفره را در لایه پروسکایت دارای آرایه تناوبی Au@TiO2 مشاهده کرد.



شکل 5 . نرخ تولید الکترون حفره در لایه پروسکایت در حالت (a) بدون نانوذرات، (b) با آرایه تناوبی نانوذرات طلا، (c) با آرایه تناوبی نانوذرات Au@SiO2 (d) با آرایه تناوبی نانوذرات Au@TiO2

جدول (1) مشخصات سلول خورشیدی پیشنهادی را برای مقایسه بهتر نشان میدهد.

خورشي	ىلولھاى	فوتوولتاييک م	مشخصات	.1	جدول
-------	---------	---------------	--------	----	------

د

ماكزيمم نرخ توليد الكترون - حفر	جریان اتصال کوتاہ	جریان (A)	نوع سلول خورشیدی
$\frac{s}{m^3}$ °	$mA_{/cm^2}$		
2/45×10 ²⁷	11/20	4/10×10 ⁻¹¹	سلول خورشیدی رفرنس
2/06×10 ²⁹	12/59	4/61×10 ⁻¹¹	سلول خورشیدی با ذرات طلا
1/74×10 ²⁹	12/04	4/ 41×10 ⁻¹¹	سلول خورشیدی با Au@SiO2
5/86×10 ²⁹	13/20	4/83×10 ⁻¹¹	سلول خورشیدی با Au@TiO2

در این مرحله مکان نانو آرایهٔ تناوبی Au@SiO2 را تغییر میدهیم و 3 پیکربندی مختلف ایجاد میکنیم (a) نانوکامپوزیتها در بالا و در فصل مشترک PEDOT:PSS و (b) Cs2AgBiBr6 (c) در وسط لایه پروسکایت و (c)) در پایین لایه پروسکایت و مشخصات فوتوولتاییک سلول خورشیدی را بررسی میکنیم. شکل 6 طیف جذب نور برای این 3 ساختار را نشان میدهد. همان گونه که از شکل 6 مشخص است در

طول موجهای میان 550 – 750 نانومتر کمترین مقدار جذب مربوط به پیکربندی نوی c است



شکل 6. طیف جذب نور توسط لایه پروسکایت در پیکربندهای مختلف سلول خورشیدی. در سایر طول موجها تفاوت قابل ملاحظهای میان طیف نور جذبی در این 3 نوع پیکربندی مشاهده نمی شود. شکل 7

جدول 2. مشخصات فوتوولتاييك پيكر بندىهاى مختلف

ماكزيمم نرخ توليد	جريان اتصال كوتاه	(A) 1	نوع
الكترون-حفره <u>s</u> سع الكترون	$^{mA}/_{cm^2}$	جریان (A)	پيكربندى
1/74×10 ²⁹	12/04	4/ 41×10 ⁻¹¹	а
1/53×10 ²⁹	12/09	4/ 43×10 ⁻¹¹	b
1/17×10 ²⁹	11/08	4/ 32×10 ⁻¹¹	c

مکان نانوذرات را در پایین و وسط لایه پروسکایت نشان میدهد. در جدول 2 مشخص است که پارامترهای فوتوولتاییک برای پیکربندهای مختلف با یکدیگر تفاوت قابل ملاحظهای ندارند و این امر با توجه به شکل 6 قابل پیشبینی بود.





نتيجهگيرى

در این پژوهش، یک مدل سلول خورشیدی پروسکایت دوگانهٔ بدون سرب p-i-n بررسی شد و اثر آرایههای تناوبی نانوذرات کروی طلا، نانوذرات کروی طلا پوشیده شده با نانو میلههای سیلیکا و نانوذرات طلا پوشیده شده با نانومیلههای تیتانیا، روی ویژگیهای فوتوولتاییک آن بررسی شد. این پژوهش محاسباتی با استفاده از روش تفاضل المان محدود در حوزه زمانی سه بعدی انجام شد و نتایج آن نشان داد که اثر آرایه تناوبی نانوکامیوزیت Au@TiO2 در جذب نور در لایه پروسکایت به ویژه در طول موجهای نزدیک مادون قرمز نسبت به سایر نانوذرات بیشتر است. همچنین مشخص شد که شدت میدان الکتریکی در اطراف این نانوذرات نسبت به سایر نانوذرات بیشتر بوده و بنابراین نرخ تولید زوج الکترون- حفره در لایه پروسکایت با نانوذرات Au@TiO2 بیشتر می شود. علاوه بر این با تغییر در مکان آرایه تناوبی نانوکامپوزیتهای Au@SiO2 و ارائهٔ سه پیکربندی مختلف برای سلول خورشیدی مشخص گردید که تغییر جایگاه نانوذرات در این ماده پروسکایت تاثیر قابل توجهی در مشخصات فوتوولتاییک ندارد. این مطالعه می تواند در تولید سلول های خورشیدی بدون سرب با کارایی بالا موثر باشد

منابع

- W. Shen, Y. Zhao, and F. Liu, "Highlights of mainstream solar cell efficiencies in 2021", Front. Energy 16, 1-8 (2022).
- [2] M. Ijaz, A. Shoukat, A. Ayub, H. Tabassum, H. Naseer, R. Tanveer, A. Islam, and T. Iqbal, "Perovskite solar cells: importance, challenges, and plasmonic enhancement", Int. J. Green Energy 17, 1022 (2020).
- [3] N. Ahmadi, "The effect of plasmonic nanoparticles and the thickness of anode interface layer on the efficiency enhancement of organic solar cells", Phys. Scr. 96, 125843

(2021)

- [4] M.A. Green, "The path to 25% silicon solar cell efficiency: History of silicon cell evolution", Prog. Photovolt. Res. Appl. 17, 183 (2009).
- [5] M. Jeong, I.W. Choi, E.M. Go, Y. Cho, M. Kim, B. Lee, S. Jeong, Y. Jo, H.W. Choi, J. Lee, and J.H. Bae, "Stable perovskite solar cells with efficiency exceeding 24.8% and 0.3-V voltage loss", Science 369, 1615 (2020).
- [6] J. Burschka, N. Pellet, S.J. Moon, R. Humphry-Baker, P. Gao, M.K. Nazeeruddin, and M. Grtzel, "Sequential deposition as a

route to high-performance perovskitesensitized solar cells", Nature 499, 316 (2013).

- [7] J. Huang, M. Wang, L. Ding, J. Deng, and X. Yao, "Efficiency enhancement of the MAPbI3- xClx-based perovskite solar cell by a two-step annealing procedure" Semicond. Sci. Technol 31, 025009 (2016).
- [8] A. Bibi, I. Lee, Y. Nah, O. Allam, H. Kim, L.N. Quan, J. Tang, A. Walsh, S.S. Jang, E.H. Sargent, and D.H. Kim, "Lead-free halide double perovskites: Toward stable and sustainable optoelectronic devices " Mater. Today 49, 123 (2021).
- [9] C. Wu, Q. Zhang, Y. Liu, W. Luo, X. Guo, Z. Huang, H. Ting, W. Sun, X. Zhong, S. Wei, and S. Wang, "The Dawn of Lead-Free Perovskite Solar Cell: Highly Stable Double Perovskite Cs2AgBiBr6 Film", Adv. Sci. 5, 1700759 (2018).
- [10] Y. Yang, and J. You, "The Dawn of Lead-Free Perovskite Solar Cell: Highly Stable Double Perovskite Cs2AgBiBr6 Film", Nature News 544, 155 (2017).
- [11] J. Wang, J. Dong, F. Lu, C. Sun, Q. Zhang, and N. Wang, "Two-dimensional lead-free halide perovskite materials and devices", J. Mater. Chem. A 7, 23563 (2019).
- [12] W. Ke, and M.G. Kanatzidis, "Prospects for low-toxicity lead-free perovskite solar cells", Nature Commun. 10, 1 (2019).
- [13] C. Kang, H. Rao, Y. Fang, J. Zeng, Z. Pan, and X. Zhong, "Antioxidative Stannous Oxalate Derived Lead-Free Stable CsSnX3 (X=Cl, Br, and I) Perovskite Nanocrystals", Angew. Chem. 133, 670 (2021).
- [14] Z. Liu, S. Dai, Y. Wang, B. Yang, D. Hao, D. Liu, Y. Zhao, L. Fang, Q. Ou, S. Jin, J. Zhao, and J. Huang, "Photoresponsive Transistors Based on Lead-Free Perovskite and Carbon Nanotubes", Adv. Funct. Mater. 30, 1906335 (2020).
- [15] F. Locardi, M. Cirignano, D. Baranov, Z. Dang, M. Prato, F. Drago, M. Ferretti, V. Pinchetti, M. Ferretti, V. Pinchetti, M. Fanciulli, S. Brovelli, L. De Trizio, and L. Manna, "Colloidal Synthesis of Double Perovskite Cs2AgInCl6 and Mn-Doped Cs2AgInCl6 Nanocrystals", J. Am. Chem. Soc. 140, 12989 (2018).
- [16] N. Ito, M.A. Kamarudin, D. Hirotani, Y. Zhang, Q. Shen, Y. Ogomi, S. Iikubo, T. Minemoto, K. Yoshino, and S. Hayase, "Mixed Sn–Ge Perovskite for Enhanced Perovskite Solar Cell Performance in Air", J. Phys. Chem. Lett. 9, 1682 (2018).
- [17] A. Iefanova, N. Adhikari, A. Dubey, D. Khatiwada, and Q. Qiao, "Lead free

CH3NH3SnI3 perovskite thin-film with ptype semiconducting nature and metal-like conductivity", AIP Adv. 6, 085312 (2016).

- [18] C. Wu, Q. Zhang, Y. Liu, W. Luo, X. Guo, Z. Huang, H. Ting, W. Sun, X. Zhong, S. Wei, and S. Wang, "The Dawn of Lead-Free Perovskite Solar Cell: Highly Stable Double Perovskite Cs2AgBiBr6 Film", Adv. Sci. 5, 1700759 (2018).
- [19] N. Ahmadi, "Photonic crystal for efficiency enhancement of thesemitransparent organic solar cells", Phys. Scr. 97, 105806 (2022).
- [20] M. Ghidelli, L. Mascaretti, B.R. Bricchi, A. Brognara, T.A. Afifi, V. Russo, C.S. Casari, and A.L. Bassi, "Light management in TiO2 thin films integrated with Au plasmonic nanoparticles", Semicond. Sci. Technol. 35, 035016 (2020).
- [21] A. Abbasiyan, M. Noori, and H. Baghban, "Investigation of quasi-periodic structures to increase the efficiency of thin-film silicon solar cells: A comparative study", Sol. Energy Mater, Sol. Cells. 202, 110129 (2019).
- [22] M. Bajpai, R. Srivastava, and R. Dhar, "Effect of plasmonic enhancement of light absorption on the efficiency of polymer solar cell", Springer Proceedings in Physics 178, 315 (2017).
- [23] Y. Cui, H. Zhao, F. Yang, P. Tong, Y. Hao, Q. Sun, F. Shi, Q. Zhan, H. Wang, and F. Zhu, "Efficiency enhancement in organic solar cells by incorporating silica-coated gold nanorods at the buffer/active interface ", J. Mater. Chem. C 3, 9859 (2015).
- [24] J. Zheng, X. Cheng, H. Zhang, X. Bai, R. Ai, L. Shao, and J. Wang, "Gold Nanorods: The Most Versatile Plasmonic Nanoparticles" Chem. Rev. 121, 13342 (2021).
- [25] C.W. Chen, S.Y. Hsiao, C.Y. Chen, H.W. Kang, Z.Y. Huang, and H.W. Lin, "Optical properties of organometal halide perovskite thin films and general device structure design rules for perovskite single and tandem solar cells", J. Mater. Chem. A 3, 9152 (2015).
- [26] J.R. Devore, "Refractive indices of rutile and sphalerite", J. Opt. Soc. Am. 41, 416 (1951).
- [27] R.J. Moerland, and J.P. Hoogenboom, "Subnanometer-accuracy optical distance ruler based on fluorescence quenching by transparent conductors", Optica 3, 112 (2016).
- [28] P.B. Johnson, and R.W. Christy, "Optical constants of the noble metals", Phys. Rev. B 6, 4370 (1972).
- [29] H.J. Jöbsis, V.M. Caselli, S.H.C. Askes, E.C. Garnett, T. J. Savenije, F.T. Rabouw, andE. M. Hutter, "Recombination and

localization: Unfolding the pathways behind conductivity losses in Cs2AgBiBr6 thin films", Appl. Phys. Lett. 119, 131908 (2021).

- [30] C.Z. Tan, "X-ray diffraction of densified silica glass", J. Non-Cryst. 223, 158 (1998).
- [31] H. Talebi, and F. Emami," Broadband plasmonic absorption enhancement of perovskite solar cells with embedded Au@ SiO2@ graphene core-shell nanoparticles", Semicond. Sci. Technol. 37, 055002 -1 (2022).
- [32] H. M. Abdulla, R. Thomas, and R.S. Swathi," Overwhelming analogies between plasmon hybridization theory and molecular

orbital theory revealed: The story of plasmonic heterodimers" J. Phys. Chem. C 122, 73828 (2018).

- [33] A.Rehman, A.U. Rehman, M. Aslam, N. Muhammad, M.A. Saeed, "Optimization of Hollow Materials-Based Electron Transport Layer for Enhanced Performance of Perovskite Solar Cell ", Plasmonic 023-02057-8 (2023).
- [34] N. Ahmadi, and M.A. Alkhalayfeh "Plasmonic absorption enhancement of MAPI-based perovskite solar cell with nanoparticles array", Optik 302, 171726 (2024).