



ارائه یک نانو ساختار پلاسمونیک مبتنی بر نانوانتن‌های تنگستن هشت پره برای بهبود طیف جذب در سیستم‌های حرارتی خورشیدی

سید ایوب میرطاووسی و محمدرضا اسکندری*

گروه مهندسی برق، مرکز آموزش عالی شهرضا، دانشگاه اصفهان، اصفهان

چکیده: بکارگیری نانوانتن‌های پلاسمونیک، بستری انعطاف‌پذیر برای دستکاری برهم‌کنش‌های ماده-نور در مقیاس زیرطول موج فراهم می‌سازد و دریچه‌ای جدید برای طراحی انواع ادوات نوری با کارایی بالا باز می‌کند. در این تحقیق، یک جاذب انرژی خورشیدی پهن باند و مستقل از قطبش نور تابشی بر اساس فلز تنگستن (W) پیشنهاد کرده ایم. این نانو ساختار سه لایه، متشکل از یک لایه ضخیم از تنگستن و یک لایه نازک از عایق SiO_2 با ضریب شکست بالا است که آرایه‌ای از نانوانتن‌های به شکل ستاره هشت پره از جنس تنگستن بر روی آن لایه نشانی شده است. وجود چندین مد پلاسمونیک با سرعت واپاشی کوچک در ساختار پیشنهادی، باعث شده است که جذب بالاتر از ۹۰ درصد در محدوده طول موج وسیعی از ۲۵۰ تا ۱۹۴۰ نانومتر فراهم شود. این پهنای باند را می‌توان با تنظیم ضخامت لایه عایق و ابعاد هندسی نانوانتن تنظیم کرد. ساختار پیشنهادی مسطح و کم حجم بوده و مشخصه نوری آن در یک محدوده زاویه‌ای وسیع بدون توجه به قطبش نور تابشی پایدار است. این ویژگی‌ها باعث می‌شود که فراسطح پیشنهادی، گزینه‌ای مناسب برای تبدیل انرژی خورشیدی در سیستم‌های فوتوولتائیک حرارتی باشد.

واژگان کلیدی: فراسطح پلاسمونیک، برداشت انرژی، جاذب، سیستم‌های فوتوولتائیک حرارتی، خواص نوری.

*m.r.eskandari@shr.ui.ac.ir

فوتوولتائیک^۱ (PV) یا سیستم‌های فوتوولتائیک حرارتی خورشیدی (STPV)^۲ استفاده نمود. در مورد اول به علت استفاده از بخشی از طیف نور خورشید بازدهی حدود ۳۴٪ و در مورد دوم به علت استفاده از طیف گسترده‌تری از نور خورشید بازدهی حدود ۸۵٪ در دماهای بسیار بالا در حدود $1500^{\circ}C$ حاصل می‌شود [۲، ۴]. برای دستیابی به بیشترین بهره‌وری از انرژی خورشید نیاز به جاذب کامل نور خورشید داریم. جاذب‌های نور خورشید براساس نسبت پهنای باند جذب به فرکانس مرکزی، به جاذب‌های پهن باند و باند باریک تقسیم بندی می‌شوند [۳].

۱- مقدمه

اثرات نامطلوب زیست محیطی، تاثیرات گازهای گلخانه و سایر تاثیرات زیانباری که استفاده از سوخت‌های فسیلی بر زیست محیط داشته است، سبب شده تا بسیاری از کشورهای مدرن نسبت به تامین انرژی مورد نیاز خود از چند منبع متفاوت اقدام کنند که خورشید از مهمترین منابع انرژی تجدیدپذیر مورد استفاده در این جوامع مدرن است. گستره استفاده از انرژی خورشیدی از کاربردهای خانگی مثل آب شیرین کن خورشیدی تا کاربردهای صنعتی مانند تولید بخار آب به منظور نمک زدایی و تصفیه آب و حتی تولید الکتریسته پراکنده است [۱]. به منظور تولید الکتریسته از انرژی خورشید می‌توان از سیستم‌های

¹ Photovoltaic

² Solar thermophotovoltaic

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۹

جدول شماره ۱: مقایسه چند ساختار جذب نور

مرجع	سال	درصد جذب	باند جذب nm	ضخامت کل ساختار nm	لایه سوم		لایه دوم		لایه اول از محل تابش			تعداد لایه	ردیف
					ضخامت nm	جنس	ضخامت nm	جنس	شکل	ضخامت nm	جنس		
[26]	2011	40	400-750 (UV-NIR)	145	100	Au	25	SiO ₂	مستطی	20	نانوچندسازه Au-SiO ₂	3	1
[27]	2012	97.5	400-750 (UV-NIR)	220	100	Cu	20	PTFE	مستطی	100	نانوچندسازه Cu-PTFE	3	2
[7]	2020	99.7	647-646	1540	1000	Au	510	SiO ₂	دایره	30	Al ₂ O ₃	3	3
[3]	2018	97	450-950	320	200	Au	45	SiO ₂	مستطی	75	Au	3	4
[2]	2018	91.3	UV-NIR	240	100	Ta	30	Al ₂ O ₃	مثلث	110	Ti	3	5

جاذب‌های پهن باند در STPV [۴]، سطوح ضد انعکاس^۳ [۵]، آشکارسازهای نوری [۶] و جاذب‌های باند باریک در سنسورها [۷] و آشکارسازهای فوتوالکتریک تک رنگ^۴ [۸]، کاربرد دارند. از جمله نکاتی که در سیستم‌های STPV می‌بایست مد نظر قرار گیرد، قابلیت کار این سیستم‌ها در دماهای بالاست. برای افزایش بازده لازم است که مواد انتخاب شده در این نوع سیستم‌ها دارای جذب بالای خورشیدی ۹۰٪ در محدوده نور مرئی ($\lambda \leq 2\mu\text{m}$) و تابش گرمایی^۵ پایین زیر ۱۰٪ در محدوده مادون قرمز ($\lambda \geq 2\mu\text{m}$) باشند که در طبیعت چنین ماده‌ای به صورت ذاتی یافت نمی‌شود [۹]. فلزاتی مانند طلا و نقره تابش گرمایی پایین و مواد شفافی چون نیترادها، اکسایدها و کاربیدها دارای تابش گرمایی بالا هستند اما هر دو دسته جاذب بسیار پایین نور تابشی هستند. در برخی موارد نیز برای افزایش جذب مواد نیمه هادی مانند سیلیکون و ژرمانیم که انعکاس بالایی دارند، از پوشش‌های جاذب استفاده شد تا جذب نور بیشتر شود [۱۰]. هرچند از سرمت^۶

(Cermet) برای افزایش پایداری حرارتی در ساخت جاذب‌هایی تقریباً کامل با تابش کم استفاده شد، اما نیاز به خلاء در فناوری ساخت، باعث بالارفتن هزینه ساخت این جاذب‌ها می‌شود [۱۱]. پس کلاس جدیدی از مواد که با نام فرامواد شناخته می‌شوند بکار گرفته شدند. این نانو ساختارها دارای ویژگی‌های مهندسی شده‌ای هستند که به صورت مجزا از مواد سازنده‌ی آن‌ها دیده نمی‌شود. ابعاد کوچک آن‌ها (در مقایسه با طول موج کاری)، هندسه و اندازه آن‌ها باعث بروز خصوصیات بی‌نظیری از آن‌ها شده است [۱۲]. استفاده از این کلاس در آنتن‌ها [۱۳]، موجبرها [۱۴]، لباس نامرئی [۱۵] و تغییر پلاریزاسیون موج دریافتی [۱۶] بخشی از کارایی این کلاس را به خوبی مشخص می‌کند. ساخت نخستین جاذب میدان الکترومغناطیسی در سال ۲۰۰۸، در باند گیگاهرتز [۱۷]، کاربرد آن در کاهش سطح مقطع راداری [۱۸] و بالابردن فرکانس کاری تا حد تراهرتز [۱۹]، [۲۰] کارایی و انعطاف پذیری این ساختارها را به خوبی نمایان می‌کند. با توجه به نیاز به خواص نوری برای جذب انرژی خورشید، پلاسمونیک

3 Antireflection surfaces

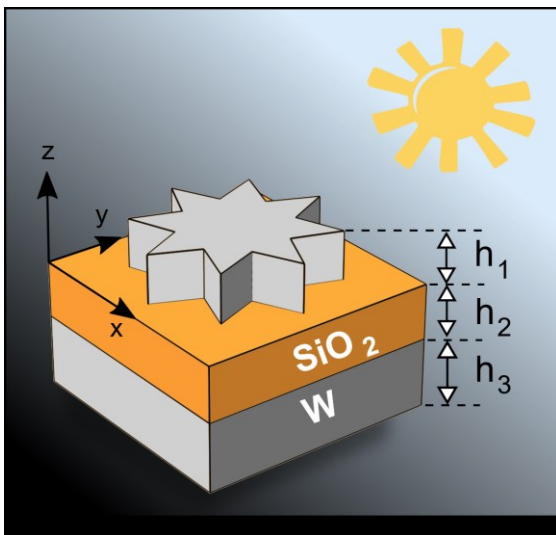
4 Monochromatic photoelectric detectors

5 Thermal emittance

6 Ceramic-Metal composite

ساختار ساده نوارهای تنگستن به صورت لایه به لایه [۳۱،۳۲]، حلقه و دیسک غوطه ور در لایه دی الکتریک [۳۳]، دیسک غوطه ور در لایه دی الکتریک [28]، علامت به اضافه [۳۴]، استوانه تنگستن با کره طلایی در بالای آن [۳۵] استفاده شده است. با مطالعه ساختارهای بالا چند نکته قابل ذکر است. نخست آنکه در بسیاری از موارد پهنای باند گزارش شده در محدوده کوچکی از نور مرئی است و دیگر آنکه در بسیاری از موارد هزینه ساخت و پیچیدگی فناوری ساخت افزایش یافته است. پس، استفاده از یک طرح ساده مبتنی بر تنگستن در ساختار PMA ضرورت دارد.

ساختاری که در ادامه معرفی می‌شود، پس از بررسی ساختارهای متفاوت هم از نظر نوع لایه‌ها و هم از نظر شکل متا اتم پیشنهاد شده است. از دید اول ساختار MDM^۹ پیاده سازی ساده دارد و



شکل ۱: طرحواره ساختار پیشنهادی متشکل از یک لایه پیوسته از عایق SiO_2 ساندویچ شده بین انعکاس دهنده W و آرایه‌ای از نانو ذرات تنگستن به شکل ستاره

با روش لیتوگرافی قابل ساخت است. همچنین، عدم غوطه وری متا اتم در یک دی الکتریک فرآیند ساخت را تسهیل می‌نماید. از منظر دوم نیز طرح ارائه شده نه تنها به دلیل داشتن گوشه‌های بیشتر نسبت به ساختارهای قبلی در جذب پهن باند طیف نور دریافتی عملکرد بهتری دارد؛ بلکه با تغییر اندازه‌ی قسمت‌های سازنده آن تا حدی قابلیت تنظیم جذب نیز فراهم شده است. در ادامه جزئیات نانو ساختار پیشنهادی و روش بدست آمدن نتایج را

فراموادها (PMM^7) توسعه یافتند [۲۱]. PMM ها کاربردهای متنوعی در ایجاد ضریب شکست منفی^۸، نانو لیزر و فوتوولتائیک [۲۲] دارند. از آنجا که رزونانس موج با فراسطح در یک فرکانس خاص اتفاق می‌افتد [۲۳]، جذب حداکثری در یک محدوده کوچک بوده و گذشته از حالت‌های خاص، پهنای باند کم، کاربرد آن‌ها را محدود می‌نماید [۲۴]. همچنین، انتشار انرژی از طرف فراسطح به سمت پایین باعث بالا رفتن دما شده و عدم ایستادگی دمایی این ساختارها در دماهای بالا سبب کاربرد کمتر آن‌ها در STPV می‌شود که از یک سو در جهت بالابردن مقاومت گرمایی، از فلزات نسوز مانند Ni، W و Ti در این ساختارها استفاده شد [۲۵] و از سوی دیگر، تلاش‌های زیادی برای ساخت جاذب‌های خورشیدی پهن باند انجام گرفت [۲، ۳، ۷، ۲۶، ۲۷] که در جدول ۱ به برخی از آن‌ها اشاره شده است.

از آنجا که در ساخت یک PMM درجه آزادی‌هایی مانند انتخاب مواد پلاسمونیک، چند لایه بودن ساختار، شکل و اندازه متا اتم‌های استفاده شده در لایه‌هایی بالایی و هندسه کلی PMM وجود دارد می‌توان در مقدار جذب و پهنای باند جذب ساختار PMM تغییر ایجاد نمود. مشخص شده است که استفاده از طلا، نقره و کبالت برای ساخت جاذب‌های باند باریک مناسب هستند. هرچند استفاده از چند رزوناتور باند باریک در کنار هم مانند استفاده از دیسک‌هایی با سایز متفاوت، مربع‌هایی در اندازه‌های متفاوت [۲۸] یا حتی ساختارهای پیچیده مانند $\text{W/SiO}_2/\text{W/SiO}_2/\text{W}$ باعث افزایش پهنای باند جذب شده است [۲]، اما بدیهی است تحقق ساختارهای فوق دارای پیچیدگی ساخت و هزینه بالا است. موارد اخیر الذکر مشخص کرد که استفاده از W به عنوان یک فلز نسوز با قابلیت ایستادگی و عدم تغییر شکل در دماهای بالا و خصوصیات جالب آن در طیف مرئی [۲۹] می‌تواند به عنوان یک فلز بسیار مناسب در جاذب‌ها بکار رود. تنگستن با دمای ذوب 3422°C بالاترین نقطه ذوب در بین فلزات را دارد. زیاد بودن بخش حقیقی به موهومی ثابت دی الکتریک این فلز سبب شده تا این فلز ۶۰٪ از تابش دریافتی را در بهترین حالت جذب نماید [۳۰]. پس از این فلز به عنوان متا اتم در بالاترین لایه در طرح‌های گوناگون مانند مخروط [۳۰]،

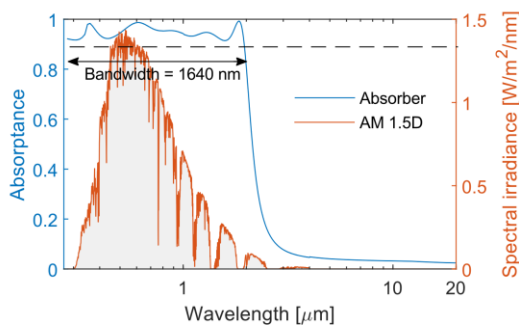
7 Plasmonic Metamaterial
8 Negative refractive index

⁹ Metal-Dielectric-Metal

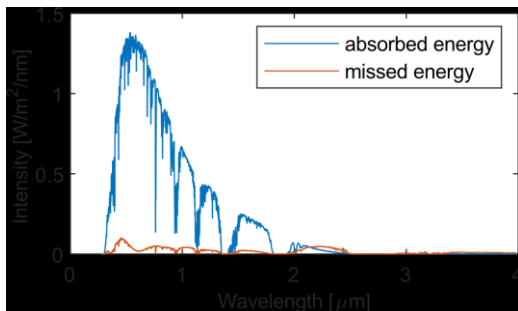
مش نباید از یک دهم کوچکترین طول موج شبیه‌سازی شده $(\lambda/10)$ تجاوز کند. یک شکل چهار وجهی برای مش بندی لایه‌های جاذب انتخاب شده است، که این مسئله به هزینه محاسباتی بالا منجر می‌شود. یک مش بندی نگاشت شده، با مش بندی معمولی یا درشت به PML های اطراف سلول خورشیدی اعمال شد تا امکان استفاده از اندازه مش کوچکتر برای سلول خورشیدی و ماده فعال فراهم شود. همچنین، در شبیه‌سازی عددی از مقادیر اندازه گیری شده ضریب شکست برای مشخصه نوری SiO_2 و W استفاده شده است [۳۷].

۳- بحث و نتایج شبیه‌سازی

همانگونه که اشاره شد، ساخت یک جاذب پهن باند که در محدوده طیفی فرابنفش (UV) تا فروسرخ (IR) کارایی داشته باشد به صورت پیوسته بهبود یافته است. هر چند در [۳۸] یک جاذب با بازده بالای ۹۰٪ در پهنای باند 1200nm تا 300nm



شکل ۲: طیف جذب جاذب پیشنهادی با پهنای باند 1640nm نانومتر و چگالی شار تابشی برای AM ۱.۵



شکل ۳: طیف چگالی توان جذب شده در اثر تابش AM ۱.۵ و انرژی از دست رفته با جاذب ارائه شده

اشاره می‌کنیم و پس از آن به بحث در مورد نتایج حاصل از شبیه‌سازی می‌پردازیم و تاثیر پارمترهای ساختار معرفی شده بر مقدار جذب و بازدهی آن را بررسی می‌کنیم. در نهایت، با نتیجه گیری مقاله حاضر پایان می‌پذیرد.

۲- معرفی ساختار و روش شبیه‌سازی

طرح پیشنهادی جاذب پهن باند خورشیدی که در شکل ۱ نشان داده شده است، یک نانوساختار سه لایه $\text{W}/\text{SiO}_2/\text{W}$ با یک ستاره هشت پر به عنوان نانوأرایه است. در این نانوساختار شعاع دایره محیطی (R_1)، شعاع دایره محاطی (R_2) و دوره تناوب (p) ساختار در امتداد X و Y، پارمترهای اصلی می‌باشند. ضخامت لایه‌های متفاوت با توجه به شکل ۱، به صورت $h_1 = 120\text{nm}$ ، $h_2 = 30\text{nm}$ و $h_3 = 100\text{nm}$ است. پرتوی از نور با زاویه θ نسبت به محور عمودی با میدان الکتریکی $\vec{E}^i = \vec{E}_0 \exp(-jk_0[x\sin\theta + z\cos\theta])$ به ساختار تابیده می‌شود. بر همکنش نور با نانوساختار پیشنهادی منجر به میدان الکتریکی \vec{E} می‌شود که در معادله موج الکترومغناطیسی زیر صدق می‌کند.

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} - k_0^2 n \vec{E} = 0 \quad (1)$$

در رابطه بالا، k_0 عدد موج فضای آزاد و n ضریب شکست محیط است. شبیه‌سازی الکترومغناطیسی ساختار، با حل عددی موج کامل بر اساس روش اجزای محدود FEM^{10} انجام شده است. سایر شرایط شبیه‌سازی عبارتند از ایجاد ساختار متناوب به صورت مجازی با اعمال شرط مرزی بلوخ-فلوکه در راستای جهت‌های X و Y و قراردادن یک لایه با جذب کامل (PML^{11}) در انتهای ساختار. با توجه به [۲۵] نتایج شبیه‌سازی در این نرم افزار بسیار منطبق با نتایج بدست آمده در آزمایش‌های مشابه است.

مشاهده‌هایی که در شبیه‌سازی عددی و تعیین مشخصه نوری ساختار وجود داشته به قرار زیر است. بزرگترین اندازه مجاز برای

¹⁰ Finite Element Method

¹¹ Perfectly Matched Layer

۱۵۰۰nm ساخته شده است، اما استفاده از مواد هایپربولیک چندلایه (HMM^{12})، ساختار پیچیده آن و نیاز به چند ماده اولیه باعث دشواری ساخت چنین جاذبی می‌شود. جاذب معرفی شده در [۳۰] نیز از نظر تعداد موارد استفاده شده، مشابه با طرح پیشنهادی ما فقط با استفاده از SiO_2 و W ایجاد شده و به پهنای باند ۱۵۳۰nm (از ۴۲۰nm تا ۱۹۵۰nm) و بازده جذب ۹۷٪ دست یافته است. اما ساختار حلقه-دیسک تنگستنی استفاده شده بر روی لایه SiO_2 لازم است، دوباره با یک لایه SiO_2 پوشیده شود که خود باعث افزایش زمان و هزینه ساخت می‌شود. طرح پیشنهادی حداقل در سطح انتخاب ماده، باعث سادگی ساخت خواهد شد. در ادامه به بررسی دقیق‌تر طرح پیشنهادی می‌پردازیم و تاثیر پارامترهای متفاوت و روش دستیابی به ساختار بهینه را مرور میکنیم.

۱-۳- بررسی مشخصه طیف جذب

برهم‌کنش امواج الکترومغناطیسی با مواد به سه بخش جذب ($A(\omega)$)، انعکاس ($R(\omega)$) و انتقال ($T(\omega)$) تقسیم می‌شود که در ساختار پیشنهادی با توجه به آینه پشتی W و در نتیجه مسدود بودن کانال انتقالی آن ضریب جذب به صورت $A(\omega) = 1 - R(\omega)$ محاسبه می‌شود. طیف جذب ساختار پیشنهادی در شکل ۲ نمایش داده شده است. در اینجا R_1 ، R_2 و p به ترتیب ۱۴۰nm، ۸۰nm و ۳۵۰nm در نظر گرفته شده است. این مقادیر برای نانوساختار بهینه است و تغییر هر کدام از آن‌ها بر مقدار جذب خورشیدی تاثیر گذار است.

با توجه به ضریب شکست W ، بیشینه مقدار عمق نفوذ فوتون‌های طیف UV تا IR در یک لایه تنگستن برای طول موج نزدیک به $1.5 \mu m$ رخ می‌دهد، که با توجه به رابطه $\delta_p = \lambda / 4Im\{n\}$ این مقدار حدود ۲۶ nm است. به این ترتیب یک لایه از تنگستن به عنوان آینه پشتی به تنهایی عبور بیش از ۹۹ درصد از تابش را مسدود می‌کند. در حضور یک چنین لایه مات در طیف UV تا IR دور، ضخامت ساختار حدوداً ۲۵۰nm خواهد شد.

شکل ۲ طیف ضریب جذب ساختار ارائه شده را با پارامترهای هندسی مذکور در اثر تابش عمود خورشیدی با توده هوای ۱/۵

نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که ناحیه با جذب بالای ۹۰٪ از ۲۵۰nm شروع و تا ۱۹۴۰nm ادامه دارد. این ناحیه با پهنای باند ۱۶۹۰nm کاملاً در محدوده تابش خورشیدی قرار دارد. بازده جذب ساختار که بر اساس میانگین طیفی ضریب جذب تعریف می‌شود در این محدوده پهن باند برابر ۹۵/۳۴٪ و در کل طیف طول موج دریافتی ۹۳٪ شده است. در مقایسه با موارد اشاره شده در مقالات ارائه شده، طرح پیشنهادی دارای بیشترین پهنای باند است. همچنین، در شکل ۳ طیف چگالی انرژی جذب شده با انرژی از دست رفته برای توده هوای ۱/۵ مقایسه شده است. با توجه به این شکل واضح است که کارایی جاذب پیشنهادی در محیط واقعی بسیار خوب است که این موضوع از سطح پایین طیف انرژی خورشیدی منعکس شده از ساختار می‌توان نتیجه گرفت. نتایج بیان می‌کنند که در کل بازده انرژی از دست رفته در کل محدوده ۶/۴۸٪ و در پهنای باند ۲۵۰nm تا ۱۹۴۰nm برابر ۴/۵٪ است که نشان از بازده بالای جذب دارد.

ظهور سیستم‌های فوتولتاییک حرارتی در تولید انرژی الکتریکی از نور خورشید با هدف تجمع مزایای دو رویکرد رایج یعنی فوتولتاییک و خورشیدی-حرارتی بوده است. جمع آوری و حفظ نور خورشید در جاذب و کنترل طیف گسیلی از آن، به ویژه در دماهای عملیاتی بالا ناشی از اتلاف حرارتی، چالشی مهم در بهره‌وری از سیستم‌های مذکور است. از همین روی است که دستیابی به مقدار جذب بالای نور خورشید از NIR تا UV، همراه با کاهش تلفات حرارتی ناشی از گسیل تشعشعی در کارایی یک سیستم حرارتی خورشیدی از اهمیت ویژه ای برخوردار است بگونه ای که می‌توان یکی از مولفه‌های کیفیت در سیستم‌های حرارتی خورشیدی را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\eta = \alpha - \frac{(\sigma T_{str}^4 - \sigma T_{sky}^4)}{C I_{sol}} \epsilon \quad (2)$$

در رابطه بالا، I_{sol} چگالی توان تابشی از خورشید است که برای ضریب توده هوای ۱/۵ حدوداً $900 W/m^2$ می‌توان در نظر گرفت. σ ثابت استفان-بولتزمن^{۱۳}، T دمای کار ساختار، T_{sky} دمای آسمان با حدود ۲۰ درجه سانتیگراد و C مقدار تمرکز نور خورشید بر ساختار است. همچنین، نمادهای α و ϵ به ترتیب

¹³ Stefan-Boltzmann constant

¹² Hyperbolic Multilayer Materials

می‌شود. برای توضیح بیشتر، توزیع متفاوت میدان الکتریکی در طول موج‌های متفاوت در شکل ۴ نمایش داده شده است. برای روشن شدن مشخصات نوری ساختار ارایه شده، ما سه نوع متفاوت جاذب خورشیدی را با ساختار تکمیل شده مقایسه می‌کنیم. شکل ۵، طیف جذب یک لایه تنگستن (مورد ۱)، آرایه نانوذرات تنگستن (مورد ۲)، یک لایه آرایه نانوذرات تنگستن بدون فاصله دهنده SiO₂ (مورد ۳) و ساختار پیشنهادی (مورد ۴) نشان می‌دهد. پارامترهای هندسی نانوذرات در سه مورد آخر یکسان در نظر گرفته شده است. همانگونه که از نتایج مشخص است تنگستن حدود نیمی از توان تابشی در پهنه مرئی یعنی ۲۵٪ از شار انرژی دریافتی را با صرف نظر کردن از تلفات تشعشی جذب می‌کند. رخداد دو تشدید در محدوده مرئی برای ساختار پیشنهادی، بر راندمان جذب می‌افزاید. مطابق شکل ۵ اولین تشدید در طول موج 360nm مشاهده می‌شود. پلاریتون پلاسما منتشر شده بر سطح ساختار که ناشی از تزویج نور با مدهای پراش مرتبه (1,0) است این تشدید را سبب می‌شود. رخداد این تشدید برای موارد ۲ و ۳، مطابق شکل ۵ و همچنین توزیع میدان الکتریکی در شکل ۴(الف) و ۴(ت) که بیشتر بالای لایه تنگستن متمرکز است نشان دهنده PSPR در طول موج 360nm است. برای یک شبکه متناوب، شرط تطبیق تکانه بین مدهای پلاریتون‌های پلاسما سطحی و بردار موج عرضی نور فرودی را می‌توان با رابطه تزویج براگ بیان کرد:

$$\bar{k}_0 \pm i \bar{G}_x \pm j \bar{G}_y = \bar{k}_{spp} \quad (5)$$

که i و j مرتبه‌های تفرق برای بردارهای شبکه متقابل $\bar{G}_x = \frac{2\pi}{p} \hat{x}$ و $\bar{G}_y = \frac{2\pi}{p} \hat{y}$ هستند. همچنین p معرف ثابت شبکه و \bar{k}_{spp} بردار موج برای مد انتشاری SPP ساختار هستند.

معرف میانگین طیفی مقدار جذب و گسیل فوتون‌های با طول موج در محدوده ۰٫۲۵ تا ۲۰ μm هستند که طبق روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$\alpha = \frac{\int_{0.25}^{20} A(\omega) I_{AM1.5}(\omega) d\omega}{\int_{0.25}^{20} I_{AM1.5}(\omega) d\omega}$$

(۳)

$$\epsilon = \frac{\int_{0.25}^{20} A(\omega) E_b(\omega) d\omega}{\int_{0.25}^{20} E_b(\omega) d\omega}$$

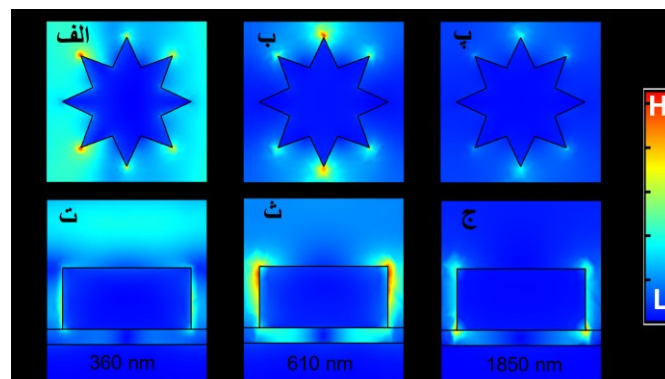
(۴)

که $I_{AM1.5}$ توان تابش خورشید برای توده هوای ۱/۵ و $E_b(\omega)$ چگالی توان گسیل شده از سطح سیاه است.

برای چگالی شار تابشی $900 W/m^2$ و تمرکز تابشی با ۱۰۰ خورشید، حدود $83/5 KW/m^2$ از توان جذب شده و مقدار $13, KW/m^2$ هم در اثر گسیل در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد تلف می‌شود. به این ترتیب تابش حرارتی تأثیری بر میزان جذب خالص انرژی نمی‌گذارد که بیانگر بازده تبدیل انرژی ۹۳٪ برای ساختار است. در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد اتلاف حرارتی به مقدار $8 KW/m^2$ افزایش می‌یابد که بازده تبدیل انرژی ۸۴٪ را به دنبال دارد. با افزایش دمای سطح، اهمیت نسبی اتلاف حرارتی افزایش می‌یابد، اما برای دماها و تابش‌های گیرنده عملی، جذب خورشیدی بالا بسیار مهم‌تر از اتلاف حرارتی پایین برای گیرنده‌های کارآمد است.

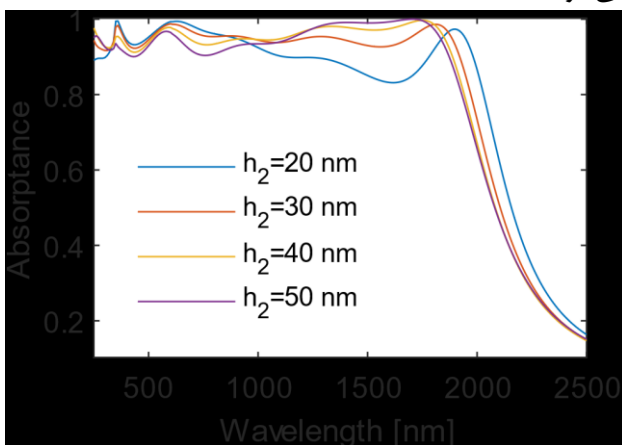
۲-۳- بررسی مشخصه میدانی و فرکانس‌های تشدید

برای بررسی پهن باند بودن طرح پیشنهادی می‌بایست به رخداد سه نوع رزونانس توجه کرد: LSPR^{۱۴}، PSPP^{۱۵} و F-PR^{۱۶}. رخداد انواع تشدیدها در شکل پیشنهادی سبب افزایش پهنای باند



شکل ۴: نمای بالا و جانبی توزیع میدان الکتریکی ناشی از تابش عمود با طول موج ۳۶۰، ۶۱۰ و ۱۸۵۰ نانومتر

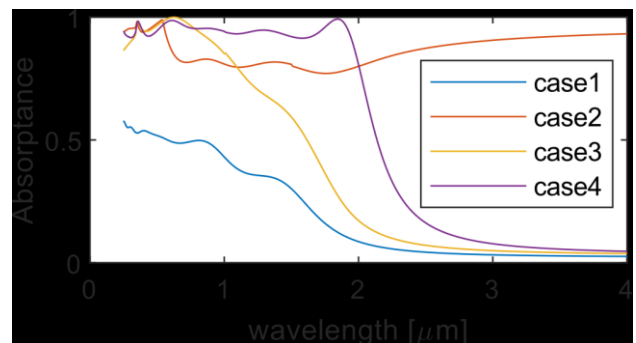
جذب طرح پیشنهادی را برای ضخامت‌های ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ نانومتر نشان می‌دهد. می‌توان چنین در نظر گرفت که یک نقطه عطف در این نمودارها در طول موج حدود ۱۰۰۰nm وجود دارد. در سمت چپ و طول موج‌های کمتر با افزایش ضخامت مقدار جذب کمتر می‌شود و درست در سمت راست، حالت برعکس رخ داده و افزایش ضخامت مقدار جذب کاهش یافته است. همچنین، در اثر افزایش ضخامت رزونانس سوم به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر منتقل می‌شود که این مسئله به علت کاهش ضریب مد موثر ساختار است و باعث کاهش پهنای باند جذب می‌شود.



شکل ۶: تاثیر ضخامت لایه عایق بر میزان جذب ساختار

در ادامه، به بررسی اثر تغییرات پارامترهای هندسی نانواختن پیشنهادی یعنی شعاع دایره محیطی (R_1) و شعاع دایره محاطی (R_2) می‌پردازیم. ابتدا مقدار R_2 را از ۱۲۰nm تا ۱۶۰nm تغییر می‌دهیم، در حالیکه سایر پارامترها ثابت هستند. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۷ نمایش داده شده است. آنچه مسلم است تغییر این پارامتر تاثیر زیادی بر پهنای باند جذب دارد. با افزایش R_2 ، پیک جذب انتقال به سمت قرمز دارد. این انتقال به وضوح از ۱۸۳۰nm به ۲۱۲۰nm دیده می‌شود. در ازای این افزایش پهنای باند، کمترین جذب ابتدا افزایش و پس از رسیدن به مقدار بهینه $R_2 = 140nm$ کاهش یافته و تا ۸۰٪ رسیده است. هرچند در $R_2 = 150nm$ ماکسیمم پیک جذب رخ داده است اما چون هدف از طراحی افزایش پهنای باند بالای ۹۰٪ بوده است، این مقدار به عنوان مقدار بهینه انتخاب نشده است. روش مشابهی برای ایجاد شکل ۸ اتخاذ شده است. این شکل مقدار جذب با $R_2 = 140nm$ و مقادیر متفاوت R_1 از ۶۰nm تا ۱۰۰nm را نشان می‌دهد. با افزایش مقدار R_1 تشدید سوم به سمت طول

با افزایش طول موج، تقریباً PSPP بی تاثیر شده و عملاً نوع دیگری از تشدید در طول موج 610nm مشاهده می‌شود. این تشدید با توجه به طیف شار انرژی دریافتی (شکل ۲)، بیشترین سهم در جذب انرژی دریافتی را دارد. با توجه به تمرکز میدان الکتریکی در گوشه بالایی فضای مابین نانواختن‌ها که در شکل‌های ۴(ب) و ۴(ث) مشهود است، می‌توان این تشدید را به پلاسمون‌های محلی LSPP ایجاد شده بین دو ستاره مجاور نسبت داد. رخ داد این تشدید برای موارد ۲ و ۳، مطابق شکل ۵ بر این گفته صحه می‌گذارد.



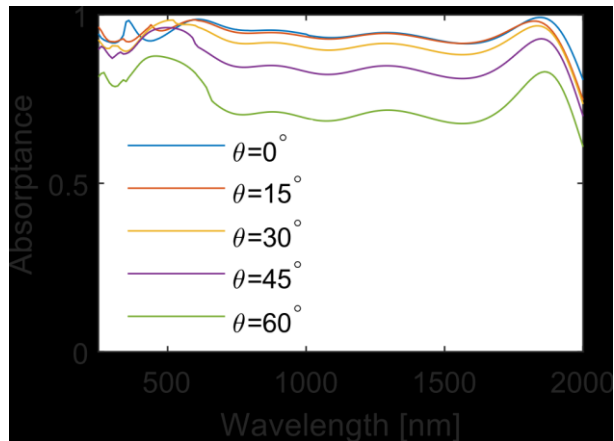
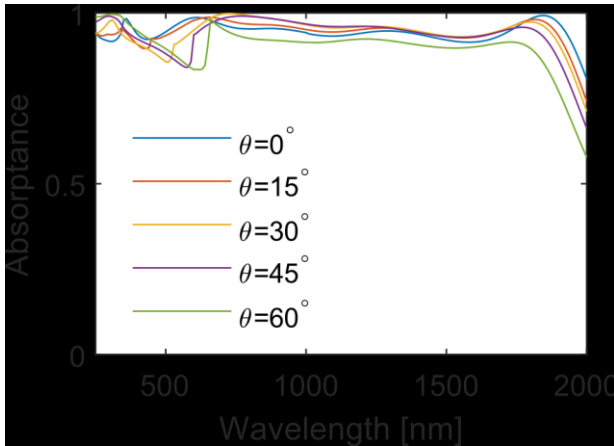
شکل ۵: طیف جذب یک لایه تنگستن (مورد ۱)، آرایه نانوذرات تنگستن (مورد ۲)، یک لایه آرایه نانوذرات تنگستن بدون فاصله دهنده SiO_2 (مورد ۳) و ساختار پیشنهادی (مورد ۴) ناشی از تابش عمود با طول موج ۲۵۰ تا ۴۰۰۰ نانومتر

پلاریتون مغناطیسی محصور شده در لایه SiO_2 ، برآمدگی دیگری در مشخصه جذب ساختار (مورد ۴) و در پهنه IR ایجاد کرده است. وقوع این تشدید برای طول موج 1850nm، ناشی از تشدید F-P نانو کاواک ایجاد شده بین دو لایه آینه تنگستن است. عدم وجود این تشدید برای موارد ۲ و ۳، مطابق شکل ۵ و همچنین تمرکز میدان در لایه SiO_2 ، مطابق شکل ۴(پ) و ۴(ج)، گواه این مسئله است.

۴- تاثیر پارامترهای هندسی ساختار و عوامل محیطی بر عملکرد نانو ساختار

همانگونه که اشاره شد، PMM دارای خواص جالبی هستند که سبب کاربرد آن‌ها در حوزه‌های متفاوت شده است. این خواص از نانو ساختار و نحوه چینش مواد سازنده سرچشمه می‌گیرد. برای مشاهده نقش لایه SiO_2 در ترکیب پیشنهادی، اثر ضخامت این لایه را بر طیف جذب ساختار بررسی می‌کنیم. شکل ۶ ضریب

جذب برای هر دو قطبش یکسان است. نتایج نشان می‌دهد که نانوساختار ارائه شده برای قطبش TM عملکردی با ثابت‌تر از خود نشان می‌دهد. به طور کلی برای زوایای کمتر از ۳۰ درجه، طیف جذب مستقل از قطبش نور تابشی، بازدهی جذب بالای ۸۵٪ را داراست و سپس، طرح پیشنهادی پایداری قابل قبولی در برابر قطبش و زاویه تابش دارد.

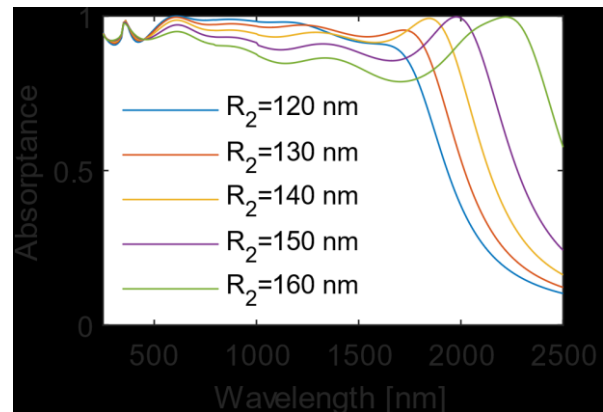


شکل ۹: تغییرات طیف جذب ساختار در اثر تابش نور با زوایای متفاوت و قطبش TM (شکل بالا) و قطبش TE (شکل پایین)

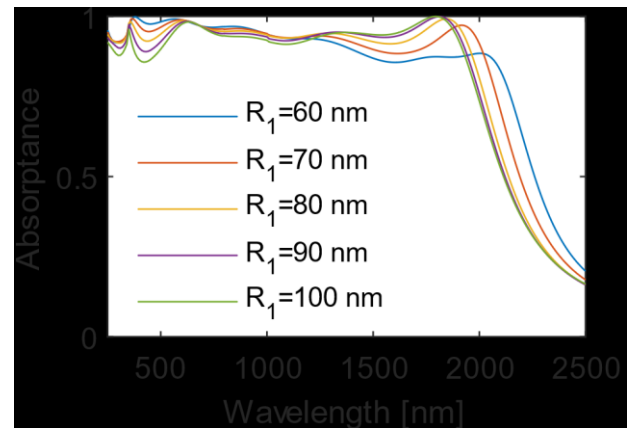
۵- نتیجه‌گیری

به طور خلاصه، در این تحقیق یک جاذب پهن باند که در محدوده طیفی فرابنفش تا فرورسرخ کارایی داشته باشد به صورت پیوسته بهبود یافته است. ساختار پیشنهادی مبتنی بر آرایه‌ای از نانواتن‌های نسوز W است که با نگهدارنده SiO₂ بر لایه پیوسته از W قرار گرفته است. این جاذب دارای ناحیه با جذب بالای ۹۰٪ با پهنای باند ۱۶۹۰ nm است که کامل در محدوده تابش خورشیدی قرار دارد. بازده جذب در این محدوده پهن باند ۹۵/۳۴٪ است. همچنین، سادگی طرح پیشنهادی در مقایسه با

موج‌های کوتاه منتقل می‌شود. این انتقال بخصوص از ۱۹۰۰ nm به ازای $R_1 = 70 \text{ nm}$ تا ۱۷۷۰ nm به ازای $R_1 = 100 \text{ nm}$ کاملاً مشهود است. بدین ترتیب با افزایش R_1 ابتدا پهنای باند جذب بالای ۹۰٪ افزایش یافته و پس از رسیدن به مقدار بهینه به ازای $R_1 = 80 \text{ nm}$ این پهنای باند کاهش می‌یابد.



شکل ۷: تاثیر شعاع دایره محاطی نانواتن بر میزان جذب ساختار



شکل ۸: تاثیر شعاع دایره محیطی نانواتن بر میزان جذب ساختار

بررسی مشخصه نوری یک جاذب خورشیدی در زوایای مایل، برای برداشت موثر نور خورشید فاقد قطبش که با گذر از یک متمرکز کننده نوری از جهات متفاوت بر ساختار فرود می‌آید، امری است حیاتی. یک جاذب خورشیدی ایده‌آل باید دارای خواص نوری مستقل از قطبش و جهت تابشی باشد. در همین راستا عملکرد ساختار ارائه شده تحت تابش‌های متفاوت با دو قطبش متعامد و زوایای ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه آزموده می‌شود. شکل ۹، طیف جذب ناشی از تابش نور قطبش عرضی الکتریکی TE و قطبش عرضی مغناطیسی TM را به نمایش می‌گذارد. با توجه به نمودارها مشخص است که برای تابش عمود، طیف

Q-factor and its application in sensing in the visible region,” *Results in Physics*, 19, 103415, 2020.

[8] c. Liang, Z. Yi, X. Chen, Y. Tang, Y. Yi, Z. Zhou, X. Wu, Z. Huang, Y. Yi, G. Zhang. “Dual-band infrared perfect absorber based on a Ag-dielectric -Ag multilayer films with nanoring grooves arrays,” *Plasmonics*, 15, 1, 93-100, 2020.

[9] A.A. Shah, M.C. Gupta. “Spectral selective surfaces for concentrated solar power receivers by laser sintering of tungsten micro and nano particles,” *Solar energy materials and solar cells*, 117, 489-493, 2013.

[10] C.E. Kennedy. “Review of mid-to high-temperature solar selective absorber materials,” National Renewable Energy Lab., Golden, CO.(US),NREL/TP-520-31267, 2002.

[11] S. Esposito, A. Antonaia, M.L. Addonizio, S. Aprea. “Fabrication and optimisation of highly efficient cermet-based spectrally selective coatings for high operating temperature,” *Thin Solid Films*, 517, 21, 6000-6006, 2009.

[12] N. Engheta, R.W. Ziolkowski. “Metamaterials: physics and engineering explorations,” John Wiley & Sons, 2006.

[13] M.M. Hasan, M.R.I. Faruque, M.T. Islam. “Dual band metamaterial antenna for LTE/bluetooth/WiMAX system,” *Scientific reports*, 8, 1, 1-17, 2018.

[14] F. Fan, X. Zhang, S. Li, D. Deng, N. Wang, H. Zhang, S. Chang. “Terahertz transmission and sensing properties of microstructured PMMA tube waveguide,” *Optics express*, 23, 21, 27204-27212, 2015.

[15] S.S. Islam, M.R.I. Faruque, M.T. Islam. “A near zero refractive index metamaterial for electromagnetic invisibility cloaking operation,” *Materials*, 8, 8, 4790-4804, 2015.

[16] S. Shi, K. Qian, W. Gao, J. Dai, M. Li, J.Dong. “Dual-band reflection polarization

موارد مشابه ذکر شده در مقاله کاملا واضح است. رخداد انواع رزونانس‌ها در این طرح که سبب ایجاد ناحیه پهن باند شده است نیز مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، تاثیر پارامترهای متفاوت هندسی بر مقدار جذب مورد مطالعه قرار گرفت. در کنار مشخص شدن جذب خوب طرح پیشنهادی در تابش خورشیدی، این طرح مستقل از زاویه تابش و پلاریزاسیون است.

مراجع

[1] A. Ghasemi, H. Shayeghi, M. Moradzadeh, M. Nooshyar. “A novel hybrid algorithm for electricity price and load forecasting in smart grids with demand-side management,” *Applied energy*, 177, 40-59, 2016.

[2] Y. Li, D. Li, D. Zhou, C. Chi, S. Yang, B. Huang. “Efficient, Scalable, and High-Temperature Selective Solar Absorbers Based on Hybrid-Strategy Plasmonic Metamaterials,” *Solar RRL*, 2, 8, 1800057, 2018.

[3] A. Nagarajan, K. Vivek, M. Shah, V.G. Achanta, G. Gerini. “A broadband plasmonic metasurface superabsorber at optical frequencies: Analytical design framework and demonstration,” *Advanced Optical Materials*, 6, 16, 1800253, 2018.

[4] A. Lenert, D.M. Bierman, Y. Nam, W.R. Chan, I. Celanović, M. Soljačić, E.N. Wang. “A nanophotonic solar thermophotovoltaic device,” *Nature nanotechnology*, 9, 2, 126-130, 2014.

[5] A. Patra, A.P. Ravishankar, A. Nagarajan, S. Maurya, V.G. Achanta. “Quasiperiodic air hole arrays for broadband and omnidirectional suppression of reflection,” *Journal of Applied Physics*, 119, 11, 113107, 2016.

[6] H. Luo, Q. Li, K. Du, Z. Xu, H. Zhu, D. Liu, L. Cai, P. Ghosh, M. Qiu. “An ultra-thin colored textile with simultaneous solar and passive heating abilities,” *Nano Energy*, 65, 103998, 2019.

[7] M. Pan, Z. Su, Z. Yu, P. Wu, H. Jile, Z. Yi, Z. Chen. “A narrowband perfect absorber with high

- [25] U.Guler, A.Boltasseva, V.M.Shalaev. "Refractory plasmonics," *Science*, 344, 6181, 263-264, 2014.
- [26] M.K. Hedayati, M. Javaherirahim, B. Mozooni, R. Abdelaziz, A. Tavassolizadeh, V. Chakravadhanula. "Design of a perfect black absorber at visible frequencies using plasmonic metamaterials," *Advanced Materials*, 23, 45, 5410-5414, 2011.
- [27] M.K. Hedayati, F. Faupel, M. Elbahri. "Tunable broadband plasmonic perfect absorber at visible frequency," *Applied Physics A*, 109(4), 769-773, 2012.
- [28] M.Chen, Y.He. "Plasmonic nanostructures for broadband solar absorption based on the intrinsic absorption of metals," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 188, 156-163, 2018.
- [29] H.Kwon, H.Chalabi, A.Alu. "Refractory Brewster metasurfaces control the frequency and angular spectrum of light absorption," *Nanomaterials and Nanotechnology*, 9, 1847980418824813, 2019.
- [30] E.Rephaeli, S.Fan. "Tungsten black absorber for solar light with wide angular operation range," *applied physics letters*, 92, 21, 211107, 2008.
- [31] C.H.Lin, R.L.Chern, H.Y. Lin. "Polarization-independent broad-band nearly perfect absorbers in the visible regime," *Optics express* 19, 2, 415-424, 2011.
- [32] L.P.Wang, Z.M. Zhang. "Wavelength-selective and diffuse emitter enhanced by magnetic polaritons for thermophotovoltaics," *Applied Physics Letters*, 100, 6, 063902, 2012.
- [33] Z.Yi, J.Li, J.Lin, F.Qin, X.Chen, W.Yao, Z.Liu, S.Cheng, P.Wu, H.Li. "Broadband polarization-insensitive and wide-angle solar energy absorber based on tungsten ring-disc array," *Nanoscale*, 12, 45, 23077-23083, 2021.
- converter for circularly polarized waves based on a zigzag asymmetric split ring resonator," *Journal of Applied Physics*, 129, 1, 014901, 2021.
- [17] N.I. Landy, S. Sajuyigbe, J.J. Mock, D.R. Smith, W.J. Padilla. "Perfect metamaterial absorber," *Physical review letters*, 100, 20, 207402, 2008.
- [18] T.T.Nguyen, S.Lim. "Angle-and polarization-insensitive broadband metamaterial absorber using resistive fan-shaped resonators," *Applied Physics Letters*, 112, 2, 021605, 2018.
- [19] H.Tao, N.I.Landy, C.M.Bingham, X.Zhang, R.D.Averitt, W.J.Padilla. "A metamaterial absorber for the terahertz regime: design, fabrication and characterization," *Optics express*, 16, 10, 7181-7188, 2008.
- [20] Y.Zhang, Z.Yi, X.Wang, P.Chu, W.Yao, Z.Zhou, S.Cheng, Z.Liu, P.Wu, M.Pan, Y.Yi. "Dual band visible metamaterial absorbers based on four identical ring patches," *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 127, 114526, 2021.
- [21] S.Zouhdi, A.Sihvola, A.P.Vinogradov. "Metamaterials and plasmonics: fundamentals, modelling, applications," *Springer Science & Business Media*, 2008.
- [22] M.A. Shameli, S.R. Mirnaziry, L. Yousefi. "Distributed silicon nanoparticles: an efficient light trapping platform toward ultrathin-film photovoltaics," *Optics Express*, 29, 18, 28037-28053, 2021.
- [23] Z.Li, B.Li, Q.Zhao, J.Zhou. "A metasurface absorber based on the slow-wave effect," *AIP Advances*, 10, 4, 045311, 2020.
- [24] M.K.Hedayati, M.Elbahri. "Perfect plasmonic absorber for visible frequency," In 2013 7th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (IEEE), 259-261, 2013.

- [34] A.S.Rana, M.Q.Mehmood, H.Jeong, I.Kim, J.Rho. "Tungsten-based ultrathin absorber for visible regime," Scientific reports, 8, 1, 1-8, 2018.
- [35] Y.Lin, Y.Cui, F.Ding, K.H.Fung, T.Ji, D.Li, Y.Hao. "Tungsten based anisotropic metamaterial as an ultra-broadband absorber," Optical Materials Express, 7, 2, 606-617, 2017.
- [36] G.Hou, Z.Wang, Z.Lu, H.Song, J.Xu, K.Chen. "Enhanced Broadband Plasmonic Absorbers with Tunable Light Management on Flexible Tapered Metasurface," ACS Applied Materials & Interfaces, 12, 50, 56178-56185, 2020.
- [37] A.D.Rakić, A.B.Djurišić, J.M.Elazar, M.L.Majewski. "Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices," Applied optics, 37, 22, 5271-5283, 1998.



A Plasmonic Nanostructure Based on Tungsten Octagram Nanoantennas to Enhance Absorption Spectrum in Solar Thermophotovoltaic Systems

...., ...* Eskandari, Mohammad Reza

Mirtavousi, Sayed Ayoub

Department of Electrical Engineering, Shahreza Campus, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Abstract: Plasmonic nanoantennas provides a flexible platform for manipulating the interactions of matter and light at the subwavelength scale, and opens up new avenues for the design of high-performance optical devices. In this paper, we propose a broadband and polarization-independent absorber based on tungsten (W) as a refractory plasmonic metal. This three-layer nanostructure comprises of a thick tungsten film, a thin spacer of SiO₂ with high-k dielectric on which a periodic array of tungsten octagram nanoparticles is deposited. The presence of several plasmonic polaritons with low decay rates in the proposed nanostructure provides a wide bandwidth from 250 to 1940 nm with more than 90% absorptivity. The bandwidth can be tailored by altering the thickness of the insulation layer and geometric dimensions of the nanoantennas. The proposed structure benefits from a planar, low profile and small footprint, and its optical characteristic is stable in a wide range of incident angle regardless of the polarization of the incident light. These features make the proposed metasurface a suitable candidate for high-efficiency conversion of solar energy in solar thermophotovoltaic systems.

Keywords: Plasmonic metasurfaces, Energy harvesting, Absorber, Solar thermophotovoltaic systems, Optical properties.