

فرا سطح فلز-عایق-فلز با نانو آنتن ضربدری شکل به عنوان جاذب کامل با پهنای باند بزرگ در ناحیه مادون قرمز نزدیک

حمیده همتی کلی^۱، ابراهیم مددی^{۲*}، و مجتبی نصیری^۱

۱. دانشکده علوم، گروه فیزیک، دانشگاه زنجان، زنجان

۲. دانشکده علوم مهندسی و مهندسی فیزیک، مرکز آموزش عالی فنی و مهندسی بوئین زهرا، بوئین زهرا

پست الکترونیکی: mnasiri@znu.ac.ir, madadi@bzte.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۱۱/۰۹؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۵/۰۴/۲۱)

چکیده:

در این مقاله، یک فرا سطح فلز-دی الکتریک-فلز پیشنهاد شده و اثر پارامترهای مختلف بر ویژگی‌های جذب آن بررسی شده است. این ساختار در ناحیه مادون قرمز نزدیک دارای جذب کامل موج الکترومغناطیسی با پهنای باند بزرگ است. ساختار هندسی مورد مطالعه، از دو میله طلا با مقطع مستطیلی با طول و عرض متفاوت در هر سلول واحد تشکیل شده است که به صورت یک آرایه دو بُعدی بر روی یک زیرلایه طلا با یک لایه میانی دی الکتریک، قرار گرفته است. شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده به روش المان محدود (FEM) نشان می‌دهند که با تنظیم پارامترهای هندسی این ساختار، از جمله ضخامت لایه میانی، زاویه چرخش یکی از میله‌ها، و جابه‌جایی یکی از میله‌ها نسبت به دیگری، می‌توان میزان جذب موج الکترومغناطیسی را در بازه طول موجی ۳۳۰ نانومتری به مقدار ۹۷٪ تا ۹۹/۸٪ رساند. به طور معادل، در این بازه طول موجی، بازتاب نزدیک صفر است. منشأ این جذب بالا را می‌توان به تداخل‌های ویرانگر ناشی از امواج متوالی خروجی از لایه دی الکتریک و تطابق امپدانس معادل در نانوآنتن‌ها و خلاء نسبت داد. این ساختار می‌تواند در حسگرهای مختلف و همچنین به عنوان جاذب‌های کامل در ناحیه مادون قرمز استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: فرا سطح فلز-عایق-فلز، جاذب کامل، ناحیه مادون قرمز، نانوآنتن ضربدری

۱. مقدمه

شیمیایی [۵]، و لیدار (LiDAR) [۶] اشاره کرد. اگرچه این ناحیه طیفی کاربردهای مختلفی در فناوری دارد، ولی استفاده از اجزای اپتیکی سنتی مانند عدسی‌ها، فیلترها، و جاذب‌ها با چالش‌هایی نظیر ابعاد بزرگ و وزن زیاد روبرو هستند. فرا سطح‌ها با توجه به کنترل امواج الکترومغناطیسی در ابعادی کمتر از طول موج گزینه مناسبی برای رفع این محدودیت‌ها هستند. فرا سطح‌ها ساختارهای مصنوعی تختی هستند که آرایه‌ای از اجزاء زیرطول موج تشکیل شده‌اند، این اجزاء شبه‌اتم یا نانوآنتن نامیده می‌شوند [۷]. با طراحی مناسب و مهندسی دقیق این نانوآنتن‌ها در مقیاس کوچکتر از میکرومتر، فرا سطح‌ها امکان کنترل دقیق دامنه، فاز و قطبش موج الکترومغناطیس تابیده بر آن‌ها را در فضایی بسیار کوچک فراهم

محدوده‌ای از طیف الکترومغناطیسی با طول موج تقریبی ۰/۷۵ تا ۲/۵ میکرومتر، ناحیه مادون قرمز نزدیک را تشکیل می‌دهد که در اپتیک و فوتونیک کاربردهای گسترده‌ای دارد. به دلیل برهم‌کنش شدید این بخش از طیف الکترومغناطیس با طیف وسیعی از مواد، مطالعه رفتار نوری در این ناحیه از اهمیت بالایی برخوردار است. به عنوان نمونه، بازه طول موجی $1/3 - 1/55 \mu m$ به دلیل پاشندگی کم برای ارتباطات اپتیکی کاربرد دارد [۱]. از دیگر کاربردهای طیف مادون قرمز نزدیک می‌توان به تصویربرداری مادون قرمز [۲]، حسگرهای مادون قرمز [۳]، تصویربرداری و تشخیص پزشکی [۴]، حسگرهای

می‌کنند [۸]. در میان طراحی‌های مختلف فراسطح‌ها، فراسطح فلز-عایق-فلز [۹] به دلیل امکان جذب کامل موج الکترومغناطیس توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است.

در فراسطح فلز-عایق-فلز، برهم‌کنش پلاسمون‌های سطحی لایه‌های فلزی و تداخل‌های اپتیکی در لایه دی‌الکتریک میانی منجر به جذب کامل می‌شود. یک فراسطح فلز-عایق-فلز از یک لایه فلزی زیرین که ضخامت آن از عمق پوسته آن بیشتر است، تشکیل شده است تا از عبور موج الکترومغناطیسی ممانعت کند. یک لایه دی‌الکتریک که مانند یک تیغه فابری-پرو عمل می‌کند بر روی فلز قرار دارد و در نهایت یک آرایه فلزی با طراحی خاص بر روی دی‌الکتریک میانی قرار گرفته است. انطباق امپدانس آرایه دوره‌ای و محیط و همچنین حذف امواج عبوری توسط لایه فلزی زیرین باعث کمینه شدن بازتاب موج الکترومغناطیسی و در نهایت دستیابی به جذب تقریباً کامل توسط فراسطح می‌شود.

ناحیه مادون قرمز به دلیل کاربردهای متعدد، همچون کنترل تابش گرمایی [۱۰]، آشکارسازی مادون قرمز [۱۱]، طیف‌نگاری [۱۲]، حسگرهای شیمیایی [۱۳]، و فناوری‌های پنهان‌کار [۱۴]، از اهمیت خاصی برخوردار است و مورد توجه محققان است. جاذب‌های کامل مبتنی بر فراسطح فلز-عایق-فلز با توجه به ابعاد کوچک، عدم حساسیت به قطبش در برخی از طراحی‌ها، و انتخاب مناسب طول موج برای استفاده در ناحیه مادون قرمز بسیار مناسب است. به علاوه، با مهندسی نانو آنتن‌های فراسطح، ضخامت و ضریب شکست دی‌الکتریک لایه میانی، به راحتی می‌توان طیف جذب را از مادون قرمز نزدیک تا مادون قرمز دور تنظیم کرد.

علی‌رغم موارد اشاره شده، هنوز چالش‌هایی برای دستیابی به پهنای باند وسیع در طیف جذب و قابلیت تنظیم‌پذیری فعال وجود دارد. برای رفع این چالش‌ها، با توجه به پیشرفت روش‌های ساخت در مقیاس‌های میکرومتری و نانومتری، از طراحی‌های چندلایه [۱۵]، تشدیدگرهای آمیخته [۱۶]، مواد با قابلیت تغییر فاز مانند دی‌اکسید وانادیوم [۱۷]، و مواد دو بعدی مانند گرافن [۱۸] استفاده می‌شود. این پیشرفت‌ها فراسطح فلز-

عایق-فلز را به عنوان گزینه مناسبی در صنعت قطعات فوتونیک در محدوده مادون قرمز معرفی کرده است.

در این مقاله، یک طراحی بسیار ساده مبتنی بر فراسطح فلز-عایق-فلز معرفی می‌شود که پهنای باند جذب تقریباً کامل حدود ۳۳۰ نانومتری را ارائه می‌دهد. در این فراسطح، لایه زیرین و آرایه دوره‌ای بالایی از جنس طلا و لایه میانی از جنس آلومینا (Al_2O_3) انتخاب شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با روش المان محدود در نرم افزار کامسول نشان می‌دهد که در محدوده مادون قرمز نزدیک، از طول موج ۱/۷۳ میکرومتر تا محدوده ۲/۰۵۵ میکرومتر، نرخ جذب بالای ۹۷٪ حاصل می‌شود. به‌ویژه، در طول موج ۱/۷۵۲ میکرومتر جذب ۹۹/۶٪ و در محدوده ۱/۹۲ تا ۲/۰۰۸ میکرومتر میزان جذب بیش از ۹۹/۴٪ است. این فراسطح پیشنهادی به دلیل سادگی در ساخت، می‌تواند در کاربردهایی مانند حسگرهای شیمیایی، جاذب‌های کامل در محدوده مادون قرمز، سامانه‌های پنهان‌کار و حسگرهای ضریب شکست استفاده کرد.

۲. پیاده‌سازی الگوی محاسباتی

ساختار مورد مطالعه، شامل دو میله مستطیلی از جنس طلا با آرایش ضربدری است (شکل ۱). میله نخست دارای پهنای $w_1 = 0.1 \mu m$ و طول $l_1 = 0.4 \mu m$ است و به موازات محور y قرار گرفته است. میله دوم به پهنای $w_2 = 0.08 \mu m$ و طول $l_2 = 0.5 \mu m$ با محور x زاویه α می‌سازد. ارتفاع این نانوآنتن $t_1 = 0.1 \mu m$ در نظر گرفته شده است. نانوآنتن‌ها به صورت آرایه دو بُعدی بر روی لایه دی‌الکتریک به ضخامت $t_2 = 0.25 \mu m$ از جنس Al_2O_3 قرار گرفته‌اند. برای ضریب دی‌الکتریک Al_2O_3 از کتابخانه کامسول استفاده شده است که برپایه مرجع [۱۹] استوار است. لایه زیرین طلا به ضخامت $t_3 = 0.2 \mu m$ در نظر گرفته شده است که از عمق پوسته آن در ناحیه طول موجی فراتر است و به طور کامل مانع از عبور امواج الکترومغناطیسی می‌شود. موج فرودی از هوا با قطبش خطی تحت زاویه θ نسبت به محور z در صفحه xz بر آرایه مورد نظر فرود می‌آید.

۳. نتایج

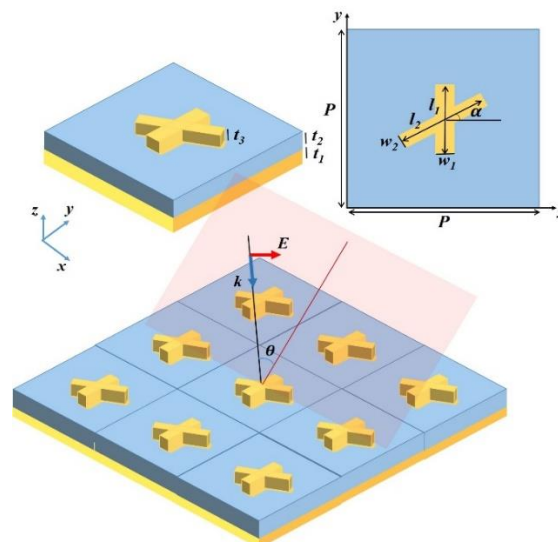
پس از تنظیمات اولیه الگو و محاسبه ماتریس پراکندگی، توان جذبی سطح جاذب^۲ به ازای پارامترهای مختلف به دست می آید. پس از بررسی های دقیق در بازه های طول موجی مختلف، بهترین بازه طول موجی برای دستیابی به بیشینه جذب در محدوده $1/6 - 2/4 \mu m$ تعیین شد. در ابتدا، توان جذب شده (شکل ۲، سمت چپ) و بازتابیده (شکل ۲، سمت راست) برای زاویه فرود قائم با قطبش جهت X ، برای زوایای مختلف α ، محاسبه شده اند. با توجه به شکل کاملاً آشکار است که برای زاویه $\alpha = 28^\circ$ ، طیف جذب در بازه طول موجی $1/73 - 2/056 \mu m$ بیش از ۹۷٪ است. شایان ذکر است که جذب در طول موج $1/752 \mu m$ برابر ۹۹/۶٪ است. همچنین، در یک بازه ۸۸ نانومتری، از طول موج $1/92 \mu m$ تا طول موج $2/008 \mu m$ ، جذب بیش از حدود ۹۹.۴٪ است (زیر تصویر شکل سمت چپ در شکل ۲). به طور خاص، در طول موج $1/968 \mu m$ میزان جذب به ۹۹.۹۵٪ می رسد. مقادیر شبیه سازی شده برای این فرا سطح با مقادیر تجربی و شبیه سازی های گزارش شده در مطالعات پیشین این حوزه قابل مقایسه هستند که در جدول ۱ ارائه شده است.

به طور معادل توان بازتابیده در این بازه و طول موج های مزبور تقریباً صفر است. باید توجه داشت در صورتی که امپدانس موثر فرا سطح با امپدانس موثر خلاء یکسان باشد، توان جذب صد درصد خواهد بود (شکل ۳). امپدانس نسبی Z_r مطابق رابطه زیر بیان می شود [۲۵]:

$$Z_r(\omega) = \frac{Z(\omega)}{Z_0} = \sqrt{\frac{(1+S_{11}(\omega))^2}{(1-S_{11}(\omega))^2}} \quad (2)$$

که در آن $Z(\omega)$ امپدانس موثر فرا سطح و Z_0 امپدانس موثر محیط است.

با توجه به نمودار سمت راست شکل ۳، در بازه طول موجی $1/73 \mu m$ تا $2/056 \mu m$ ، بخش موهومی امپدانس نسبی تقریباً صفر است، در حالی که بخش حقیقی آن در این بازه طول



شکل ۱. (ردیف بالا) شکل سمت راست نمای بالایی فرا سطح به همراه پارامترهای هندسی و شکل سمت چپ نیز نمای سه بعدی یک سلول واحد را نشان می دهند. (ردیف پایین) فرا سطح دوره ای شامل میله های مکعب مستطیلی ضربدری شکل بر روی لایه دی الکتریک به ضخامت t_1 و لایه زیرین طلا به ضخامت t_2 را نشان می دهد. صفحه فرود و جهت فرود موج الکترومغناطیسی با زاویه θ نسبت به محور Z و قطبش در صفحه فرود نشان داده شده است.

شرایط مرزی دوره ای در امتداد محور X و محور Y اعمال شده اند. سطح پائینی لایه طلا نیز به عنوان شرط مرزی PEC^۱ در نظر گرفته شده است. به منظور باز تولید میدان ها با دقت مناسب در نواحی مختلف، مش بندی چهار وجهی به گونه ای انجام شده است که ابعاد مش ها بیشتر از $\lambda/8$ نباشد. همچنین در نواحی مرزی و فصل مشترک ها، به ویژه در اطراف لبه های طرح و نواحی مرزی که گرادیان میدان در این نواحی شدیدتر است، از مش ریزتر استفاده شده است. همچنین کاهش بیشتر ابعاد مش در اجزای مختلف، تغییر محسوسی در نتایج ایجاد نمی کند. برای محاسبه توان جذب، نرم افزار کامسول شدت بازتابیده $R(\omega)$ و شدت عبوری $T(\omega)$ را، به ترتیب، با محاسبه عناصر ماتریس پراکندگی S_{11} و S_{21} تعیین می کند:

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) \\ = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \quad (1)$$

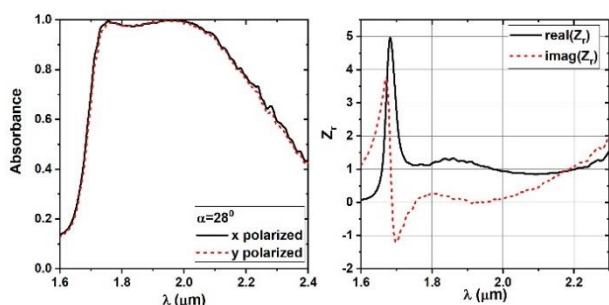
به دلیل وجود لایه طلا، ضریب عبور به طور کامل صفر است، بنابراین ضریب جذب مطابق رابطه $A(\omega) = 1 - |S_{11}|^2$ به دست می آید.

۱. Perfect Electric Conductor

۲. Absorbance

جدول ۱. مقایسه توان جذب فراسطح‌های مطالعه شده.

مرجع	نوع طراحی	دی الکتریک میانی	محدوده جذب بالا (میکرومتر)	توان جذب
[۲۰]	ترکیب ۱۶ تایی از میله‌های متقاطع و استوانه‌های طلا	SiO ₂	۰/۵ - ۱/۰	۹۰٪<
[۲۱]	۴ پنج ضلعی طلا	ZnS	۷/۸ - ۱۲/۱	۹۰٪<
[۲۲]	استوانه‌های طلا	SiO ₂	۰/۴۳ - ۰/۹	۹۰٪<
[۲۳]	میله‌های متقاطع از جنس کروم	SiO ₂	۰/۳ - ۱/۲	۹۰٪<
[۲۴]	حلقه به همراه ۴ نانوسیم طلا	SiO ₂ , Si ₃ N ₄ , Si	۹-۲۰	۹۳٪<

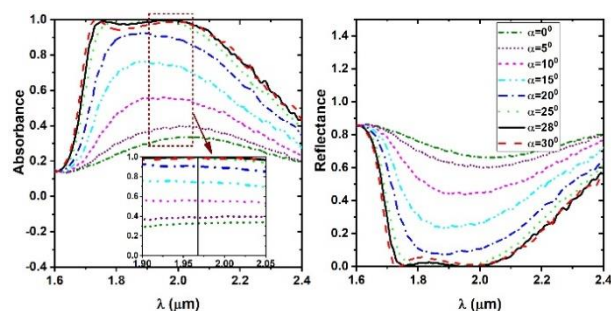


شکل ۳. (راست) نمودار بخش حقیقی و موهومی امپدانس نسبی فراسطح برای تابش قائم با قطبش X و زاویه $\alpha = 28^\circ$. (چپ) نمودار توان جذب برای تابش عمودی برای نانواتن ضربدری شکل با $\alpha = 28^\circ$ برای دو قطبش جهت X و قطبش جهت Y .

مولفه Z میدان الکتریکی، $|E_z|$ ، را در سطح مشترک نانواتن و دی الکتریک نشان می‌دهد. در این نواحی، بارهای الکتریکی القایی در انتهای میله‌ها قرار گرفته‌اند که نشان دهنده برانگیختگی دوقطبی‌های الکتریکی است.

در طول موج $1/752 \mu m$ ، بارهای الکتریکی بیشتری در دو انتهای میله مایل توزیع شده‌اند که نشان‌دهنده ایجاد دو قطبی الکتریکی قوی‌تر در امتداد این میله است؛ در مقابل، توزیع بار در دو انتهای میله قائم ضعیف‌تر بوده و در نتیجه دوقطبی ضعیف‌تری در این راستا ایجاد می‌شود. برعکس، در طول موج $1/912 \mu m$ توزیع بار در دو انتهای میله قائم بیشتر و در دو انتهای میله مایل کمتر است. همچنین، در طول موج $2 \mu m$ توزیع بار به طور کامل در دو انتهای میله‌ی قائم قرار گرفته است که نشان‌دهنده القای یک دوقطبی الکتریکی قوی در امتداد این میله است.

این شکل نشان می‌دهد که جذب حاصل از توزیع دوقطبی‌ها بر چند قطبی‌ها غالب است. ظهور تشدیدهای دوقطبی بر روی سطح

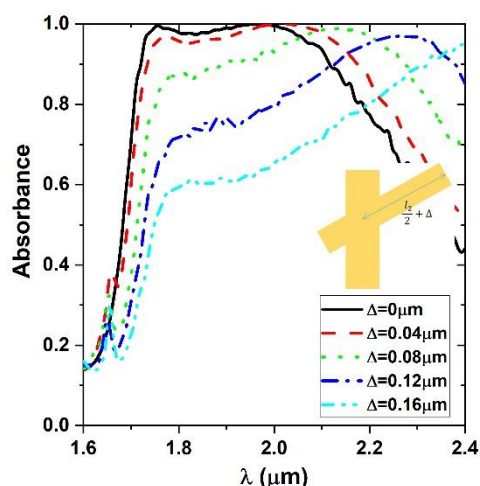


شکل ۴. (راست) نمودار توان بازتابیده به ازای مقادیر مختلف زاویه α و تابش قائم $\theta = 0^\circ$ ، (چپ) نمودار توان جذب به ازای مقادیر مختلف زاویه α و تابش قائم $\theta = 0^\circ$. تصویر درج‌شده در شکل سمت چپ، بزرگ‌نمایی بازه $1/9$ میکرومتر و $2/05$ میکرومتر است و خط قائم طول موج $1/968$ میکرومتر را نشان می‌دهد.

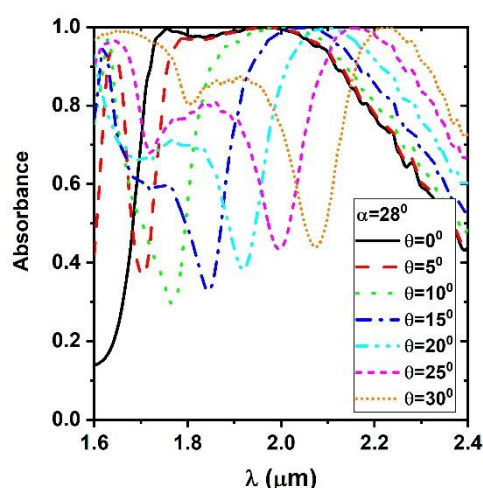
موجی حدود عدد یک است که به معنای انطباق امپدانس موثر فراسطح و محیط است.

نمودار سمت چپ شکل ۴، توان جذب شده را برای تابش قائم و دو قطبش X و Y نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشاهده می‌شود، توان جذب شده برای تابش عمود به جهت قطبش حساس نیست. برای مطالعه عملکرد جاذب کامل، توزیع میدان الکتریکی $|E|$ در سه طول موج مختلف بررسی شده است. توزیع میدان برای نانواتن ضربدری شکل با $\alpha = 28^\circ$ تحت تابش قائم موج الکترومغناطیسی با قطبش X در سطح مشترک نانواتن و لایه Al_2O_3 در شکل ۴ نشان داده شده است. ردیف بالای شکل، توزیع اندازه میدان الکتریکی را در سه طول موج مختلف، به ترتیب از چپ به راست، در طول موج‌های $1/752 \mu m$ ، $1/912 \mu m$ و $2 \mu m$ نشان می‌دهد.

همان‌گونه که از شکل مشاهده می‌شود، توزیع میدان در طول موج‌های مختلف متفاوت است و به طور کلی میدان‌ها در انتهای میله‌ها توزیع شده‌اند. ردیف پایین شکل ۴، توزیع اندازه



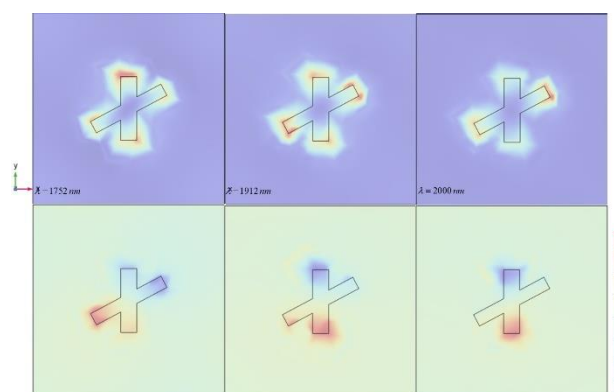
شکل ۶. نمودار توان جذب برحسب طول موج برای نانوآنتن ضربدری با زاویه $\alpha = 28^\circ$ برای تابش قائم با قطبش X برای مقادیر مختلف Δ .



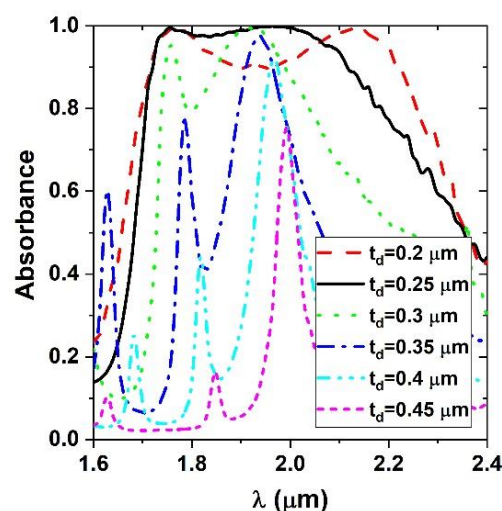
شکل ۷. نمودار توان جذب برحسب طول موج برای نانوآنتن ضربدری با زاویه $\alpha = 28^\circ$ برای قطبش TM در صفحه XZ برای زوایای θ مختلف.

همچنین قله تشدید در طول موج بلندتر با سرعت کمی کاهش می‌یابد و به تدریج انتقال قرمز می‌یابد. درحالی‌که، قله واقع در طول موج کمتر به مقدار بسیار زیادی کاهش می‌یابد و به سمت طول موج‌های بلند منتقل می‌شود. به‌علاوه، در طول موج‌های نزدیک $0.16 \mu m$ تشدیدهای ناشی از برانگیختگی چندقطبی‌های الکتریکی به‌صورت قله‌های کوچک ظاهر می‌شوند.

در ادامه، برای دستیابی به پهنای جذب بزرگ‌تر تغییر در هندسه مورد نظر مطالعه شد. در این بخش، میله مورب به اندازه Δ در امتداد همان میله جابه‌جا می‌شود. شکل ۶، نمودار توان



شکل ۴. (ردیف بالا) توزیع اندازه میدان الکتریکی $|\vec{E}|$ ، از چپ به راست در طول موج‌های $1752 \mu m$ ، $1912 \mu m$ و $2000 \mu m$. (ردیف پایین) توزیع اندازه مولفه Z میدان الکتریکی، $|E_z|$ ، از چپ به راست در طول موج‌های $1752 \mu m$ ، $1912 \mu m$ و $2000 \mu m$.



شکل ۵. نمودار توان جذب برحسب طول موج برای نانوآنتن ضربدری با زاویه $\alpha = 28^\circ$ برای تابش قائم با قطبش X برای ضخامت‌های مختلف لایه دی‌الکتریک.

مشترک نانوآنتن‌ها و دی‌الکتریک می‌تواند به تشدید پلاسمون‌های سطحی جایگزیده در سطح دی‌الکتریک مرتبط باشد [۲۶].

شکل ۵، توان جذب فرا سطح را برای ضخامت‌های مختلف لایه دی‌الکتریک نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشخص است، هنگامی‌که ضخامت لایه دی‌الکتریک $t_d = 0.2 \mu m$ است، توان جذب در یک بازه 400 نانومتر بیش از 90% است و وقتی ضخامت لایه $t_d = 0.25 \mu m$ است، جذب در بازه طول موجی به پهنای 330 نانومتر به بیش از 97% می‌رسد. برای ضخامت‌های بالاتر به تدریج توان جذب کاهش یافته و پهنای قله جذب کم می‌شود.

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش، یک فراسطح فلز-عایق-فلز مبتنی بر نانوآنتن‌های ضربدری شکل طراحی و به صورت عددی بررسی شد. نتایج نشان دادند که با انتخاب مناسب ابعاد سلول واحد، ضخامت لایه‌ها و ابعاد میله‌ها می‌توان به یک جاذب کامل با جذب بالای ۹۷٪ در یک بازه طول موجی به پهنای حدود ۳۳۰ نانومتر دست یافت. این مطالعه، برای طیف وسیعی از پارامترها انجام شده است و اثر پارامترهای مختلف نشان داده شده‌اند. این مطالعه نشان می‌دهد که برای تابش قائم و زاویه $\alpha = 28^\circ$ طیف جذب وابستگی محسوسی به جهت قطبش X و Y ندارد. همچنین، این مطالعه نشان می‌دهد که برای تابش قائم در یک بازه طول موجی ۸۰ نانومتری از طول موج $1/92 \mu m$ تا $2 \mu m$ جذب بیش از ۹۹/۴٪ است. در نهایت، سادگی نسبی ساختار، قابلیت کنترل ویژگی‌های جذب از طریق پارامترهای هندسی و دستیابی به جذب بالا در یک پهنای باند نسبتاً وسیع، این فراسطح را به گزینه‌ای مناسب برای کاربردهایی نظیر پنهان‌سازی الکترومغناطیسی، حسگرها، جاذب‌های کامل و سایر سامانه‌های کنترل و جذب امواج الکترومغناطیسی تبدیل می‌کند.

جذب فراسطح را برای مقادیر مختلف Δ نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با جابه‌جا کردن میله، پهنای طیف به شدت افزایش می‌یابد و قله واقع در طول موج بلندتر به آرامی کاهش می‌یابد، در حالی که قله واقع در طول موج کمتر به شدت کاهش می‌یابد و انتقال قرمز پیدا می‌کند. به عنوان نمونه، برای $\Delta = 0/16 \mu m$ طول موج بالاتر به بالای $2/4 \mu m$ منتقل می‌شود و توان جذب در طول موج کمتر به ۶۰٪ کاهش می‌یابد.

مطالعه جذب فراسطح پیشنهاد شده برای زوایای مختلف فرود نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در شکل ۷، اثر زاویه فرود بر میزان جذب برای زوایای مختلف فرود و برای قطبش TM نشان داده شده است. همان‌گونه که از شکل آشکار است، قله‌ای که در طول موج بزرگ‌تر قرار دارد به سمت طول موج‌های بلندتر منتقل می‌شود. همچنین پهنای طیف جذب با افزایش زاویه فرود کاهش می‌یابد. علاوه بر این، قله‌های تشدید ناشی از برانگیختگی چندقطبی‌ها از ناحیه طول موج‌های کوتاه‌تر نمایان می‌شوند. به عنوان نمونه، در زاویه تابش $\theta = 3^\circ$ ، به جز در بازه طول موجی $1/98 \mu m$ تا $2/13 \mu m$ ، توان جذب بیش از ۸۰٪ است.

مراجع

1. G V Naik, V M Shalaev, and A Boltasseva, *Proc.SPIE* 7754, Metamaterials: Fundamentals and Applications III 7754OM (2010).
2. S Turker-Kaya, and C W Huck, *Molecules*, **22** (2017) 168.
3. C L Amiot, S Xu, S Liang, L Pan, and J X Zhao, *Sensors*, **8** (2008) 3082.
4. Z Mahmut, C Zhang, F Ruan, N Shi, X Zhang, Z Tang, B Dong, D Gao, and J Sun, *Molecules*, **28** (2023) 6085.
5. B Mizaikoff, *Chemical Society Reviews*, **42** (2013) 8683.
6. S Lee, K Yasumoti, M Morita, H Kawanishi, and S Kawahito, *Sensors*, **20** (2020) 116.
7. X Hao, Y Chen, M Liu, X Min, X Cheng, Q Wang, Q Xu, X Zhang, and J Han, *Advanced Optical Materilas*, **12** (2024) 2302975.
8. P Xie, W Wang, and Y Kivshar, *Applied Physics Reviews*, **12** (2025) 021307.
9. N L Landy, S Sajuyigbe, J J Mock, D R Smith, and W J Padilla, *Phys. Rev. Lett.*, **100** (2008) 207402.
10. I M Watson, V J Realmuto, W I Rose, A J Prata, G J S Bluth, Y Gu, C E Bader, and T Yu, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **135** (2004) 75.
11. A Rogalski, *Infrared Physics and Technology*, **54** (2011) 136.
12. X Cui, X Cui, Q Zhu, S Yin, X Shi, L Zhang, B Yu, Y Hong, and W Chen, *Sensors and Actuators B: Chemical*, **430** (2025) 137329.
13. N Argiris, A Achilleos, N Alizadeh, C Argiris, and G Sourkouni, *Sensors*, **25** (2025) 673.
14. G Xu, Q Kang, X Zhang, W Wang, K Guo, and Z Guo, *International Journal of Thermal Sciences*, **207** (2025) 109392.

15. O V Kotov, and Y E Lozovik, *Phys. Rev. B*, **96** (2017) 235403.
16. Y Zhang, D Chen, W Ma, S You, J Zhang, M Fan, and C Zhou, *Optics Letters*, **47** (2022) 5517.
17. B Shui, Y Yi, C Ma, Z Yi, G Li, L Zeng, Q Zeng, P Wu, and Y Yi, *Dalton Transactions*, **53** (2024) 10618.
18. A Andryieuski, and A V Lavrinenko, *Optics Express*, **21** (2013) 9144.
19. R Boidin, T Halenkovic, V Nazabal, L Benes, and P Nemec, *Ceramics International*, **42** (2016) 1177.
20. A K Azad, W J M Kort-Kamp, M Sykora, N R Weisse-Bernstein, T S Luk, A J Taylor, D A R Dalvit, and H T Chen, *Scientific Reports*, **6** (2016) 20347.
21. W Guo, Y Liu, and T Han, *Optics Express*, **24** (2016) 20586.
22. D Katrodiya, C Jani, V Sorathiya, and S K Patel, *Optical Materials*, **89** (2019) 34.
23. A S Rana, M Zubair, Y Chen, Z Wang, J Deng, M T S Chani, A Danner, J Teng, M Q Mehmood, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **171** (2023) 113005.
24. J Wang, H Yang, Z Yi, J Wang, S Cheng, B Li, and P Wu, *Photonics*, **12** (2025) 451.
25. W J Padilla, K Fan, *Metamaterial Electromagnetic Wave Absorbers*, Morgan & Claypool Publishers, (2022).
26. O A Yeshchenko, V V Kozachenko, A V Tomchuk, M Kaftel, R J Knize, A O Pinchuk, *The Journal Of Physical Chemistry C*, **123** (2019) 13057.