



جاذب کامل پهن باند قابل تنظیم مبتنی بر گرافن

رامین جودی^۱، مجتبی نصیری^{۱*}، و ابراهیم مددی^۲

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

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۱۶؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۴/۰۶/۱۰)

چکیده:

در این مقاله، یک فراسطح گرافنی طراحی و بررسی شده است که به عنوان جاذب موج الکترومغناطیسی در ناحیه تراهرتز عمل می کند. ساختار هندسی پیشنهادی، از یک حلقه گرافنی با چهار شکاف در هر سلول واحد تشکیل شده است که به صورت آزایی دوبعدی روی یک زیرلایه دی الکتریک قرار گرفته است. نتایج به دست آمده با استفاده از شبیه سازی به روش المان محدود نشان می دهند که با تنظیم پارامترهای هندسی و فیزیکی این ساختار مانند گشودگی شکاف ها، شعاع داخلی و خارجی حلقه و همچنین انرژی فرمی گرافن، جذب موج الکترومغناطیسی توسط این ساختار در یک بازه بسامدی خاص بسیار بالا می رود. این عملکرد عالی در جذب، ناشی از تشدید پلاسمون های سطحی در گرافن و همچنین تشدید مدهای مغناطیسی القایی در ساختار حلقه ای است. ساختار پیشنهادی دارای قابلیت تنظیم پذیری بالا و سادگی در ساخت است و می تواند در حسگرهای تراهرتز، جاذب های قابل تنظیم و سامانه های پنهان کار استفاده شود.

واژه های کلیدی: فراسطح، گرافن، جاذب کامل، تراهرتز

۱. مقدمه

یک لایه فلزی و لایه میانی دی الکتریک و لایه بالایی متشکل از ساختارهای تشدیدی با طرح های مختلف دوره ای از جنس فلز یا دی الکتریک است و عملکرد آنها بر پدیده های پلاسمون سطحی یا تشدیدهای الکترومغناطیسی مبتنی است [۸]. به دلیل داشتن الکترون های آزاد سطحی و پاسخ قوی به امواج الکترومغناطیسی از فلزات نجیب مانند طلا و نقره به طور گسترده ای در طراحی فراسطح های پلاسمونیک استفاده می شوند. این فلزات در طول موج های مرئی و مادون قرمز، رفتار تشدیدی قوی ایجاد می کنند که منجر به جذب بالای نور می شود [۹]. با این حال، این فلزات دارای اتلاف اهمی زیاد در بسامدهای بالا به ویژه در ناحیه تراهرتز، عدم قابلیت تنظیم پذیری و همچنین عدم انعطاف پذیری هستند [۱۰]. این محدودیت ها سبب پیشنهاد مواد جایگزین مانند

فراسطح ها ساختارهای مصنوعی از مرتبه طول موج الکترومغناطیسی هستند و به دلیل ویژگی های ویژه و قابلیت کنترل دقیق امواج الکترومغناطیسی، کاربردهای فراوانی در زمینه های مختلف علوم و مهندسی پیدا کرده اند [۱]. این سطوح قادرند با بهره گیری از تغییرات در ویژگی های اپتیکی محیط، اندازه و شکل تشدیدگرهای آن در کاربردهایی مانند تصویربرداری های دقیق، حسگرهای زیستی، جاذب های کامل نوری و حتی فناوری های پنهان کار استفاده شوند [۲-۶]. از میان انواع مختلف فراسطح، جاذب های نوری به ویژه جاذب های کامل [۷]، به دلیل کاربردهای فراوان آن در حوزه میکروموج ها مورد توجه قرار گرفته اند. لایه زیرین این سطوح جاذب معمولاً

نشان‌دهنده ذخیره انرژی مغناطیسی است. این الگو را می‌توان برای تحلیل رفتار تشدید و پهنای باند جذب استفاده کرد [۲۰].

در این مقاله، یک آرایه دوبعدی متقارن تشکیل شده از سلول‌های حلقه‌ای از جنس گرافن با چهار شکاف طراحی شده است که به عنوان یک جاذب کامل در محدوده بسامدی تراهرتز در نظر گرفته می‌شود. گرافن بدین منظور انتخاب شده است که بتوان با استفاده از یک عامل خارجی پهنای جذب را تنظیم کرد. با استفاده از یک ولتاژ خارجی و یا افزودن ناخالصی می‌توان انرژی سطح فرمی گرافن را تغییر داد که منجر به تغییرات در پهنای طیف جذب فراسطح می‌شود. بررسی جذب توسط ساختار ارائه شده در این مقاله، از روش المان محدود (FEM) در محیط نرم‌افزار COMSOL Multiphysics استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که با بهینه‌سازی پارامترهای هندسی ساختار و تنظیم مناسب انرژی فرمی گرافن، می‌توان جذب نزدیک به صد درصد در بازه بسامدی به پهنای تقریبی یک تراهرتز دست یافت. این سامانه به دلیل قابلیت تنظیم‌پذیری و سادگی در ساخت، می‌تواند در کاربردهایی مانند حسگرهای تراهرتز، جاذب‌های قابل تنظیم و سامانه‌های پنهان‌کار مورد استفاده قرار گیرد.

۲. پیاده‌سازی الگوی محاسباتی

ساختار مورد مطالعه، شامل حلقه‌های گرافنی با شعاع R_1 و $R_2 = R_1 + \Delta R$ است که دارای چهار شکاف با گشودگی 2θ حول زوایای ۴۵، ۱۳۵، ۲۲۵ و ۳۱۵ درجه است. این حلقه‌ها به صورت آرایه دوبعدی روی سطح دی‌الکتریک با اتلاف کم از جنس پلیمر TOPAS [۲۱] با ضریب شکست $n = 1/53$ و ضخامت d قرار گرفته‌اند. موج فرودی از هوا با قطبش خطی در جهت محور x به طور عمود بر آرایه مورد نظر فرود می‌آید. در شکل ۱، هندسه آرایه مورد نظر و چینش گرافن در هر سلول آمده است.

هندسه دو بعدی مورد نظر دارای تقارن چرخشی ۹۰ درجه پادساعتگرد (C_4) است، بنابراین می‌توان با اعمال شرط مرزی

دی‌الکتریک‌های با ثابت دی‌الکتریک بزرگ شده‌اند [۱۱]. همچنین می‌توان از مواد قابل تنظیم و قابل انعطاف مانند دی‌اکسید وانادیوم (VO_2)، نیم‌رساناهای دو بعدی مانند دی‌سولفید مولیبیدیم (MoS_2)، دی‌سولفید تنگستن (WS_2) و گرافن برای غلبه بر اتلاف اهمی استفاده کرد. یکی از مهمترین مواد به کار رفته گرافن است که دارای ویژگی‌های خاص الکتریکی و اپتیکی است و می‌تواند نقش مهمی در توسعه فراسطح‌ها داشته باشد [۱۲-۱۴]. گرافن با داشتن ضخامت بسیار کم و پاسخ قوی به امواج الکترومغناطیسی در ناحیه تراهرتز و مادون قرمز برخی مشکلات فراسطح‌های معمول را برطرف می‌کند.

سازوکارهای مختلفی باعث جذب موج الکترومغناطیسی در فراسطح‌ها می‌شود که می‌توان به جذب ذاتی مواد مورد استفاده، تشدید پلاسمونی سطحی، تشدید می^۱ و جذب کامل حاصل از انطباق امپدانس محیط و فراسطح اشاره کرد [۱۵-۱۷]. به‌علاوه، در ساختار فراسطح، جذب نور در نتیجه هم‌فازی بین میدان الکترومغناطیسی تابشی و میدان القایی در ساختار است. وقتی بسامد تابش خارجی با بسامد طبیعی ساختار (بسامد تشدید) منطبق باشد، شدت میدان داخلی به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این پدیده باعث جذب قوی نور در ساختار می‌شود [۱۸]. با مهندسی درست طرح‌های یک فراسطح می‌توان میزان جذب موج الکترومغناطیسی، محدوده بسامدی جذب و پهنای طیف جذب را تنظیم کرد. یکی از ساختارهای اولیه و پرکاربرد در این زمینه استفاده از حلقه‌های تشدید است [۱۹]. در ساختارهای حلقه‌ای یا شکاف‌دار، پراکندگی قوی امواج و همچنین تشدیدهای الکتریکی و مغناطیسی نقش مهمی در ایجاد جذب بالا دارند. به ویژه، تشدیدهای مغناطیسی در آرایه‌های دوره‌ای می‌توانند منجر به تشکیل جریان‌های حلقوی شوند که مشابه با مدارهای LC (خازن- القاگر) عمل می‌کنند [۲۰]. در حالت کلی‌تر، جذب کامل در فراسطح را می‌توان با استفاده از الگوهای مداری RLC (مقاومت، القاگر، خازن) توصیف کرد. در این الگو، مقاومت نشان‌دهنده اتلاف حاصل از جذب، خازن نماینده ذخیره انرژی الکتریکی و القاگر

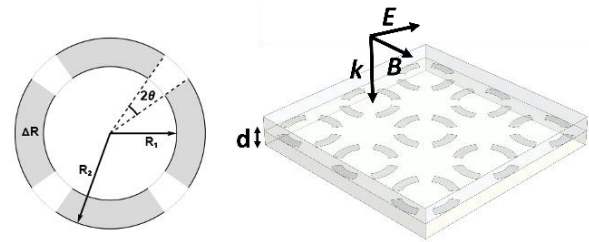
چشم‌پوشی است [۲۲].

۳. نتایج

پس از تنظیمات اولیه الگو با اعمال موج تخت تابشی با توان $P=1W$ و محاسبه عناصر ماتریس پراکندگی، توان جذبی سطح جاذب به ازای پارامترهای مختلف از رابطه $A=1-|S_{11}|^2-|S_{22}|^2$ به دست می‌آید. در این رابطه S_{11} ضریب بازتاب و S_{22} ضریب عبور است. پس از بررسی‌های مختلف در بازه‌های متفاوت از پارامترها، سعی شده است که بهترین مقادیر برای دست‌یابی به بیشینه جذب در یک بازه نسبتاً بزرگ بسامدی در ناحیه تراهرتز پیشنهاد شود. شکل ۲، چند نمودار جذب به ازای $d=17/6 \mu m$ ، $E_f=0.8 eV$ ، $\theta=8^\circ$ و مقادیر مختلف ΔR را نشان می‌دهد. همان‌طور که می‌بینیم ناحیه‌ای نسبتاً هموار در نمودار جذب در بازه ۲ تا ۳ تراهرتز وجود دارد.

در شکل ۲، جذب این ساختار بر حسب ضخامت‌های مختلف حلقه تشدید نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با انتخاب پارامتر ضخامت برابر $16 \mu m$ جذب این ساختار در بازه ۲ تا ۳ تراهرتز بیش از ۹۹٪ است. با افزایش ضخامت به مقدار $24 \mu m$ پهنای باند افزایش می‌یابد و در بازه بسامدی حدود $1/5-4$ تراهرتز جذب بالای حدود ۸۰٪ مشاهده می‌شود. انرژی فرمی گرافن، پارامتر قابل تنظیم دیگری است که بر پهنای باند جذب تاثیر می‌گذارد و می‌توان آن را توسط ناخالصی یا ولتاژ دروازه خارجی کنترل کرد. شکل ۳، نمودار تغییرات میزان جذب را برای انرژی‌های فرمی مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود با افزایش انرژی فرمی، جذب این ساختار به شدت افزایش می‌یابد و به بالای ۹۹٪ می‌رسد، درحالی‌که در نقطه دیراک یعنی $E_f=0 eV$ بسیار کم و در بیشینه خود کمتر از ۲۰٪ است. به عنوان مثال، برای انرژی فرمی $E_f=0.8 eV$ و ضخامت $16 \mu m$ ، جذبی بیش از ۹۹٪ در بازه بسامدی ۲-۳ تراهرتز مشاهده می‌شود.

افزایش انرژی سطح فرمی گرافن رسانایی سطحی گرافن را



شکل ۱. (راست) فراسطح دوره‌ای شامل حلقه‌های گرافن شکاف‌دار بر روی لایه دی‌الکتریک به ضخامت d ، (چپ) پارامترهای هندسی هر سلول گرافن.

دوره‌ای مناسب فقط قسمتی از فراسطح را که در ناحیه اول مختصات قرار گرفته بررسی نمود و پاسخ به دست آمده را به سه ناحیه دیگر تعمیم داد. این رهیافت سبب صرفه‌جویی چهار برابری در زمان و حافظه خواهد شد. سطح پائینی لایه دی‌الکتریک و سطوح جانبی سلول واحد به عنوان شرط مرزی PEC^۱ در نظر گرفته شده است. در عمل، لایه زیرین سطح دی‌الکتریک می‌تواند لایه نازکی از طلا با ضخامت مناسب از مرتبه عمق نفوذ موج الکترومغناطیس باشد تا امکان جذب کامل در ناحیه تراهرتز فراهم شود. در ضمن روی سطوح جانبی شرط مرزی دوره‌ای PMC^۲ اعمال شده است. لایه نازک گرافن اعمال شده یک سطح بسیار نازک با ضخامت تقریبی $1 nm$ است که یک سطح رسانا است و رسانایی آن از رابطه کوبو (Kubo) پیروی می‌کند. طبق این رابطه، رسانایی گرافن به صورت مجموع دو جمله رسانش درون‌نواری (σ_{inter}) و رسانش میان‌نواری (σ_{intra}) به صورت زیر نوشته می‌شود [۲۲]:

$$\sigma = \sigma_{inter} + \sigma_{intra} \quad (1)$$

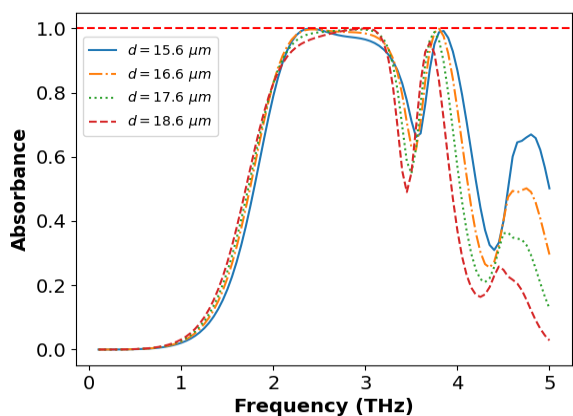
$$\sigma_{intra} = \frac{\gamma k_B T e^2}{\pi \hbar^2} \ln \left(\gamma \cosh \frac{E_f}{\gamma k_B T} \right) \left(\frac{i}{\omega + i\tau^{-1}} \right) \quad (2)$$

$$\sigma_{inter} = \frac{1}{4} \frac{e^2 \gamma}{\omega} \left(H \left(\frac{\omega}{\gamma} \right) + i \frac{\omega}{\pi} \int_0^\infty \frac{H(\omega) - H(\frac{\omega}{\gamma})}{\omega^2 - \Omega^2} d\Omega \right) \quad (3)$$

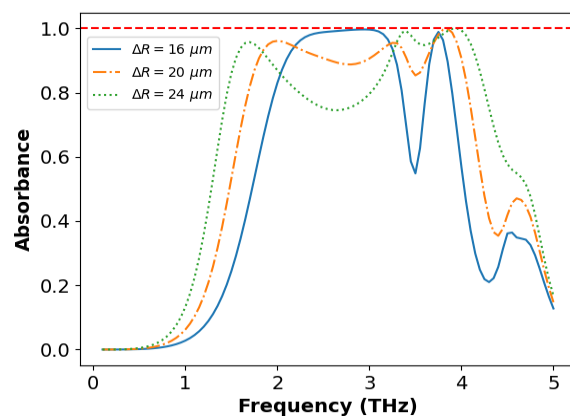
که در آن $H(\omega) = \sinh \left(\frac{\hbar \omega}{k_B T} \right) / \left[\cosh \left(\frac{\hbar \omega}{k_B T} \right) + \cosh \left(\frac{E_f}{k_B T} \right) \right]$ و T دمای محیط برابر با $K=300$ است. $\tau=10^{-13} s$ زمان واهلش و E_f انرژی فرمی گرافن است که می‌تواند مقادیر متفاوتی داشته باشد. در ناحیه بسامدی تراهرتز ($\hbar \omega \ll E_f$) که در این مقاله بررسی شده است، جمله σ_{inter} در مقایسه با σ_{intra} قابل

۱. Perfect Electric Conductor

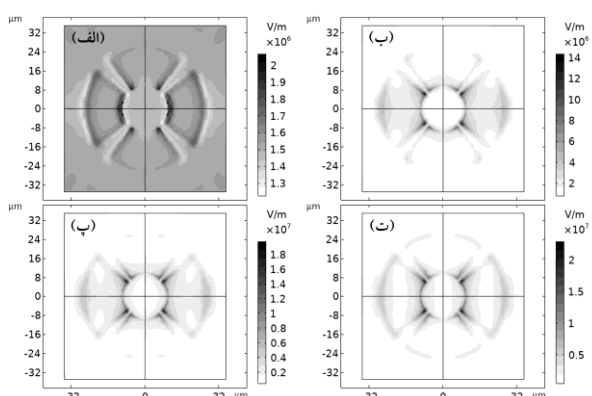
۲. Perfect Magnetic Conductor



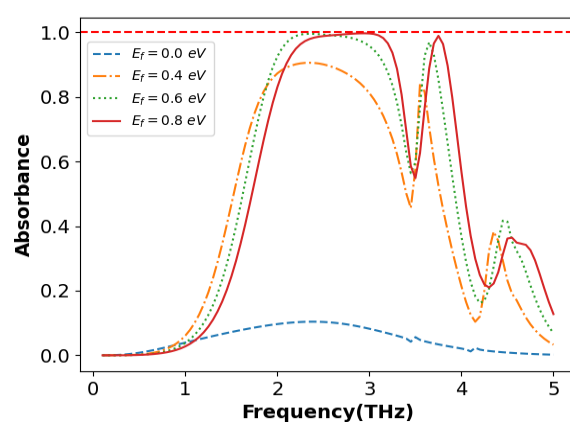
شکل ۱. نمودار توان جذب به ازای مقادیر مختلف ضخامت تیغه دی الکتریک d ، $E_f = 0.8 \text{ eV}$ و $\theta = 8^\circ$.



شکل ۲. نمودار توان جذب به ازای مقادیر مختلف ΔR ، $E_f = 0.8 \text{ eV}$ و $\theta = 8^\circ$.



شکل ۳. شدت میدان الکتریکی در سطح فراسطح. با افزایش انرژی سطح فرمی شدت میدان در نواحی نزدیک لبه ها به شدت افزایش می یابد.



شکل ۴. نمودار توان جذب به ازای مقادیر مختلف E_f ، $\Delta R = 16 \mu\text{m}$ و $\theta = 8^\circ$.

پارامتر تغییرات جزئی در میزان جذب این ساختار ایجاد می کند. لذا مناسب ترین انتخاب تقریباً $d = 17.6 \mu\text{m}$ خواهد بود. یکی از مهمترین ویژگی های قابل بررسی در این سامانه، توزیع شدت میدان الکتریکی در سطح است که منجر به درک عمیق تر از فرآیند جذب می شود.

انتظار داریم با افزایش شدت میدان الکتریکی در سطح افزایش یابد. شکل ۵، توزیع شدت میدان الکتریکی را برای مقادیر $d = 17.6 \mu\text{m}$ ، $\Delta R = 16 \mu\text{m}$ و $E_f = 0.8 \text{ eV}$ در بسامد ۳ تراهرتز نشان می دهد.

همان گونه که در شکل های ۵ دیده می شود با توجه به افزایش انرژی سطح فرمی و در پی آن افزایش ویژگی پلاسمونی در گرافن، ممان های الکتریکی و مغناطیسی در گرافن تحریک می شوند و در نتیجه توزیع شدت در لبه های حلقه گرافنی به شدت افزایش می یابد.

به طور چشم گیری تغییر می دهد که منجر به از بین رفتن انطباق امپدانس جاذب و فضای آزاد می شود که نهایتاً طیف جذب متفاوتی به وجود می آید. وقتی انرژی سطح فرمی گرافن از 0 eV به 0.8 eV افزایش می یابد پهنای باند جذب به تدریج افزایش می یابد.

به علاوه، طیف جذب به آرامی به سمت طول موج های آبی جابه جا می شود و کیفیت جذب افزایش می یابد. با افزایش انرژی فرمی، تجمع حامل های بار و ضریب گذردهی گرافن افزایش می یابد و سطح گرافن ویژگی های پلاسمونی بهتری را بروز می دهد که با محدوده بسامدی تراهرتز برهم کنش می کند که پهنای باند را افزایش می دهد، در حالی که در نقطه دیراک گرافن همچون یک دی الکتریک رفتار می کند.

در این مقاله، اثر ضخامت دی الکتریک در میزان جذب نیز بررسی شده است. شکل ۴، توان جذب ساختار را برای مقادیر مختلف d نشان می دهد. با توجه به شکل واضح است که این

۴. نتیجه گیری

الکترومغناطیسی تراهرتز را به خوبی جذب می کند که به نوبه خود باعث افزایش پهنای جذب و افزایش کیفیت جذب می شود. محاسبات نشان می دهد که با افزایش انرژی فرمی، طیف جذب به سمت طول موج های کوتاه تر منتقل می شود.

همچنین شبیه سازی ها نشان می دهند که ضخامت حلقه گرافنی پارامتر مناسبی برای تنظیم پهنای باند جذب و کیفیت جذب است. به طوری که، افزایش ضخامت حلقه پهنای جذب با کیفیت بالای ۸۰% را به بسامدهای بیش از ۳ تراهرتز افزایش می دهد. با توجه به سادگی در ساخت و قابلیت کنترل پهنای جذب با استفاده از ولتاژ خارجی در این ساختار و نتایج شبیه سازی، این ساختار می تواند در کاربردهای متعددی مانند پنهان کاری، حسگری و جاذب های کامل مورد استفاده قرار گیرد.

فرا سطح طراحی شده با توجه به دارا بودن شکاف های خازنی متقارن نسبت به قطبش حساس نبوده و می تواند برای جذب قطبش های مختلف به کار رود. با توجه به مرجع [۲۳]، بیشترین جذب گرافن در ناحیه تراهرتز در نزدیکی فرود عمودی رخ می دهد. به همین دلیل در این مقاله نیز موج فرودی به صورت عمود بر سطح در نظر گرفته شده است. البته می توان با تغییر اندکی در محاسبات فرود مایل میدان را نیز در نظر گرفت. گرافن در انرژی فرمی صفر مانند یک دی الکتریک رفتار می کند و جذب کمی در محدوده تراهرتز نشان می دهد. در حالی که، افزایش انرژی فرمی با افزایش تجمع حامل های بار منجر به افزایش ویژگی های پلاسمونی گرافن شده و موج

۸. مراجع

1. V G Veselago, *Sov. Phys. Usp.* **10** (1968) 509.
2. D S Wilbert, M P Hokmabadi, J Martinez, P Kung, and M S Kim, *Proc. SPIE* **8585** (2013) 8585Y.
3. P Mandal, *Plasmonics* **11** (2016) 223.
4. S Luo, J Zhao, D Zuo, and X Wang, *Opt. Express* **24** (2016) 9288.
5. P Bogdan, E Jonckheere, and S Schirmer, *Chaos Solitons & Fractals* **103** (2017) 622.
6. M S Khan, R. A Shakoob, O Fayyaz, and E M Ahmed, *Optik* **297** (2024) 171575.
7. N L Landy, S Sajuyigbe, J J Mock, D R Smith, and W J Padilla, *Phys. Rev. Lett.* **100** (2008) 207402.
8. P Yu, L V Besteiro, Y Huang, J Wu, L Fu, H H Tan, C Jagadish, G P Wiederrecht, A O. Govorov, and Z Wang, *Adv. Opt. Mater.* **7** (2019) 1800995.
9. J Bhattacharya, N Chakraborty, S Pattnaik, W D Slafer, R Biswas, and V L Dalal, *Appl. Phys. Lett.* **99** (2011) 131114.
10. S V Boriskina, T A Cooper, L Zeng, G Ni, J K Tong, Y Tsurimaki, Y Huang, L Meroueh, G Mahan, and G Chen, *Adv. Opt. Photon.* **9** (2017) 775.
11. S M Kamali, E Arbabi, A Arbabi, and A Faraon, *Nanophotonics* **7** (2018) 1041.
12. J Cheng, F Fan, and S Chang, *Nanomaterials* **9** (2019) 398.
13. N Muhammad, Y Chen, C W Qiu, and G P Wang, *Nano Lett.* **21** (2021) 967.
14. H Zhao, W Wang, H Ding, S Wang, Z Tang, S Li, J Wang, Y Wang, Q Zhou, A Wang, Y Yu, and L Gao, *Sci. China Inf. Sci.* **68** (2025) 179403.
15. W L Barnes, A Dereux, and T W Ebbesen, *Nature* **424** (2003) 824.
16. Z L Hou, X Gao, J Zhang, and G Wang, *Carbon* **222** (2024) 118935.
17. J A Schuller, E S Barnard, W Cai, Y C Jun, J S White, and M L Brongersma, *Nat. Mater.* **9** (2010) 193.
18. L La Spada, *Sensors* **19** (2019) 355.
19. X Hao, Y Chen, M Liu, X Min, X Cheng, Q Wang, Q Xu, X Zhang, and J Han, *Adv. Opt. Mater.* **12** (2024) 2302975.
20. L Li, Y Shi, and T J Cui, "Electromagnetic Metamaterials and Metasurfaces: From Theory To Applications", Xidian University Press, (2024).
21. P D Cunningham, N N Valdes, F A Vallejo, L M Hayden, B Polishak, X H Zhou, J Luo, A K Y Jen, J C Williams, and R J Twieg, *J. Appl. Phys.* **109** (2011) 043505.
22. A Andryieuski and A V Lavrinenko, *Opt. Express* **21** (2013) 9144.
23. S Dash, C Liaskos, I F Akyildiz, and A Pitsillides, "IEEE Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW)", Riga, Latvia, (2019).