

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

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 آرایه دوبعدی روی یک زیرلایه دی الکتریک قرار گرفته است. نتایج بدست 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 فرکانسی 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 سیستم های پنهانکاری استفاده شود.

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

۱. مقدمه

ساختارهای تشدید با طرح های مختلف دوره ای از جنس فلزی یا دی الکتریک است و عملکرد آنها بر پدیده های پلاسمونیک 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 تشدید قوی ایجاد می کنند که منجر به جذب بالای نور می شود [۹]. با این حال، این فلزات دارای اتلاف اهمی زیاد در فرکانس های 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 دی الکتریک های با ثابت دی الکتریک بزرگ شده اند [۱۱]. همچنین می توان از مواد قابل تنظیم و قابل انعطاف مانند دی اکسید

فراسطح ها ساختارهای مصنوعی از مرتبه طول موج الکترومغناطیسی هستند و به دلیل خواص 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 خواص اپتیکی محیط، اندازه و شکل تشدیدگرهای آن در کاربردهایی مانند تصویربرداری های دقیق، سنسورهای زیستی، جاذب های کامل نوری و حتی فناوری های پنهانکاری استفاده شوند [۲، ۳، ۴، ۵، 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 ی زیرین این سطوح جاذب معمولاً یک لایه فلزی و لایه ی میانی دی الکتریک و لایه ی بالایی متشکل از

وانادیوم (VO_2)، نیمرساناهای دو بعدی مانند دی سولفید مولیبیدیم (MoS_2)، دی سولفید 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.

مکانیسم‌های مختلفی باعث جذب موج الکترومغناطیسی در فراسطح‌ها می‌شود که می‌توان به جذب ذاتی مواد مورد استفاده، تشدید پلاسمونی سطحی، تشدید می ($Mie Resonance$) و جذب کامل حاصل از انطباق امپدانس محیط و فراسطح اشاره کرد [۱۵-۱۷]. به علاوه، در ساختار فراسطح، جذب نور در نتیجه همفازی بین میدان الکترومغناطیسی تابشی و میدان القایی در ساختار است. وقتی فرکانس تابش خارجی با فرکانس طبیعی ساختار (فرکانس رزونانسی) تطبیق داده می‌شود، 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 فرکانسی جذب و پهنای طیف جذب را تنظیم کرد. یکی از ساختارهای اولیه و پرکاربرد در این زمینه استفاده از حلقه‌های رزونانسی است [۱۹]. در ساختارهای حلقه‌ای یا شکاف‌دار، پراکندگی قوی امواج و همچنین تشدیدهای الکتریکی و مغناطیسی نقش مهمی در ایجاد جذب بالا دارند. به‌طور خاص، تشدیدهای مغناطیسی در آرایه‌های دوره‌ای می‌توانند منجر به تشکیل جریان‌های حلقوی شوند که مشابه با مدارهای LC (خازن- القاگر) عمل می‌کنند [۲۰]. در حالت کلی تر جذب کامل در فراسطح را می‌توان با استفاده از مدل‌های مداری RLC (مقاومت، القاگر، خازن) توصیف کرد. در این مدل، مقاومت نشان‌دهنده اتلاف حاصل از جذب، خازن نماینده ذخیره انرژی الکتریکی و القاگر نشان‌دهنده ذخیره انرژی مغناطیسی است. این مدل را می‌توان برای تحلیل رفتار رزونانسی 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 فرکانسی 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 توان جذب (Absorbance) نزدیک به صد درصد در بازه ی فرکانسی به پهنای تقریبی یک تراهرتز دست یافت. این سامانه به دلیل قابلیت تنظیم‌پذیری و سادگی در ساخت، می‌تواند در کاربردهایی مانند سنسورهای تراهرتز، جاذب‌های قابل تنظیم و سیستم‌های پنهانکاری مورد استفاده قرار گیرد.

۲. پیاده سازی مدل محاسباتی

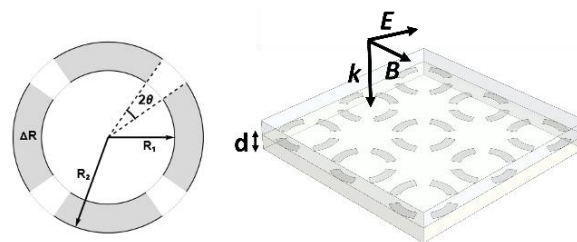
ساختار مورد مطالعه، شامل حلقه‌های گرافنی با شعاع R_1 و $R_2 = R_1 + \Delta R$ است که دارای چهار شکاف با گشودگی 2θ حول زوایای ۴۵، ۱۳۵، ۲۲۵ و ۳۱۵ درجه است. این حلقه‌ها به صورت آرایه دوبعدی روی سطح دی الکتریک با اتلاف کم از جنس پلیمر TOPAS [۲۱] با ضریب شکست $n = 1.53$ و ضخامت d قرار گرفته‌اند. موج فرودی از هوا با قطبش خطی در جهت محور x به طور عمود بر آرایه مورد نظر فرود می‌آید. هندسه آرایه مورد نظر و چینش گرافن در هر سلول در شکل ۱ آمده است.

هندسه دو بعدی مورد نظر دارای تقارن چرخشی ۹۰ درجه پادساعتگرد (C_4) است، بنابراین می‌توان با اعمال شرط مرزی دوره‌ای مناسب فقط قسمتی از فراسطح را که در ناحیه اول مختصات قرار گرفته بررسی نمود و پاسخ بدست آمده را به سه ناحیه دیگر تعمیم داد.

$P = 1\text{ W}$ و محاسبه عناصر ماتریس پراکندگی، توان جذبی سطح جاذب (Absorbance) به ازای پارامترهای مختلف بدست می‌آید. ضریب جذب از رابطه $A = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{12}|^2$ بدست می‌آید. در این رابطه S_{11} ضریب بازتاب و S_{12} 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 فرکانسی در ناحیه تراهرتز پیشنهاد شود. شکل ۲ چند نمودار جذب به ازای ΔR مختلف $\theta = 8^\circ$ ، $E_f = 0.8\text{ eV}$ ، $d = 17.6\text{ }\mu\text{m}$ را نشان می‌دهد. همان طور 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 $16\text{ }\mu\text{m}$ جذب این ساختار در بازه ۲ تا ۳ تراهرتز بیش از ۹۹٪ است. با افزایش ضخامت به مقدار $24\text{ }\mu\text{m}$ پهنای باند افزایش می‌یابد و در بازه فرکانسی حدود ۱.۵-۴ تراهرتز جذب بالای حدود ۸۰٪ مشاهده می‌شود. انرژی فرمی گرافن پارامتر قابل تنظیم دیگری است که بر پهنای باند جذب تأثیر می‌گذارد و می‌توان آن را توسط ناخالصی یا ولتاژ گیت 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 در حالیکه در نقطه‌ی دیراک یعنی $E_f = 0.0\text{ eV}$ بسیار کم و در بیشینه‌ی خود کمتر از ۲۰٪ است. به عنوان مثال، برای انرژی فرمی $E_f = 0.8\text{ eV}$ و ضخامت $16\text{ }\mu\text{m}$ در بازه فرکانسی ۲-۳ تراهرتز جذبی بیش از ۹۹٪ مشاهده می‌شود.

افزایش انرژی فرمی گرافن رسانایی سطحی گرافن را بطور چشمگیری تغییر می‌دهد که منجر به از بین رفتن انطباق امپدانس جاذب و فضای آزاد می‌شود که نهایتاً طیف جذب متفاوتی بوجود می‌آید. وقتی انرژی سطح فرمی گرافن از 0 eV به 0.8 eV افزایش می‌یابد پهنای باند جذب به تدریج افزایش می‌یابد.



شکل ۱: (راست) فراسطح دوره ای شامل حلقه های گرافن شکاف دار بر روی لایه دی الکتریک به ضخامت d (چپ) پارامترهای هندسی هر سلول گرافن.

این رهیافت سبب صرفه جویی چهار برابری در زمان و حافظه خواهد شد. سطح پائینی لایه دی الکتریک نیز و سطوح جانبی سلول واحد به عنوان شرط مرزی PEC (Perfect Electric Conductor) در نظر گرفته شده است. در عمل، لایه زیرین سطح دی الکتریک می‌تواند لایه نازکی از طلا با ضخامت مناسب از مرتبه‌ی عمق نفوذ موج الکترومغناطیس باشد تا امکان جذب کامل در ناحیه تراهرتز فراهم شود. در ضمن روی سطوح جانبی شرط مرزی دوره‌ای PMC (Perfect Magnetic Conductor) 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 درون نواری (σ_{inter}) و رسانش میان نواری (σ_{intra}) به صورت زیر نوشته می‌شود [۲۲]:

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

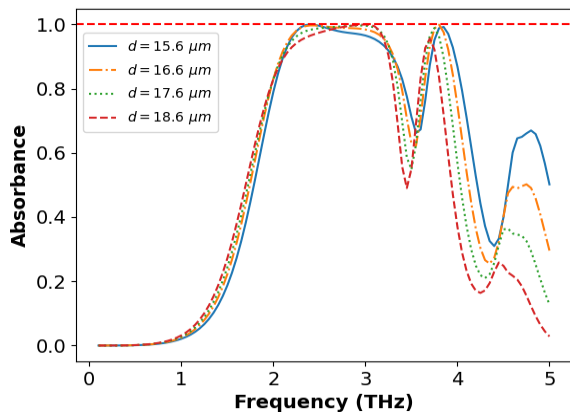
$$\sigma_{intra} = \frac{2k_B T e^2}{\pi \hbar^2} \ln \left(2 \cosh \frac{E_f}{2k_B T} \right) \left(\frac{i}{\omega + i\tau^{-1}} \right) \quad (2)$$

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

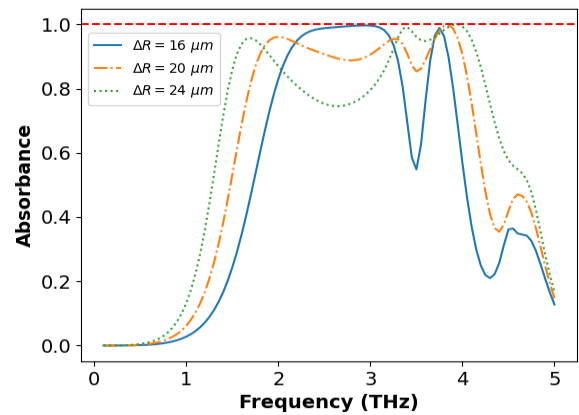
که $H(\omega) = \sinh \left(\frac{\hbar \omega}{k_B T} \right) / \left[\cosh \left(\frac{\hbar \omega}{k_B T} \right) + \cosh \left(\frac{E_f}{k_B T} \right) \right]$ و T دمای محیط برابر با 300 K است. $\tau = 10^{-13}\text{ s}$ واهلش و E_f انرژی فرمی گرافن است که می‌تواند مقادیر متفاوتی داشته باشد. در ناحیه فرکانسی تراهرتز ($\hbar \omega \ll E_f$) که در این مقاله بررسی شده است جمله σ_{inter} در مقایسه با σ_{intra} قابل چشم‌پوشی است [۲۲].

۳. نتایج

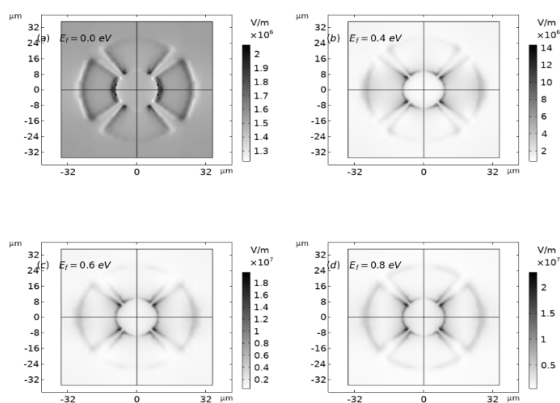
پس از تنظیمات اولیه مدل با اعمال موج تخت تابشی با توان



شکل ۴: نمودار توان جذب به ازای مقادیر مختلف ضخامت تیغه دی الکتریک d و $E_f = 0.8 \text{ eV}$ ، $\theta = 8^\circ$.



شکل ۵: نمودار توان جذب به ازای مقادیر مختلف ضخامت حلقه و $E_f = 0.8 \text{ eV}$ ، $\theta = 8^\circ$.



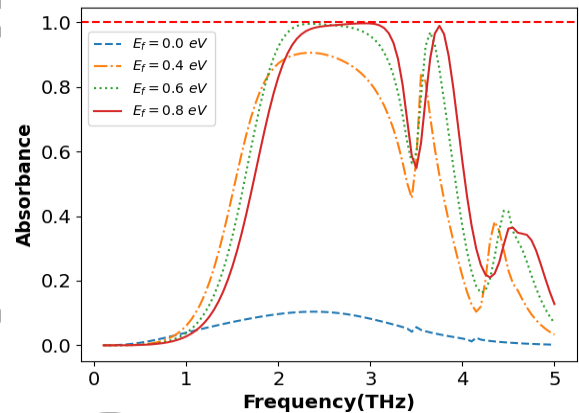
شکل ۶: شدت میدان الکتریکی در سطح فراسطح. با افزایش انرژی سطح فرمی شدت میدان در نواحی نزدیک لبه ها به شدت افزایش می یابد.

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

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

۴. نتیجه گیری

فراسطح طراحی شده با توجه به دارا بودن شکاف های خازنی متقارن نسبت به قطبش حساس نبوده و می تواند برای جذب



شکل ۷: نمودار توان جذب به ازای مقادیر مختلف ΔR و E_f و $\theta = 8^\circ$ ، $0.16 \mu\text{m}$.

به علاوه طیف جذب به آرامی به سمت طول موج های آبی جابجا 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 خواص پلاسمونیک بهتری را بروز می دهد که با محدوده فرکانسی ترهرتز برهمکنش می کند که پهنای باند را افزایش می دهد در حالیکه در نقطه ی دیراک گرافن همچون یک دی الکتریک رفتار می کند.

در این مقاله، اثر ضخامت دی الکتریک در میزان جذب بررسی شده است. شکل ۴ توان جذب ساختار را برای مقادیر مختلف d نشان می دهد. با توجه به شکل واضح است که این 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 می باشد که منجر به درک عمیق تر از فرآیند جذب می شود.

قطبش‌های مختلف به کار رود. با توجه به مرجع [۲۳] بیشترین جذب گرافن در ناحیه تراهرتز در نزدیکی فرود عمودی رخ می‌دهد به همین دلیل در این مقاله نیز موج فرودی به صورت عمود بر سطح در نظر گرفته شده است. البته می‌توان با تغییر اندکی در محاسبات فرود مایل میدان را نیز در نظر گرفت. گرافن در انرژی فرمی صفر مانند یک دی الکتریک رفتار می‌کند و جذب کمی در محدوده تراهرتز موج الکترومغناطیسی نشان می‌دهد در حالی که افزایش انرژی فرمی با افزایش تجمع حامل‌های بار منجر به افزایش خواص پلاسمونیک گرافن شده و موج الکترومغناطیسی تراهرتز را به خوبی جذب می‌کند که به نوبه‌ی خود باعث افزایش پهنای جذب و افزایش کیفیت جذب

۸. مراجع

می‌شود. محاسبات ما نشان می‌دهد که با افزایش انرژی فرمی طیف جذب به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر منتقل می‌شود. همچنین شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند 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 80% را به فرکانسهای بیش از ۳ تراهرتز افزایش می‌دهد. با توجه به سادگی در ساخت و قابلیت کنترل پهنای جذب با استفاده از ولتاژ خارجی در این ساختار و نتایج شبیه‌سازی این ساختار می‌تواند در کاربردهای متعددی مانند پنهانکاری، حسگرها و جاذب‌های کامل مورد استفاده قرار گیرد.

1. V. G. Veselago, Sov. Phys. Uspekhi. 10 (1968) 509.
2. David S. Wilbert, Mohammad P. Hokmabadi, Joshua Martinez, Partick Kung, and Seongsin, M. Kim, Proc.SPIE 8585, Terahertz and Ultrashort Electromagnetic Pulses for Biomedical Application, 8585Y (2013).
3. Mandal, P., Plasmonics 11, (2016) 223.
4. Shiwen Luo, Jun Zhao, Duluo Zuo, and Xinbing Wang, Optics Express, 24 (2016) 9288.
5. P Bogdan, E Jonckheere, and S Schirmer. Chaos, Solitons, & Fractals 103 (2017) 622.
6. Muhammad Shaheryar Khan, R. A. Shakoor, Osama Fayyaz, Elsadig Mahdi 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. Peng Yu, Lucas V. Besteiro, Yongjun Huang, Jiang Wu, Lan Fu, Hark H. Tan, Chennupati Jagadish, Gary P. Wiederrecht, Alexander O. Govorov, Zhiming Wang, Advanced Optical Materials, 7 (2019) 1800995.
9. Joydeep Bhattacharya, Nayan Chakrayarty, Sambit Pattnaik, W. Dennis Slafer, Rana Biswas, Vikram L. Dalal, Appl. Phys. Lett., 99 (2011) 131114.
10. Svetlana V. Boriskina, Thomas Alan Cooper, Lingping Zeng, George Ni, Jonathan K. Tong, Yoichiro Tsurimaki, Yi Huang, Laureen Meroueh, Gerald Mahan, and Gang Chen, Advances in Optics and Photonics, 9 (2017) 775.
11. Seyedeh Mahsa Kamali, Ehsan Arbabi, Amir Arbabi, and Andrei Faraon, Nanophotonics, 7 (2018) 1041.
12. Jierong Cheng, Fei Fan, and Shengjiang Chang, Nanomaterials, 9 (2019) 398.
13. Naseer Muhammad, Yang Chen, Cheng-Wei Qiu, and Guo Ping Wang, Nano Lett., 21 (2021) 967.
14. Huijuan Zhao, Weiqi Wang, Huanlin Ding, Sumei Wang, Zemin Tang, Shuhan Li, Jiazuan Wang, Yufan Wang, Qiuyan Zhou, Anran Wang, Yuanfang Yu, and Li Gao, Science China Information Sciences, 68 (2025) 179403.
15. W. L. Barnes, A. Dereux, and Thomas W. Ebbesen, Nature, 424 (2003) 824.
16. Zhi-Ling 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, Nature Materials, 9 (2010) 193.
18. Luigi La Spada, Sensors, 19 (2019) 355.
19. Xiaoyuan Hao, Yupeng Chen, Mai Liu, Xuetao Min, Xiaomeng Cheng, Qiu Wang, Quan Xu, *Xueqian Zhang, and Jiaguang Han, Advanced Optical Materials, 12 (2024) 2302975.

20. Long Li · Yan Shi · Tie Jun 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, Journal of Applied Physics 109, (2011) 043505.
22. Andrei Andryieuski, and Andrei V. Lavrinenko, Optics 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), pp. 93-96

