

طراحی نمونه بردارهای میدان نزدیک در باند تراهرتز و نوری

احمد محبی کلوانق^۱، محمد نشاط^۲

^۱دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی برق - مخابرات میدان، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران
^۲استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، mmeshtat@ut.ac.ir

چکیده

یکی از محدودیت های اساسی در حوزه تصویربرداری تراهرتز و نوری که از ماهیت موجی بودن نور نشأت می گیرد و با حد تفرق رلی شناخته می شود، وضوح فضایی محدود به نصف طول موج است. این وضوح برای مطالعه سلول های زیستی، حامل های سیار در نانو افزاره های نیمه هادی، و نیز پدیده های انتقال حرارت و تداخل الکترومغناطیسی در مدارهای نانوالکترونیک، البته ناکافی است. در چند دهه اخیر، تلاش های فراوانی در معرفی و توسعه تکنیک هایی برای غلبه بر این محدودیت پایه ای انجام شده است؛ از آن جمله می توان به روش های مبتنی بر استفاده از میدان نزدیک، که ایده آشکار سازی امواج میرا شونده را در میان دارد، اشاره نمود. در اکثر روش های پیشنهادی از یک ساختار نمونه بردار برای تمرکز میدان در نزدیکی نمونه و تزویج میدان نزدیک (میرا شونده) به میدان تابشی یا هدایت شونده استفاده می شود. در این مقاله، در ابتدا حد تفرق و منشأ نظری آن، ضرورت تصویربرداری میدان نزدیک، امکان دستیابی به وضوح زیر طول موجی و عدم مغایرت آن را با اصل عدم قطعیت هایزنبرگ را بطور مختصر مرور می کنیم. در ادامه این پژوهش، با تشریح فرایند طراحی سه نوع ساختار بعنوان نمونه بردارهای میدان نزدیک، یعنی؛ موجبر تیغه عایقی غیر تابشی، سیم مسی مخروطی با شیارهای متناوب و نمونه بردار مخروطی ساده، قابلیت تصویربرداری آنها با قدرت تفکیک زیر طول موج را در باند تراهرتز و نوری مورد تحقیق قرار می دهیم.

کلیدواژه

اصل عدم قطعیت هایزنبرگ، حد تفرق رلی، میدان نزدیک، تصویربرداری، شبه مدهای پلاسمون.

مقدمه

تشخیص زودرس سرطان سینه [۶]، نانواسپکتروسکوپی [۷]، و مطالعه پدیده های تابش و انتقال حرارت در نانوترانزیستورها مورد استفاده قرار می گیرد [۸]. نحوه تعامل و اندرکنش نور و ماده به ویژگی های اساسی آن ماده مانند چگالی الکترونی در ترازهای مختلف انرژی، ساختار فیزیکی، و حالت های اسپین کوانتومی وابسته است. از طرفی در صورت استفاده از منبع تحریک یا آشکار سازی میدان دور، میزان وضوح، بوسیله اصل اساسی حد تفرق، که ناشی از ماهیت موجی بودن نور بوده و مقدار آن تقریباً برابر با نصف طول موج کاری است، محدود می شود [۹]. برای مثال برای فرکانسهای ۱.۵ THz و ۵۰۰ THz (متناظر با فرکانس های میانی تراهرتز و مرئی)، بیشینه وضوح در دسترس بترتیب به مقادیر ۱۰۰ μm و ۳۰۰ nm محدود می شود. این وضوح برای مطالعه نمونه هایی از جمله پروتئین ها، سلول های زیستی، میکرو و نانو ساختارها ناکافی خواهد بود.

نانوساختارها و ساختارهای مزوسکوپی^۱ بدلیل ناهمگنی و اثرات غیرخطی کاربردهای فراوانی در حوزه علم و فناوری یافته اند. برای مطالعه مواد در این مقیاس نیاز به استفاده از ابزارها و تکنیک هایی با میزان وضوح بالا است. تصویربرداری میدان نزدیک که از اندرکنش نور و ماده بهره می برد، این امکان را برای محققان فراهم نموده است. این تکنیک علاوه بر این، در بررسی مدهای مختلف میدان های الکترومغناطیسی ناشی از تفرق از ساختارهای زیر طول موجی [۱]، مطالعه رفتار دینامیکی حامل های باردار در نانوذرات [۲] و نانو افزاره های نیمه هادی مانند ناحیه گیت ترانزیستور اثر میدانی [۳]، مطالعه اثر تداخل الکترومغناطیسی در مدارها و افزاره های نانوالکترونیک که برای اجتناب از تحریک جریان نویز فرکانس بالا و تشعشعات ناخواسته ضروری است [۴]، مشخصه یابی طیفی بافت های بیولوژیک [۵]،

^۱ Mesoscopic

و توانایی آنها را در تبدیل میدان‌های میراشونده نزدیک سطح به امواج انتشاری مورد مطالعه قرار می‌دهیم.

میدان نزدیک

در این بخش، حد تفرق و منشأ نظری آن، امواج میرا شونده و امکان دستیابی به وضوح زیر طول موجی و عدم مغایرت آن با اصل عدم قطعیت هایزنبرگ را بطور مختصر مرور می‌کنیم.

حد تفرق رلی^۵

فرض کنیم که پروفایل سطحی نمونه دارای ساختار سینوسی با تناوب d باشد که توسط یک موج صفحه‌ای تابشی با پلاریزاسیون TE تحریک شده است. با توجه به رابطه توری پراش داریم:

$$\frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta_s = \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta_i + n \frac{2\pi}{d} \quad (1)$$

که n یک عدد صحیح و بیانگر مرتبه تفرق، λ طول موج، و θ_i و θ_s به ترتیب زوایای تابش و تفرق است. بازای $d < \lambda/2$ ، معادله بالا به شرط $n \neq 0$ بازای هیچ مقداری از θ_i و θ_s برقرار نمی‌شود؛ یعنی امواج رسیده به آشکارساز در فاصله چند میلی‌متری (معادل با چند هزار طول موج کاری در باند نوری) حامل هیچ اطلاعاتی از تغییرات هندسی سطح نمونه نخواهند بود. این پدیده علت تامه‌ای بر عدم امکان اندازه‌گیری و مطالعه ویژگی‌های مواد نانومقیاس با روش‌های تصویربرداری کلاسیک است.

امواج میراشونده

میدان الکتریکی در صفحه $z = z_0$ ، بالاترین نقطه سطح نمونه، می‌تواند از طریق بسط امواج صفحه‌ای (با تابعیت زمانی $\exp(-i\omega t)$) بصورت زیر بیان شود:

$$\vec{E}(\vec{r}, z_0) = \int \vec{e}(k_t) \exp(i\vec{k}_t \cdot \vec{r} + i\gamma z_0) dk_t \quad (2)$$

$\vec{r} = (x, y)$ نقطه مشاهده در صفحه عرضی، \vec{k}_t بردار عرضی ثابت فاز، $k_0 = \omega/c$ عدد موج و $\gamma = \sqrt{k_0^2 - k_t^2}$ عدد موج طولی است. در رابطه (۲)، میدان بر حسب مجموعی از امواج تخت با دامنه مختلط $\vec{e}(k_t)$ و بردار ثابت فاز $\vec{k} = (\vec{k}_t, \gamma \hat{z})$ بیان شده است. بر پایه تحلیل فوریه، $\vec{e}(k_t) \exp(i\gamma z_0)$ در واقع تبدیل فوریه میدان در صفحه $z = z_0$ است. برای فرکانس‌های فضایی پایین، $|\vec{k}_t| < k_0$ ، نماینده تغییرات آرام میدان، γ حقیقی و عبارت نمایی تنها یک عامل فاز بوده، و امواج صفحه‌ای

ایده اولیه تصویرنگاری میدان نزدیک، استفاده از یک روزنه زیر طول موجی بود که در مجاورت بسیار نزدیکی از سطح نمونه قرار می‌گرفت [۱۰]. در این طرح، میدان پراکندگی یا تفرق یافته ناشی از اندرکنش روزنه با میدان نزدیک نمونه، از طریق آشکارسازهای میدان دور دریافت می‌شود. بدلیل نیاز به کنترل دقیق مکانیکی نمونه و نمونه‌بردار، روش‌های تصویرنگاری میدان نزدیک به سرعت با روشهای نمونه‌برداری پیمایشی مانند AFM^۲، ترکیب و به روش‌های SNOM^۳ [۱۱] شناخته شدند. میزان وضوح در SNOM متناسب با شعاع روزنه است؛ از طرفی کاهش شعاع، کاهش میزان توان تزویجی به روزنه و افزایش فرکانس قطع را به همراه دارد که به نوبه خود باعث تغییر محتوای طیفی و افت دامنه سیگنال می‌شود. این فرایند در نهایت به یک مصالحه بین وضوح و دامنه سیگنال آشکارسازی ختم می‌شود. برای افزایش تزویج توان از آرایه حفره‌های زیر طول موجی و ساختارهای bull's eye [۱۲]، و برای رفع مشخصه بالاگذر بودن نمونه‌بردار نیز از موجبرهای دوصفحه موازی استفاده شد [۱۳].

اما رهیافت کلی تری که برای بهبود وضوح و رفع محدودیت‌های SNOM ارائه شد، ASNM^۴ نام دارد. در این روش، بجای اندازه‌گیری میدان روزنه، از میدان پراکندگی ناحیه دور یک نمونه‌بردار نوسانی برای نگاشت میدان نزدیک استفاده می‌شود؛ نمونه مورد بررسی و نمونه‌بردار در معرض میدان دور قرار می‌گیرند، بطوریکه انتهای نمونه‌بردار بطور ثابت در کانون تابش باشد. آنگاه نمونه در راستای افقی اسکن می‌شود [۱۴-۱۵]. میدان پراکندگی شامل میدان پراکندگی محلی و میدان پس‌زمینه ناشی از بدنه نمونه‌بردار و سطح نمونه است که توسعه راهکارهایی را برای حذف سیگنال‌های ناخواسته پس‌زمینه و نویز لازم می‌دارد. میدان پراکندگی محلی از میدان پس‌زمینه با تقویت در مرحله تداخل‌سنجی و استخراج هارمونیک‌های مرتبه دوم و بالاتر فرکانس نوسان نمونه‌بردار متمایز می‌شود. تداخل‌سنجی علاوه بر تقویت میدان محلی، امکان حصول اندازه و فاز را بدست می‌دهد. در این تکنیک، اندازه وضوح، بطور عمده با ابعاد انتهایی نمونه‌بردار ارتباط می‌یابد. بنابراین یکی از مزیت‌های عمده ASNM نسبت به SNOM امکان دستیابی به وضوح بالاتر از طریق طراحی و ساخت نمونه‌بردارهایی با شعاع به مراتب کوچکتر از طول موج کاری است.

در این مقاله، با بسط تئوری تصویربرداری میدان نزدیک، به بررسی پارامترهای موثر در بهبود وضوح، افزایش تضاد، کاهش مشارکت سیگنال‌های ناخواسته و افزایش نسبت سیگنال به پس‌زمینه در آشکارسازی راه دور می‌پردازیم. فرایند طراحی دو نمونه‌بردار در باند تراهرتز و یک نمونه‌بردار در فرکانس نوری ارائه

^۴ Apertureless scanning near-field optical microscope
^۵ Rayleigh diffraction limit (bound)

^۲ Atomic force microscope
^۳ Scanning near-field optical microscope

قطعیت است؟ پاسخ، منفی است؛ زیرا امکان افزایش دلخواه وضوح تنها به امکان دریافت امواج میراشونده با عدد موج بزرگ، که محدود به حضور در مجاورت سطح نمونه هستند، بستگی دارد. بنابراین، توسعه روش‌ها و سیستم‌هایی که منجر به آشکارسازی میدان نزدیک می‌شوند، ایده دستیابی به وضوح زیر طول موجی را از تقابل با اصل فیزیکی عدم قطعیت خارج می‌کند. لازم به ذکر است که امواج میراشونده برخلاف امواج منتشرشونده، کاملاً عرضی نیستند؛ بنابراین مولفه‌های طولی میدان در اندرکنش نور و ماده دخالت دارند [۱۶].

طراحی نمونه بردارهای میدان نزدیک

موجبر تیغه عایقی غیرتابشی^۸

ایده اصلی این موجبر، برای تصویربرداری از یک شیء با ابعاد زیر طول موجی، انتقال اطلاعات میدان نزدیک به ناحیه دور از طریق تزویج مدهای میراشونده به مدهای انتشاری است. ساختار آن شامل یک تیغه عایقی مستطیلی با ابعاد سطح مقطع بسیار کمتر از طول موج کاری است که در بین صفحات موازی فلزی با فاصله جدایی کمتر از نصف طول موج کاری فضای آزاد قرار می‌گیرد (شکل ۱-الف).

در این حالت موج تنها می‌تواند در داخل ناحیه عایقی انتشار یابد و در بیرون از آن رفتار غیرتابشی دارد. غیر از مد غالب TEM، با میدان الکتریکی عمود بر صفحات فلزی، این موجبر می‌تواند مدهای غیرتابشی را نیز هدایت کند. دو مد اول غیرتابشی، LSE^۱ و LSM^۲ است. با توجه به اینکه خطوط میدان الکتریکی LSE، عمود بر صفحات فلزی است، دارای تلفات بالا بوده و غیردلخواه است؛ اما در مورد LSM، میدان الکتریکی عمود بر مرز عایق- فضای آزاد (موازی با صفحات فلزی) است، و میدان مغناطیسی، خطوط بسته موازی با مرز تشکیل می‌دهد. از این رو، همانند مد TE₀₁ موجبر استوانه‌ای، مد LSM₀₁ دارای تلفات هدایتی و عایقی پایین است [۱۹].

نمودارهای پاشندگی

برای بررسی مشخصه انتشاری و بدست آوردن نمودار پاشندگی NRD از شبیه‌ساز HFSS استفاده شده است. جنس عایق، سیلیکون با $\epsilon_r = 11.9$ است. برای رفتار غیر تابشی نیز باید شرط $a < \lambda_{u0} / 2$ برآورده شود که در آن λ_{u0} ، طول موج متناظر با فرکانس بیشینه طیف مورد بررسی است.

متناظر در جهتی که توسط بردار \vec{k} تعیین می‌شود، انتشار پیدا می‌کنند. برای فرکانس‌های فضایی بالا، $|\vec{k}_t| > k_0$ ، γ موهومی محض می‌شود، و عبارت نمایی، $\exp(-\text{Im}(\gamma)z_0)$ نقش تضعیف کننده میدان را بازی می‌کند. امواج صفحه‌ای در این حالت از نوع میراشونده بوده، دامنه آنها بویژه در ناحیه دور به شدت افت می‌کند، و به این دلیل توسط سیستم‌های میکروسکوپی کلاسیک، قابل آشکارسازی نخواهند بود. بازی فرکانس‌های فضایی خیلی بزرگ با شرط $k_0 \gg |\vec{k}_t|$ ، $\text{Im}(\gamma) \approx |\vec{k}_t|$ و عامل تضعیف بصورت $\exp(-|\vec{k}_t|z_0)$ ظاهر می‌شود. بنابراین بازی یک فرکانس فضایی معین k ، $1/k$ طول تضعیف موج میراشونده را بدست می‌دهد [۱۶]. بعنوان یک حساب سرانگشتی، برای آشکارسازی یک شیء با وضوح d ، فاصله نمونه‌بردار و نمونه نباید از $d/2\pi$ بیشتر باشد. ناحیه کار نمونه‌بردارهای میدان نزدیک در این محدوده است.

اصل عدم قطعیت هایزبرگ

با استفاده از اصل عدم قطعیت هایزبرگ در صفحه دوبعدی xy داریم [۱۶]:

$$\Delta x \Delta k_x \geq 2\pi, \Delta y \Delta k_y \geq 2\pi \quad (3)$$

که در آن $(\Delta x, \Delta y)$ و $(\Delta k_x, \Delta k_y)$ بترتیب نماد عدم قطعیت مکانی و تکانه موج در راستاهای x و y هستند. تعبیر فیزیکی این روابط بدین شرح است: برای بهبود میزان وضوح (که با کمینه نمودن Δx و Δy حاصل می‌شود)، ناگزیر از افزایش عدم قطعیت در جهت بردار موج انتشاری هستیم که به نوبه خود افزایش گستره صفحه آشکارسازی را نتیجه می‌دهد.

در میکروسکوپی کلاسیک، تنها امواج با مقادیر حقیقی γ قابل دریافت هستند. در این حالت، بیشینه فرکانس فضایی $n \sin(\theta_{\max}) = NA$ است که $|\vec{k}_t| = k_0 n \sin(\theta_{\max})$ روزنه عددی^۷ آشکارساز نامیده می‌شود. برای یک سیستم آشکارساز، تنها پرتوهایی که در مخروط θ_{\max} قرار دارند، قابل دریافت و پردازش هستند. مقدار بیشینه برای $NA = n$ ، NA است. با استفاده از رابطه (۳) حد وضوح برای تمایز دو منبع نقطه‌ای بصورت زیر حاصل می‌شود:

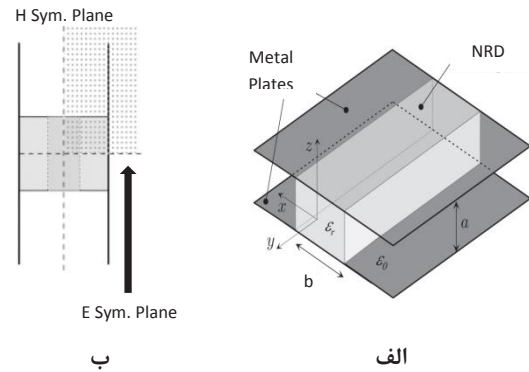
$$\Delta x \geq \frac{\lambda}{2NA}, \Delta y \geq \frac{\lambda}{2NA} \quad (4)$$

در رابطه (۴) حد تفرق بعنوان یک نتیجه از اصل عدم قطعیت هایزبرگ بدست آمده است. اما این پرسش مطرح می‌شود که آیا ایده وضوح تصویر زیر طول موجی در مغایرت با اصل عدم

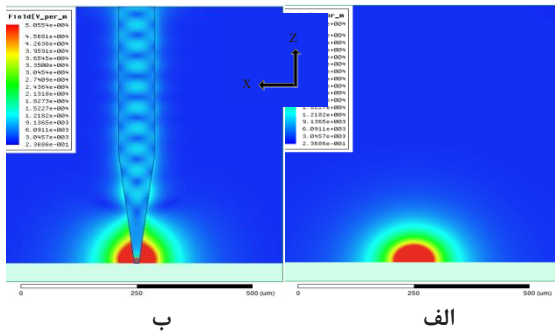
^۸ Non-radiative-dielectric slab waveguide

^۷ Decay length
^۸ Numerical aperture

a و b از نظر تجربی بهتر است از روابط $a/\lambda_0 \approx 0.45$ و $b/\lambda_0 \sqrt{\epsilon_r - 1} \approx 0.4 - 0.6$ استفاده کنیم. در اینجا، فرکانس شبیه‌سازی $f = 1$ THz، و ابعاد مورد استفاده عبارتند از: $a = 120 \mu\text{m}$, $b_1 = 10 \mu\text{m}$, $b_2 = 30 \mu\text{m}$, $b_3 = 60 \mu\text{m}$, $b_4 = 80 \mu\text{m}$. l_1 و l_2 ، به ترتیب طول بخش باریک شده و طول با سطح مقطع ثابت است. شکل ۳، توزیع میدان الکتریکی را در صفحه طولی ساختار برای دو حالت بدون تیغه و با تیغه عایقی نشان می‌دهد.

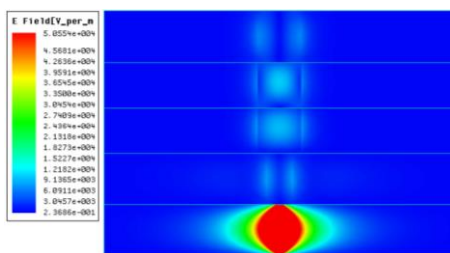


شکل ۱- الف- موجبر عایقی غیرتابشی [۱۷]؛ ب- صفحه‌های تقارن میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی [۱۸].

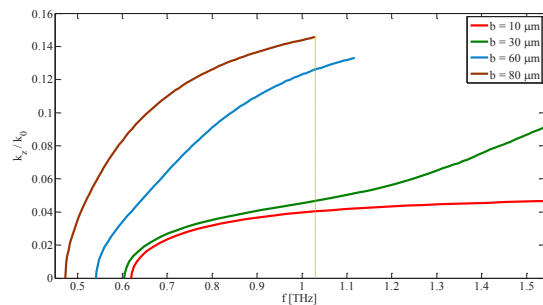


شکل ۳- توزیع میدان الکتریکی در صفحه طولی ساختار موجبری برای دو حالت الف- بدون تیغه و ب- با تیغه عایقی.

همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، میدان میراشونده در نوک نمونه‌بردار، بصورت نمایی تا بخش‌هایی از تیغه باریک شده رو به کاهش می‌نهد، و آنگاه تبدیل به مود انتشاری LSM می‌شود. این مشاهده، قابلیت NRD را برای انتقال اطلاعات میدان نزدیک و استفاده از آن بعنوان نمونه‌بردار میدان نزدیک تایید می‌کند. با افزایش عرض سطح مقطع تیغه، میدان الکتریکی با تضعیف بیشتر در ناحیه فضای آزاد، تمرکز بیشتری در بخش عایقی را تجربه می‌کند (شکل ۴)، و این در سازگاری کامل با تئوری موجبرهای تیغه‌ای و نمودار پاشندگی است. (TP_i) به صفحه تست میدان i ام در امتداد موجبر اشاره دارد). تاثیر اندازه ضریب دی‌الکتریک تیغه نیز در توانایی و قابلیت هدایت میدان نزدیک بازای دو مقدار، در شکل ۵ ارائه شده است. تیغه با ضریب عایقی بالاتر، هدایت موجبری بیشتری به همراه دارد.



شکل ۴- توزیع میدان الکتریکی در صفحات عرضی موجبر.



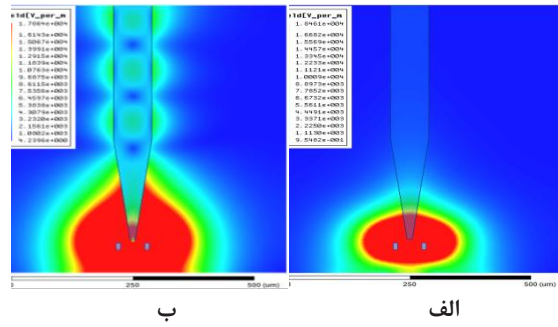
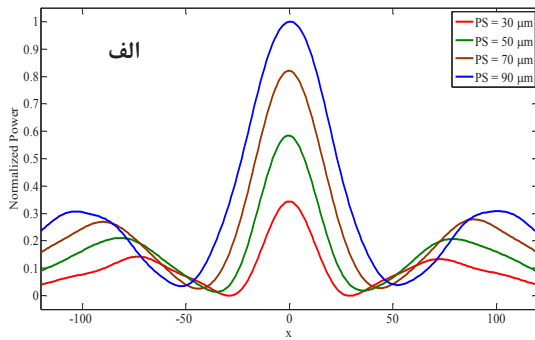
شکل ۲- نمودار پاشندگی موجبر عایقی غیرتابشی بازای ضخامت‌های، b ، مختلف موجبر.

بدلیل هندسه موجبر، و برای کاهش زمان شبیه‌سازی، صفحات تقارن مطابق با شکل ۱-ب، و شرایط مرزی حاکم، در صفحه تقارن الکتریکی بصورت $E_t = 0$ و $H_n = 0$ ، و در صفحه تقارن مغناطیسی $E_n = 0$ و $H_t = 0$ اعمال می‌شود. شکل ۲، نتایج شبیه‌سازی را بازای مقادیر مختلف ضخامت موجبر نشان می‌دهد. با توجه به گراف‌های مربوط به $b = 10, 30, 60, 80 \mu\text{m}$ ، فرکانس کاری بهینه (متناظر با مقدار بیشینه تحدید) تقریباً برابر است با $f = 1$ THz.

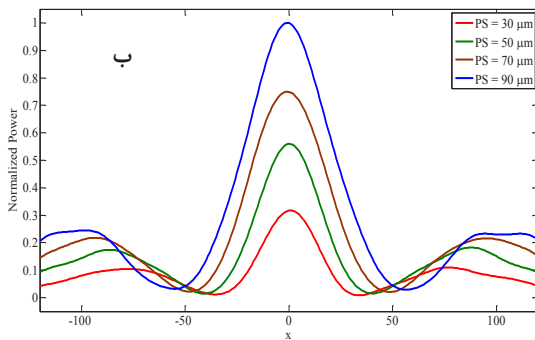
موجبر NRD باریک شده^۹

تامل در نمودار پاشندگی، این ایده را مطرح می‌سازد که استفاده از باریک کردن سطح مقطع موجبر می‌تواند به تغییر تمرکز انرژی میدان موج در بخش عایقی منجر شود. شکل ۳-ب، مدل موجبر NRD باریک شده را با ارتفاع a و عرض b ، $b: b_1 \rightarrow b_2$ ، نشان می‌دهد. منبع نقطه‌ای (درگاه تحریک)، یک میدان الکتریکی محلی در جهت x (LSM)، با پروفایل نیم‌سینوسی در جهت z را تزریق می‌کند. برای حذف میدان‌های نشتی ناخواسته از جانب‌های آزاد ساختار، فاصله جدایی صفحات نیز می‌بایست کمتر از نصف طول موج کاری فضای آزاد باشد. در انتخاب مقادیر

^۹ Tapered



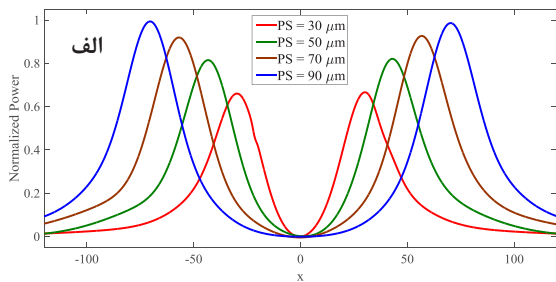
شکل ۵- توزیع میدان الکتریکی برای تیغه عایقی با الف - $\epsilon_r = 2$ و ب - $\epsilon_r = 5$.



شکل ۶- توان نرمالیزه شده در صفحه تست TP_0 برای آرایش ساده نمونه بردار و بدون استفاده از روکش فلزی در انتهای نمونه بردار بازای الف - $dz = 10 \mu m$ ، و ب - $dz = 20 \mu m$ ؛ و مقادیر مختلف PS.

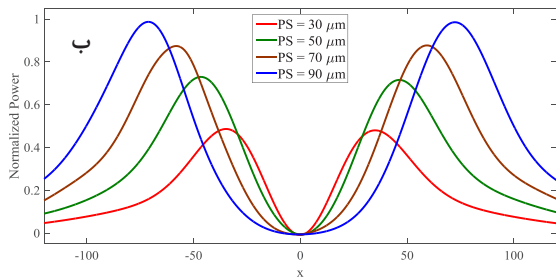
تصویربرداری از دو منبع نقطه‌ای

برای بررسی عملکرد تصویربرداری این نمونه بردار، دو منبع نقطه‌ای میدان نزدیک را در فاصله عمودی dz از نوک نمونه بردار و افقی PS از هم قرار می‌دهیم. آنگاه با انترگرال‌گیری از بردار Poynting در صفحه TP_0 ، نمودار شکل ۶ بدست می‌آید. در شکل ۶، امکان شناسایی و تفکیک منابع نقطه‌ای در آرایش حاضر از دست رفته است؛ علت این امر، تداخل میدان‌های نزدیک منابع تحریک بر روی هم است. برای رفع این مشکل، از دو روکش فلزی در نوک نمونه بردار استفاده می‌کنیم، تا تداخل الکترومغناطیسی مورد نظر را کاهش دهد؛ و توزیع میدان نزدیک را در ناحیه دور از نوک نمونه بردار، که باعث کاهش وضوح تصویر می‌شود، حذف نماید، که نمودار شکل ۷ حاصل می‌شود.



سیم مسی مخروطی با شیارهای متناوب

یکی از دستاوردهای مهم نمونه بردارهای پلاسمونیک توانایی آنها برای تمرکز انرژی موج الکترومغناطیسی در فرکانس‌های اپتیک است. این تمرکز زیر طول موجی درجه نوبی را به روی مجتمع‌سازی مدارهای فوتونیک و حسگرهای اپتیکی تک‌ملکولی گشوده است. بنظر می‌رسد که بتوان از این مدها برای متمرکز ساختن میدان در باند تراهرتز نیز استفاده نمود. در این بخش به ارائه مباحث نظری و روند طراحی یک نمونه بردار برای دستیابی به تمرکز زیر طول موجی در مجاورت یک سیم مسی با استفاده از مدهای شبه پلاسمونیک سطحی ($SSPP^0$) می‌پردازیم.

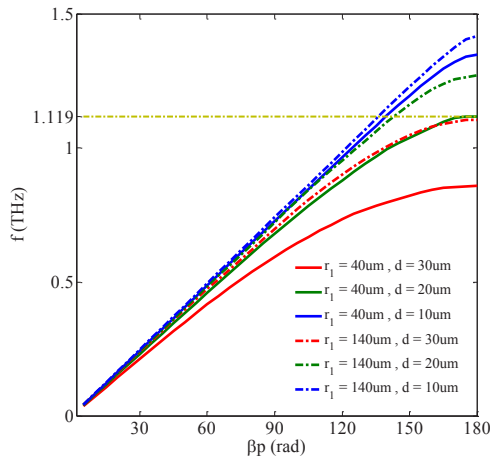


شکل ۷- توان نرمالیزه شده در صفحه تست TP_0 با استفاده از روکش فلزی در انتهای نمونه بردار بازای الف - $dz = 10 \mu m$ ، و ب - $dz = 20 \mu m$ ؛ و مقادیر مختلف PS.

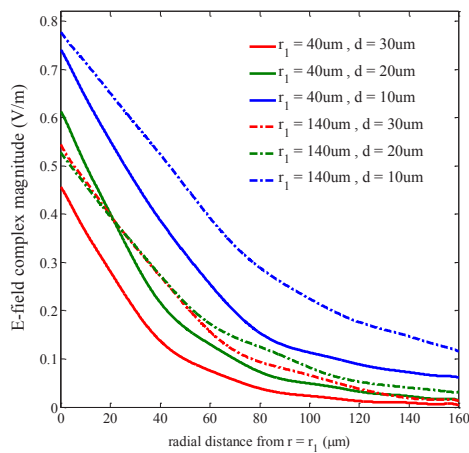
شیار a و عمق d است، نشان می‌دهد. بدلیل تقارن چرخشی، میدان‌ها مستقل از زاویه ϕ است و مدهای TE_z و TM_z از هم تفکیک می‌شوند. از آنجا که مدهای $SSPP$ از نوع TM_z هستند توجه خود را تنها به این مدها معطوف می‌داریم.

سیم شیاری

شکل ۸، سلول واحد سیم مسی شیاری را که شامل دنباله‌ای از استوانه‌های هم‌مرکز به شعاع‌های r_1 و r_2 ، دوره تناوب p طول



شکل ۹- نمودار پاشندگی SSPP بازای $p = 100 \mu\text{m}$ ، $r_1 = 40, 140 \mu\text{m}$ و $d = 10, 20, 30 \mu\text{m}$ ، $a = 50 \mu\text{m}$

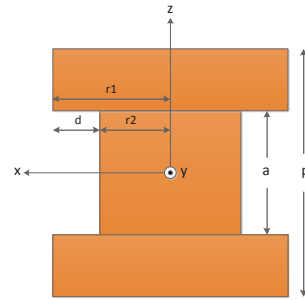


شکل ۱۰- مولفه شعاعی میدان الکتریکی SSPP بازای $p = 100 \mu\text{m}$ ، $a = 50 \mu\text{m}$ ، $d = 10, 20, 30 \mu\text{m}$ و $r_1 = 40, 140 \mu\text{m}$

این مشاهده، ایده استفاده از یک سیم مخروطی شیاری را برای تمرکز زیر طول موجی و نمونه بردار میدان نزدیک تراهرتز بیان می‌دارد.

نتایج شبیه‌سازی

نمونه بردار مورد استفاده، سیم مخروطی از جنس مس با طول $l = 2.05 \text{ mm}$ است. شعاع آن بصورت تدریجی از $r_1 = 140 \mu\text{m}$ (ابتدای نمونه بردار) به $r_2 = 20 \mu\text{m}$ (انتهای نمونه بردار) می‌رسد. بر روی بدنه نمونه بردار، شیارهای متناوب با دوره $p = 100 \mu\text{m}$ و عمق $d = 20 \mu\text{m}$ نگاشت یافته‌اند. برای تحریک سیستم نیز از مد TEM کابل هم‌محور استفاده شده است. توزیع میدان الکتریکی برای چهار فرکانس مختلف در شکل ۱۱ نشان داده شده است، که در آن افزایش فرکانس تا $f = 1.119 \text{ THz}$ ، باعث افزایش تحدید مکانی میدان الکتریکی



شکل ۸- سلول واحد سیم مسی شیاری.

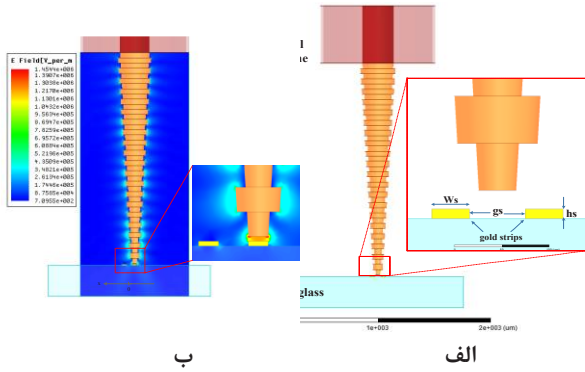
در فرکانس‌های تراهرتز، رابطه پاشندگی و تمرکز زیر طول موجی مدهای SSPP بر روی سطح فلزات، تابعی از رسانندگی محدود فلزات نبوده، و اساساً از ویژگی‌های هندسی سطح تاثیر می‌پذیرد. از این رو، مشخصه‌های انتشاری این مدها می‌تواند بواسطه هندسه تناوبی سطح کنترل شود. برای مثال در فرکانس‌های پایین ($\lambda > p$) و برای استوانه‌های با شعاع بسیار بزرگتر و عمق شیار بسیار کوچکتر از دوره تناوب ($r_1, r_2 > p$ و $d < p$) رابطه پاشندگی آنها از رابطه زیر بدست می‌آید [۲۰]:

$$\beta = k_0 \sqrt{1 + \left(\frac{a}{p}\right)^2 \tan^2(k_0 d)} \quad (5)$$

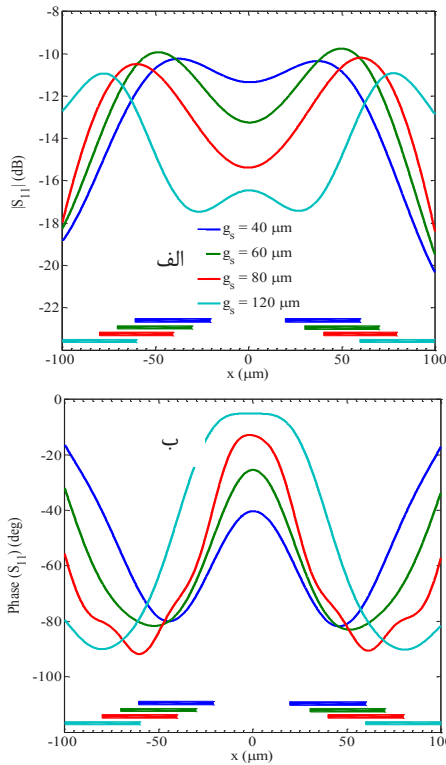
رابطه (۵) نحوه همبستگی تمرکز میدان را با پارامترهای کلیدی هندسی توصیف می‌کند. نمودار پاشندگی مدهای SSPP مربوط به این ساختار، بازای دوره تناوب $p = 100 \mu\text{m}$ ، طول شیار $a = 50 \mu\text{m}$ ، عمق‌های شیار $d = 10, 20, 30 \mu\text{m}$ و شعاع‌های $r_1 = 40, 140 \mu\text{m}$ در شکل ۹ رسم شده است. شکل ۱۰ نیز مولفه شعاعی میدان الکتریکی را نشان می‌دهد. این شکل به روشنی تمرکز میدان موج الکترومغناطیسی را در اطراف سیم شیاری به تصویر کشیده است. همچنان‌که بر عمق شیارها افزوده می‌شود یا شعاع سیم کوچکتر می‌گردد، میدان تمایل بیشتری به حضور در مجاورت سیم می‌یابد.

سیم مخروطی شیاری

با توجه به شکل ۹، کاهش شعاع سیم (r_1) باعث می‌شود که نمودار پاشندگی متناظر از خط نوری^۱ فاصله گیرد؛ به تعبیر دیگر، سرعت فاز و سرعت گروه SSPP، هر دو، کاهش یافته، و موج انتشاری در راستای سیم شیاری بیشتر در اطراف سیم متمرکز می‌شود (شکل ۱۰).



شکل ۱۲- الف- آرایش نمونه بردار و نمونه؛ ب- اندرکنش میدان نزدیک بین نمونه بردار و نمونه (نوار طلا).



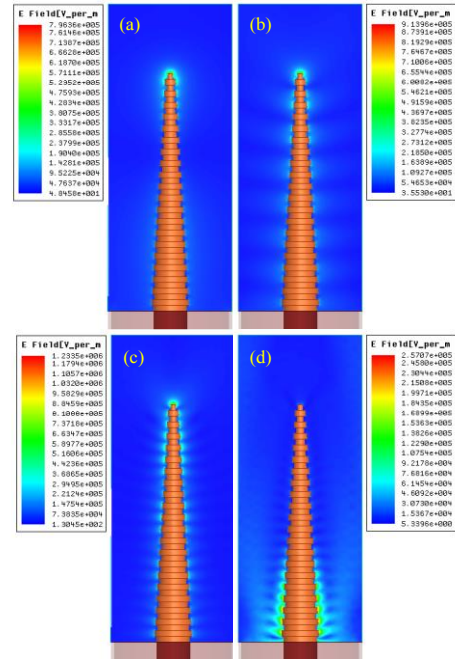
شکل ۱۳- الف- پارامتر S_{11} ؛ ب- فاز بازی پارامتر S_{11} ؛ الف- اندازه و ب- فاز بازی $f = 1.119 \text{ THz}$ در $g_s = 40, 60, 80, 120 \mu\text{m}$

نمونه بردار مخروطی ساده

نگاشت میدان نزدیک روزنه BOWTIE

در این بخش، قابلیت تکنیک ASANOM را برای دستیابی به دامنه و فاز میدان نزدیک مورد تحقیق قرار می‌دهیم. مدل مورد بررسی در شکل ۱۴ نشان داده شده است. نمونه بردار بصورت مخروطی شکل با زاویه بازشدگی ۲۵ درجه، و شعاع انتهایی ۱۰ nm است. روزنه bowtie بر روی فیلم طلا که خود بر روی زیرلایه SiO_2 قرار دارد، بعنوان نمونه در نظر گرفته می‌شود. پرتوی گاوسی با پلاریزاسیون در جهت z بردار موج در جهت x طول موج ۶۳۳ nm، و کمر اشعه $1 \mu\text{m}$ ، روزنه را از سمت

تا پنج برابر طول موج فضای آزاد می‌شود. بنابراین بازای پارامترهای هندسی انتخاب شده، فرکانس کاری بهینه، $f = 1.119 \text{ THz}$ بدست می‌آید. برای فرکانس‌های بالاتر، مطابق نمودار پاشندگی (شکل ۹)، مدهای شبه پلاسمون اجازه انتشار در طول نمونه بردار را ندارند و در صورت تحریک، از ابتدای آن پراکنده می‌شوند (شکل ۱۱-ت).

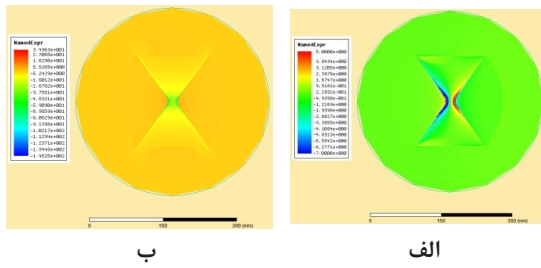


شکل ۱۱- توزیع میدان الکتریکی سیم مسی مخروطی شیاری بازای $p = 100 \mu\text{m}$ ، $r: 140 \rightarrow 20 \text{ nm}$ ، $l = 2.05 \text{ mm}$ (b)، $f = 0.1 \text{ THz}$ (a) در $d = 20 \mu\text{m}$ و $a = 50 \mu\text{m}$ $f = 1.3 \text{ THz}$ (d)، $f = 1.119 \text{ THz}$ (c)، $f = 0.5 \text{ THz}$

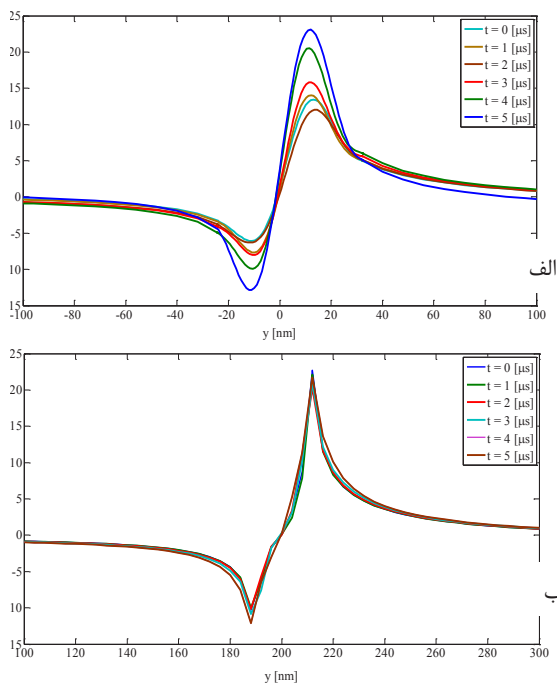
شکل ۱۲- الف، نمای شماتیک نمونه بردار میدان نزدیک را در مجاورت نمونه نشان می‌دهد. نمونه شامل دو نوار طلا به عرض $w_s = 40 \mu\text{m}$ ، ضخامت $h_s = 10 \mu\text{m}$ ، و فاصله جدایی $g_s = 40 \mu\text{m}$ بر روی زیرلایه شیشه ($\epsilon_r = 2.2$)، و در فاصله $10 \mu\text{m}$ از انتهای نمونه بردار قرار دارد. در این حالت، نمونه بردار بصورت یک بعدی نمونه را جارو می‌کند. شکل ۱۲- ب، اندرکنش نمونه و نمونه بردار و توزیع میدان الکتریکی را برای فرکانس بهینه $f = 1.119 \text{ THz}$ در اطراف ناحیه جارو نشان می‌دهد.

شکل ۱۳، دامنه و فاز میدان برگشتی را از طریق پارامتر S_{11} بازای مقادیر مختلف g_s به نمایش گذارده است که وضوح تقریبی $\lambda/7$ را تایید می‌کند. خطوط رنگی نماینده موقعیت مکانی نوارهای طلا است. انتظار می‌رود با تنظیم عمق شیاریها در مقدار بحرانی $\lambda/4$ ، وضوح قابل دستیابی بیشینه شود.

با عامل خارجی و در حکم یک مصالحه، در اغلب موارد، نمونه‌بردارهای عایقی نسبت به نوع فلزی ترجیح داده می‌شوند.



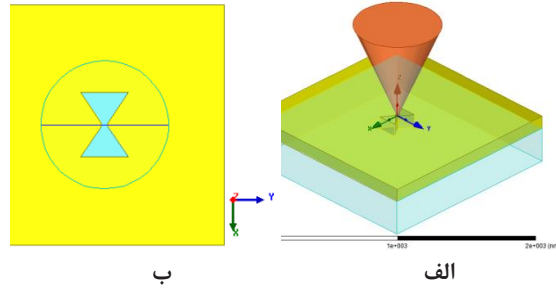
شکل ۱۵- الگوی میدان نزدیک الف- E_z و ب- E_y .



شکل ۱۶- بخش حقیقی E_z بازای فاصله‌های مختلف نمونه‌بردار الف- طلا و ب- سیلیکون از روزنه.

شکل ۱۷، اندازه میدان دور E_z روزنه را در مد فاصله-ثابت برای نمونه‌بردار عایقی بازای $\varphi = 0^\circ$ و $\theta = 15^\circ$ نشان می‌دهد. دو لکه در مجاورت گوشه‌های روزنه دیده می‌شود که در سازگاری با شکل ۱۵-الف است. با این حال، بدلیل آنکه در تصویر بدست آمده، سیگنال پس‌زمینه حضور جدی دارد، لکه‌های میدان دور نسبت به طرح میدان نزدیک، تغییرات آرام و گسترش فضایی بیشتری را تجربه نموده‌اند. برای افزایش وضوح و دقت تصویر، بایستی از مدولاسیون نمونه‌بردار و مولفه‌های هارمونیک مرتبه بالا بهره جست.

زیرلایه روشن می‌کند. تحت این شرایط، مولفه‌های TE و TM میدان دور، E_p و E_s بترتیب مربوط به میدان‌های محلی E_y و E_z هستند.



شکل ۱۴- الف- مدل شبیه‌سازی؛ روزنه bowtie، زیرلایه SiO_2 و نمونه‌بردار مخروطی. ب- نمای بالای مدل بدون حضور نمونه‌بردار.

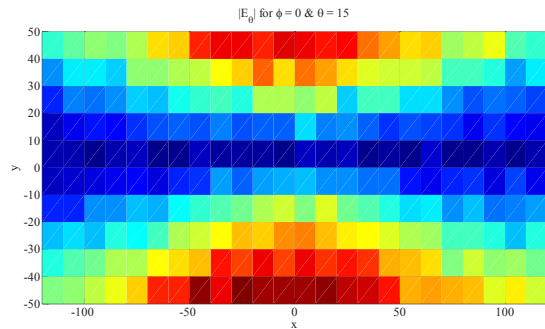
برای بسیاری از نانو‌ساختارهای پلاسمونیک مانند آنتن دوقطبی و روزنه bowtie، یکی از مولفه‌های میدان نزدیک قابل صرف‌نظر کردن است. شکل ۱۵، مشخصه میدان نزدیک تولید شده توسط روزنه bowtie با ابعاد 200 nm بر روی فیلم طلا با ضخامت 10 nm ، و فاصله شکاف 20 nm را نمایش می‌دهد. میدان الکتریکی با هدایت و انباشتن بارهای الکتریکی در لبه‌های روزنه، باعث بوجود آمدن یک ناحیه E_y با فاز ثابت در داخل روزنه، و دو ناحیه E_z با اختلاف فاز π در دو طرف آن می‌شود. شدت میدان E_x نیز، از نظر بزرگی، تقریباً ۱ مرتبه کوچکتر از دو مولفه دیگر است.

برای مطالعه اثر جنس نمونه‌بردار بر روی سیگنال پراکندگی، دو نمونه‌بردار سیلیکونی (Si) و طلا (Au) را در بوته آزمایش نهادیم. شکل ۱۶، میدان E_z (مولفه غالب در اندرکنش میدان نزدیک) را در راستای خط مشخصه (خط آبی در شکل ۱۴-ب) بر حسب فاصله از سطح روزنه و بر اساس رابطه $z(t) = z_{avg} + A \cos(\Omega t)$ نشان می‌دهد. روشن است که تغییرات مکانی نمونه‌بردار طلا، الگوی میدان نزدیک را دچار اغتشاش می‌کند. بنابراین، با وجود آنکه نمونه‌بردارهای فلزی عموماً دارای اندرکنش قوی‌تری هستند، اما از طرفی رفتار طیفی پلاسمونیک محلی را دستخوش تغییر می‌کنند. این مطلب بویژه زمانی اهمیت می‌یابد که الگوی تغییرات بصورت تابعی پیچیده از شکل هندسی و موقعیت دقیق مکانی نمونه‌بردار باشد. در تقابل با آن، نمونه‌بردارهای عایقی اندرکنش ضعیف‌تری دارند، ولی مدهای میدان نزدیک و پاسخ‌های طیفی، با ضریب کمتری از آن تاثیر می‌پذیرند. علاوه بر این، و در عمل، نمونه‌بردارهای فلزی بدلیل پوشش فلزی بر روی عایق، دارای شعاع انتهایی بزرگتری هستند که مساله کاهش وضوح قابل دسترس را به ذهن یادآور می‌شود. برای پرهیز از هرگونه ناهمسانی در الگوی میدان نزدیک

قابلیت موجبر عایقی باریک شده غیرتابشی را در انتقال اطلاعات میدان نزدیک از صفحه نمونه به صفحه نگاشت تصویر، از طریق تزویج مدهای میراشونده به مدهای انتشاری، نشان دادیم. همچنین نشان داده شد با استفاده از روکش فلزی در نوک نمونه بردار می توان تداخل الکترومغناطیسی را کاهش و تزویج میدان نزدیک در ناحیه دورتر از نوک نمونه بردار که باعث کاهش وضوح تصویر می شود را حذف نمود، بطوریکه امکان سنجی تصویربرداری از دو منبع نقطه ای با وضوح زیر طول موجی با شبیه سازی تمام موج به اثبات رسید.

توانایی سیم مسی مخروطی با شیارهای متناوب را در هدایت شبه مدهای پلاسمون سطحی در فرکانس های تراهرتز، با استفاده از نمودارهای پاشندگی تشریح، و کارایی این نمونه بردار را در تصویربرداری از نوارهای باریک طلا با بررسی پارامتر S_{11} در فرکانس بهینه تحدید میدان ارزیابی نمودیم. همچنین اثر باریک شدگی (tapering) در افزایش تمرکز زیر طول موجی میدان با شبیه سازی تمام موج نشان داده شد.

از تکنیک ASNOM برای ثبت توزیع میدان نزدیک روزنه bowtie از طریق مشاهده میدان راه دور استفاده نمودیم. بدلیل ایجاد اغتشاش کمتر در توزیع میدان نزدیک و با وجود اندرکنش های ضعیف تر با نمونه، نمونه بردارهای عایقی نسبت به نوع فلزی ترجیح داده شد. با استفاده از آن و با اسکن دوبعدی نمونه در مد فاصله-ثابت، الگوی مولفه عمودی میدان نزدیک را در ناحیه دور ثبت نمودیم.



شکل ۱۷- میدان دور $|E_\theta|$ در مد فاصله-ثابت برای نمونه بردار عایقی بازای $\varphi = 0^\circ$ و $\theta = 15^\circ$.

مقایسه نمونه بردارهای مورد مطالعه

در جدول ۱ مشخصات اصلی نمونه بردارهای مورد مطالعه با یکدیگر مقایسه شده اند.

جدول ۱- مقایسه نمونه بردارهای مورد مطالعه

مشخصه	نوع ۱	نوع ۲	نوع ۳
باند فرکانسی	تراهرتز	تراهرتز	نوری
نوع مد الکترومغناطیسی	موجبری	شبه پلاسمونیک	پلاسمونیک
قدرت تفکیک	$\sim \lambda/5$	$\sim \lambda/7$	$\sim \lambda/30$
سازوکار بهبود قدرت تفکیک	تزوئج میدان نزدیک به مد موجبری	تزوئج میدان نزدیک به مد شبه پلاسمونیک	تزوئج میدانهای نزدیک به تشعشعی از طریق دو قطبی (چند قطبی) ایجادای بین نمونه بردار و نمونه

نوع ۱: موجبر تیغه عایقی غیر تابشی، نوع ۲: سیم مسی مخروطی با شیارهای متناوب، نوع ۳: نمونه بردار مخروطی ساده

نتیجه گیری

در این مقاله سه نوع نمونه بردار میدان نزدیک، یعنی؛ موجبر تیغه عایقی غیر تابشی، سیم مسی مخروطی با شیارهای متناوب و نمونه بردار مخروطی ساده مورد مطالعه قرار گرفتند.

مراجع

- [1] Bitzer, Andreas, and Markus Walther. "Terahertz near-field imaging of metallic subwavelength holes and hole arrays." *Applied Physics Letters* 92.23 (2008): 231101.
- [2] Cocker, Tyler L., et al. "An ultrafast terahertz scanning tunnelling microscope." *Nature Photonics* 7.8 (2013): 620-625.
- [3] Huber, Andreas J., et al. "Terahertz near-field nanoscopy of mobile carriers in single semiconductor nanodevices." *Nano letters* 8.11 (2008): 3766-3770.
- [4] Dong, X., et al. "Analysis of chip-level EMI using near-field magnetic scanning." *Electromagnetic Compatibility, 2004. EMC 2004. 2004 International Symposium on*. Vol. 1. IEEE, 2004.
- [5] Bitzer, Andreas, Alex Ortner, and Markus Walther. "Terahertz near-field microscopy with subwavelength spatial resolution based on photoconductive antennas." *Applied optics* 49.19 (2010): E1-E6.
- [6] Chiu, Chui-Min, et al. "All-terahertz fiber-scanning near-field microscopy." *Optics letters* 34.7 (2009): 1084-1086.

- of scattering near-field scanning optical microscopy." *Optics express* 22.15 (2014): 18715-18723.
- [16] Greffet, Jean-Jacques, and Rémi Carminati. "Image formation in near-field optics." *Progress in surface science* 56.3 (1997): 133-237.
- [17] Bozzi, Maurizio, et al. "Analysis of NRD components via the order-reduced volume-integral-equation method combined with the tracking of the matrix eigenvalues." *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on* 54.1 (2006): 339-347.
- [18] Beuerle, Bernhard. "Non-Radiating Waveguide with High Permittivity Dielectric and Antennas Based On It." (2010).
- [19] Hor, Yew Li, Er P. Li, and Wolfgang JR Hofer. "Near-field to far-field subwavelength imaging using Non-radiative Dielectric Waveguide probe." *Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2012 37th International Conference on.* IEEE, 2012.
- [20] Fernandez-Dominguez, A. I., et al. "Spoof surface plasmon polariton modes propagating along periodically corrugated wires." *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of* 14.6 (2008): 1515-1521.
- [7] Chakkittakandy, Reshmi, Jos AWM Corver, and Paul Planken. "Terahertz spectroscopy to identify the polymorphs in freeze-dried mannitol." *Journal of pharmaceutical sciences* 99.2 (2010): 932-940.
- [8] Song, Bai, et al. "Enhancement of near-field radiative heat transfer using polar dielectric thin films." *Nature nanotechnology* 10.3 (2015): 253-258.
- [9] Abbe, Ernst. "Beiträge zur Theorie des Mikroskops und der mikroskopischen Wahrnehmung." *Archiv für mikroskopische Anatomie* 9.1 (1873): 413-418.
- [10] Novotny, Lukas. "The history of near-field optics." *Progress in optics* 50 (2007): 137.
- [11] Schmidt, S., et al. "Image formation properties and inverse imaging problem in aperture based scanning near field optical microscopy." *Optics express* 24.4 (2016): 4128-4142.
- [12] Ishihara, Kunihiko, et al. "Terahertz-wave near-field imaging with subwavelength resolution using surface-wave-assisted bow-tie aperture." *Applied physics letters* 89.20 (2006): 201120.
- [13] Awad, M. M., and R. A. Cheville. "Transmission terahertz waveguide-based imaging below the diffraction limit." *Applied Physics Letters* 86.22 (2005): 221107.
- [14] Wang, Le, and Xiaoji G. Xu. "Scattering-type scanning near-field optical microscopy with reconstruction of vertical interaction." *Nature communications* 6 (2015).
- [15] Zhou, Nan, Yan Li, and Xianfan Xu. "Resolving near-field from high order signals