طراحی نانوآنتن پلاسمونیکی مبتنی بر گرافن با تابش امواج زیرترahرتز

نادر امین نصر، کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات آذربایجان شرقی
stu.nadernasr@iaut.ac.ir
حسن رسولی سقای، دانشیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز
h_rasooli@iaut.ac.ir

Archive of SID

چکیده

مطابق موضوع پژوهشی فراهم شده، هدف از این مقاله، طراحی نانوآنتن پلاسمونیکی مبتنی بر گرافن است. نانوآنتن‌های پلاسمونیکی که توسط امواج الکترومغناطیسی نوری تحریک می‌شوند، می‌توانند به منظور تابش امواج تراهرتز، مورد استفاده قرار گیرند. طراحی این نانوآنتن‌ها به گونه‌ای است که با کنترل پتانسیل شیمیایی گرافن، هدایت سطحی گرافن و متقابلاً رزونانس پلاسمونیکی نانوآنتن، تغییر می‌کند. با وجود این که صفحات گرافن به طور مجزایی توسط یک لایه‌ی دی‌الکتریک از هم جدا شده‌اند، تغییر قابل توجهی از پارامترهای پراکندگی و الگوی تابش قابل مشاهده است، زیرا امپدانس سطحی گرافن به وسیله‌ی یک بایاس جریان مستقیم خارجی تغییر می‌کند. به عبارت دیگر فرکانس‌های رزونانس پلاسمونیکی می‌توانند، توسط اثر میدان الکترواستاتیکی موضعی تنظیم شوند. علاوه بر کنترل دینامیکی، با افزایش امپدانس ورودی به میزان 72 درصد و راندمان پایدار نانوآنتن‌های پلاسمونیکی مبتنی بر گرافن، عملکرد و تطبیق مستقیم در نانوسیستم‌های تراهرتز را، برای کاربردهای فراوان تجهیزات اپتوالکترونیکی، بهبود می‌بخشد.

کلیدواژه‌ها: نانوآنتن پلاسمونیکی، گرافن، تراهرتز، رزونانس پلاسمونیکی، هدایت سطحی گرافن

1- مقدمه

امروزه با پیشرفت فناوری نانو، ساخت افزاره‌هایی در مقیاس چند نانومتر امکان‌پذیر شده است. با توجه به سیر تحولی که در زمینه‌ی ساخت ادوات اپتوالکترونیکی برای کاربردهای متنوع به منظور اهداف مختلف، از جمله صنایع الکترونیک، صنایع مخابرات، صنایع اپتیک و نانوپزشکی به وجود آمده است، بدین جهت، کوچک سازی این ادوات با ابعادی زیر طول موج نور، مورد نیاز است. آنتن یک افزاره‌ای است که با شکل‌های هندسی و مشخصات فیزیکی گوناگون، به منظور دریافت یا انتشار انرژی الکترومغناطیسی به کار برده می‌شود. آنتن‌های فلزی سنتی به دلیل فعل و انفعالات بسیار کم آن‌ها در برابر امواج الکترومغناطیسی نوری، عملاً برای انتشار

www.SID.ir

طیف‌های بالاتر از امواج مایکروویو، کاربردی ندارند. همچنین به علّت مرتبط بودن اندازه آنتن‌ها با طول موج، کوچک سازی آنتن‌های فلزی سنتی، امکان‌پذیر نبوده و در فناوری‌های نانوآنتن، مورد استفاده قرار نمی‌گیرند.

در سال‌های اخیر، فناوری‌های جدید شاهد رشد فزاینده‌ی گرافن و کاربردهای بالقوه آن در زمینه‌های مختلف، از جمله دستگاه‌های فعال الکترومغناطیسی بوده است. با این حال، تنها تعداد کمی از کارهای اولیه برای استفاده از گرافن در آنتن‌ها و دیگر دستگاه‌های منفعل، مطرح شده است. این امر به ویژه در کاربردهای نانوآنتن که در آن، گرافن برای نخستین بار به عنوان یک لایه‌ی اغتشاشی استفاده شده است [11]. در این نوع از نانوآنتن، گرافن در زیر یک آنتن دو قطبی ساخته شده از طلا، که بر روی یک زیرلایه‌ی دی‌اکسید سیلیکون، رشد داده شده و تابشی با فرکانس 120 گیگاهرتز گسیل می‌کند.

گرافن در حال حاضر توجه استثنایی را برای کاربردهای الکترومغناطیسی در مایکروویو، تراهرتز و فرکانسهای نوری، به خود جلب می‌کند و همچنین می‌توان آن را به عنوان یک مادّه‌ی دو بُعدی واقعی در نظر گرفت. گرافن به طور کامل توسط هدایت سطحی آن، توسط فرمول کوبو به عنوان تابعی از فرکانس، درجه حرارت، پتانسیل شیمیایی و نرخ پراکندگی، بیان می‌شود. یکی از جالب‌ترین خصوصیات این مادّه، توانایی آن در نگهداری حالت‌های پلاسمونیکی سطحی مغناطیسی عرضی با خواص بی‌سابقه است. گرافن به طور خاص، در باند تراهرتز، می‌تواند یک رفتار به شدت القائی به خود گرفته، که منجر به حالت‌های پلاسمونیک مغناطیسی عرضی می‌شود [17]. این خصوصیات منجر به کوچک سازی تجهیزاتی با اتلاف کم و کاربردهای گوناگونی از جمله در صنایع الکترونیک، مخابرات، اپتیک و نانوپزشکی می‌شود.

با توجه به خصوصیات الکتریکی گرافن، اثر میدان الکتریکی گرافن می‌تواند برای کنترل دینامیکی هدایت سطحی، روی یک محدوده‌ی وسیع، از طریق یک ولتاژ بایاس کاربردی، استفاده شود. در نتیجه، خواص انتشار پلاسمونیک و به ویژه ثابت انتشار، می‌تواند به صورت دینامیکی تنظیم شود [18]. این اصل می‌تواند در طرق مختلف برای ایجاد افزاره‌هایی مانند مدولاتورها یا المان‌های تابشی قابل پیکربندی مجدد، مورد استفاده قرار گیرد. کنترل دینامیکی ثابت انتشار، پیکربندی مجدد فرکانسی و مدت واپاشی معکوس را نیز فراهم می‌سازد.

در حال حاضر با توجه به کاربردهای وسیع نانوآنتن‌های پلاسمونیکی در فناوری‌های نوین، پژوهش‌های بسیاری بر روی چگونگی مدل‌سازی، عملکرد و کاربرد آن‌ها انجام گرفته است. با استفاده از گرافن در ساختار نانوآنتن پلاسمونیکی و با توجه به اهمیت کاربردهای مختلف محدوده‌ی فرکانسی امواج تراهرتز در نظارت‌های ایمنی، ارتباطات بی‌سیم، طیف سنجی، زیست پزشکی و سایر موارد، رفتار پلاسمونیکی آن بهبود یافته است. همچنین نانوآنتن پلاسمونیکی مبتنی بر گرافن افزاره‌ای است که از طریق اثر میدان الکتریکی گرافن، رفتاری نوسانی مانند عملکرد اسیلاتورها، از خود بروز داده و می‌تواند به طور مستقیم تابش گسیل شده را به انرژی موضعی و یا بالعکس، تبدیل کند.

Archive of SID

www.SID.ir

2- هدایت گرافن

گرافن ماده‌ای تازه کشف شده و یکی از آلوتروپ‌های کربن است. گرافن تک لایه‌ی اتمی تشکیل دهنده‌ی گرافیت، بصورت شبکه‌ی دو بُعدی لانه زنبوری است و با توجه به خواص نوری، حرارتی، شیمیایی، مکانیکی و الکتریکی آن، یک ماده‌ی نیمه فلزی در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به ساختار لانه زنبوری گرافن، با برش اتم‌های گرافن در راستای خاص، دو لبه‌ی متفاوت که یکی به صورت زیگزاگ و دیگری به صورت آرمچیر به وجود می‌آید که هر کدام از این حالت‌ها، نقش بسزایی در هدایت گرافن دارند. از نظر خواص نوری، گرافن به عنوان ماده‌ای شفاف شناخته شده است. به همین دلیل است که کاربردهایی در بسیاری از افزاره‌های نوری که نیاز به هدایت کردن با ورقه‌های نازک با شفافیت محض دارند، پیدا کرده است. گرافن تک لایه، نور سفید برخوری را تا 2/3% جذب کرده و 97/7% آن را، از خود عبور می‌دهد. شکل و جهت انباشته سازی، بر روی ویژگی های نوری گرافن تاثیر می‌گذارد. بنابراین، گرافن دو لایه، خواص نوری جالب جدیدی را از خود نشان می دهد.

از دید الکترومغناطیسی و تا حدود فرکانس های نوری، ضخامت اتمی گرافن اجازه می‌دهد تا آن را به عنوان یک سطح معادل با هدایت معین، به دقت مدل سازی کرد. این هدایت به پتانسیل شیمیایی (μ_c) گرافن بستگی دارد که می‌تواند با تغییر دوپینگ اولیه‌ی مادّه (نوع و تراکم حامل ها) یا به وسیله‌ی اعمال یک میدان خارجی، کنترل شود. به ویژه، استفاده از یک میدان الکترواستاتیک (بایاس جریان مستقیم)، یک هدایت سطحی یکنواخت قابل تنظیم را فراهم می‌کند [2و1]، در حالی که حضور یک میدان مغناطیسی خارجی، منجر به یک هدایت سطحی غیریکنواخت قابل تنظیم به واسطه ی اثر هال، می‌شود. در صورت عدم وجود میدان های مغناطیسی اعمالی، هدایت گرافن با استفاده از فرمول کوبو [3]، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$s = \frac{jq_e^{\,2}(w - j2T)}{p\,\mathbf{h}^2}\left[\frac{1}{(w - j2\Gamma)^2}\int_0^{\infty} e\left(\frac{\partial f_d(e)}{\partial e} - \frac{\partial f_d(-e)}{\partial e}\right)de - \int_0^{\infty}\frac{f_d(-e) - f_d(e)}{(w - j2\Gamma)^2 - 4(e/\mathbf{h})^2}\,de\right]$$

که در آن q_e بار الکترون، ω فرکانس زاویه‌ای، T دما، Γ نرخ پراکندگی، ε حالت انرژی و $\hbar$ ثابت پلانک است.

گرافن یک لایه‌ی تک اتمی است و توسط تانسور هدایت سطحی گرافن، به طور کامل توسط رابطه‌ی زیر شرح داده می‌شود:

$$\overleftrightarrow{s} = \begin{pmatrix} s_{xx} & s_{xy} \\ s_{yx} & s_{yy} \end{pmatrix}$$

این تانسور تنها از چهار مولفه به علت تقارن شبکه، تشکیل شده است. این بدان مفهوم است که، خواص الکتریکی گرافن ممکن است به طور کامل توسط مقدار تانسور هدایت سطحی محصور شود. تعدادی از عوامل ممکن است بر میزان هدایت سطحی گرافن تاثیر بگذارند که اصلی‌ترین آن‌ها، بایاس میدان الکتریکی موضعی است. با تغییر میزان هدایت سطحی متقابلاً میزان فرکانس رزونانس پلاسمونیک نیز، تغییر می‌کند. بدین

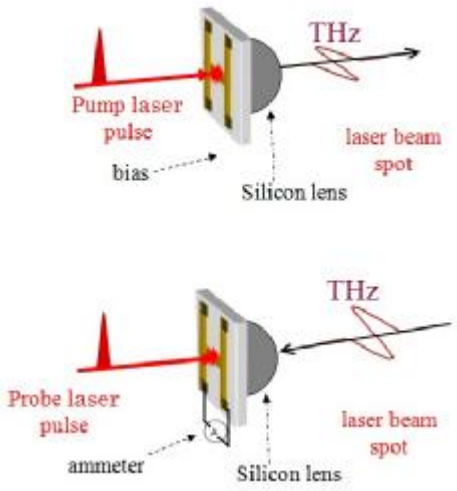
Archive of SID

www.SID.ir

منظور، تنظیم فرکانس کاری نانوآنتن گرافنی به وسیله‌ی تغییر دادن بایاس میدان الکتریکی موضعی عبوری گرافن، امکان‌پذیر است.

3- نانوآنتن پلاسمونیکی

ویژگی‌های نوری پیچیده و جالب نانوساختارهای فلزی، اخیراً زمینه‌ی تازه‌ای از پژوهش در فناوری نانوآنتن را را پدید آورده‌اند. در فرکانس‌های نوری تحت شرایط خاص، این ساختارها به ویژه با استفاده از فلزات خاص مانند طلا و نقره با هندسه‌های معین، زمانی که توسط نور فرودی تحریک شده‌اند، قادر به نشان دادن رزونانس‌های الکترومغناطیسی منحصر به فرد هستند (شکل1). این رزونانس‌های الکترومغناطیسی، رزونانس‌های پلاسمون پلاریتون سطحی هستند که به طور مستقیم با پرش الکترون‌های رسانش به لایه‌های الکترون ظرفیت مرتبط است و باعث تولید یک نور پراکنده‌ی قوی و سبب افزایش جذب میدان الکترومغناطیسی موضعی می‌شود. به عبارت دیگر، پلاسمون پلاریتون‌های سطحی، انرژی الکترومغناطیسی را در فصل مشترک فلز و دی‌الکتریک انتقال می‌دهد.



شکل1: نمای کلی از نحوه تولید امواج تراهرتز توسط نور برخوردی به نانوآنتن نوری

نانوآنتن‌ها به عنوان بخشی از ساختارهای پلاسمونیکی، اغلب به عنوان آنتن‌های نوری شناخته می‌شوند، زیرا آن‌ها در طیف نوری کار می‌کنند. نانوآنتن‌های نوری می‌توانند به عنوان نسخه‌ای از آنتن‌های معمولی که در فرکانس‌های رادیویی کار می‌کنند، در نظر گرفته شوند. اما برخلاف آنتن‌های فرکانس رادیویی که شکل آن‌ها می‌تواند برای فشرده کردن اندازه‌ی آن‌ها استفاده شود، در نانوآنتن‌های نوری، پراکندگی گذردهی به فشرده

www.SID.ir

کردن اندازه‌ی آن‌ها اجازه می‌دهد. زمانی که آنتن تبدیل به نانومواد پلاسمونیکی شود، خواص پراکندگی نسبت به پاسخ‌های آنتن‌های معمولی، جالب‌تر می‌شود. معمولاً طیف پراکندگی یک مادّه‌ی پلاسمونیکی، دارای یک اوج در طول موج رزونانس خاص است. این طول موج رزونانس می‌تواند توسط پارامترهای نوری، شکل و اندازه‌ی مواد، تحت تاثیر قرار گیرد.

در مقایسه با آنتن‌های معمولی که در فرکانس‌های رادیویی و ناحیه‌ی امواج مایکروویو عمل می‌کنند، ویژگی‌های غیرعادی فلزات (پراکندگی گذردهی و هدایت پذیری محدود) در فرکانس‌های نوری، باید به عنوان پارامتر قابل توجهی در طراحی و مشخصات نانوآنتن‌ها در نظر گرفته شود. به این معنا که، طبق مواد و فرکانس کاری نانوآنتن‌ها، ویژگی‌های پلاسمونیکی آن‌ها و یا اثر هارمونیکی اسیلاتورها، نقش مهمی در خواص پراکندگی آن‌ها ایفا می‌کنند، زیرا ویژگی‌های نوری اکثر ساختارهای فلزی، به طور قابل ملاحظه‌ای توسط وجود رزونانس پلاسمون پلاریتون سطحی و یا اثر الکترون‌های آزاد، تحت تاثیر قرار می‌گیرد. علاوه بر این، ویژگی اندازه‌ی نانومقیاس آنتن‌های نوری، قابلیت طراحی، ساخت و خصوصیات رفتار نوسانی آن‌ها را محدود می‌کند. کاهش اندازه‌ی آنتن ممکن است بر روی کارایی آن به عنوان مثال، بازده، پهنای باند، امپدانس ورودی و سایر موارد، تاثیر بگذارد. در سیستم‌های نوری، اخیراً با توجه به طبقه بندی گوناگون پژوهشی، این محدودیت‌ها از لحاظ نظری و عملی مطرح شده‌اند [4-7].

نانوآنتن‌های نوری قادر به تبدیل بهینه‌ی نور منتشر شده به میدان‌های موضعی زیر طول موج (در حدود امواج تراهرتز) هستند. نانوآنتن‌های نوری، در طیف نور مرئی و مادون قرمز عمل می‌کنند. متمرکز کردن نور، منجر به افزایش میدان الکتریکی می‌شود. بنابراین نانوآنتن‌های نوری، به وسیله‌ی کنترل فعل و انفعال نور با مادّه در میدان نزدیک راکتیو نانوآنتن‌ها، به ارائه‌ی اجتناب ناپذیر آن‌ها در بسیاری از کاربردهای تخصصی در زمینه‌هایی مانند آشکارساز نوری مادون قرمز، تبدیل انرژی خورشیدی، مدارهای مجتمع نوری بی‌سیم، میکروسکوپ نوری، بررسی فلورسانس، تشخیص مواد، طیف سنجی جذب و تشخیص درمان نوری-حرارتی تومور اجازه می‌دهند. بنابراین انتظار می‌رود که نانوآنتن‌ها، با یافتن کاربردهای بسیاری برای آن‌ها، به طور قابل توجهی راندمان تجهیزات اپتوالکترونیکی را بهبود بخشند [7].

3-1- نانوآنتن پلاسمونیکی گرافنی

اساساً آنتن یک افزاره‌ای است که می‌تواند تابش انتشاری را به انرژی موضعی و یا بالعکس، تبدیل کند. از لحاظ سنتی این کار، به طور مستقیم از طریق تابش الکترومغناطیسی با القاء جریان الکتریکی متناوب انجام می‌شود. اما این کار ممکن است به وسیله‌ی تزویج تابش انتشاری با حالت‌های پلاسمونیکی در یک هادی نیز انجام شود. اکثر فلزات دارای فرکانس رزونانس پلاسمونیکی در ناحیه‌ی نوری هستند. این بدان معنی است که آنتن‌های پلاسمونیکی فلزی، فقط برای تطبیق نور مرئی قابل استفاده بوده و برای ارتباطات نامناسب هستند،

Archive of SID

www.SID.ir

زیرا انتقال نور مرئی نیاز به خط دید واضح دارد. گرافن دارای فرکانس رزونانس پلاسمونیکی در باند تراهرتز است که آن را برای استفاده به عنوان یک نانوآنتن پلاسمونیکی مناسب می‌سازد [10-18].

یکی از زمینه‌های پژوهشی ویژه‌ی گرافن این است که، نانو ارتباطات بی‌سیم را با استفاده از فرکانس تراهرتز، میسر می‌سازد [8]. ارتباطات بی‌سیم در میان نانوسیستم‌های یکپارچه، نمی‌توانند به سادگی با کاهش اندازه‌ی آنتن‌های فلزی سنتی تا چندین نانومتر، انجام شوند. استفاده از آنتن‌های فلزی سنتی، نقاط ضعف و دلایل متعددی را شامل می‌شود؛ مانند پایین بودن قابلیت تحرک پذیری الکترون در ساختارهای فلزی با مقیاس نانو و به ویژه، استفاده از فرکانس‌های رزونانس بسیار بالا (به میزان محدوده‌ی فرکانسی مادون قرمز و طیف نوری) که منجر به تضعیف شدید کانال و مشکل اجرای نانو فرستنده و گیرنده‌هایی که در چنین فرکانس بالایی عمل می‌کنند، خواهد شد [9]. به لطف توانایی گرافن در تقویت رزونانس پلاسمون پلاریتون سطحی در باند تراهرتز، به دلیل قابلیت تحرک پذیری الکترون و حساسیت خیلی بالای آن، باعث شده است تا مشکلات کوچک سازی ابعاد، تنظیم جهت تابش (پلاریزاسیون) و تنظیم فرکانسی (از طریق اثر میدان الکتریکی گرافن) آنتن‌های بسیار کوچک مناسب برای ارتباطات بی‌سیم مابین نانوسیستم‌ها، کاهش یابد.

گرافن از نظر امکان فعل و انفعالات شدید به وسیله‌ی امواج الکترومغناطیسی در محدوده‌ی فرکانسی تراهرتز، بسیار جالب توجه است. در واقع، گرافن قادر به پشتیبانی از امواج پلاسمون سطحی پراکنده در فرکانس‌های دو برابر کمتر از فلزات نجیب، است. آنتن‌های فلزی سنتی، نیاز به فرکانس‌های بسیار بالا برای کار در مقیاس نانو دارند و بدین منظور، به کار بردن آن‌ها را غیرممکن می‌سازد. اما حرکت آهسته‌ی منحصر به فرد الکترون‌های آزاد در گرافن، آن را به منظور کار در فرکانس‌های پایین‌تر قادر می‌سازد و به همین سبب، گرافن گزینه‌ی مناسبی برای استفاده در آنتن‌هایی با مقیاس نانو است.

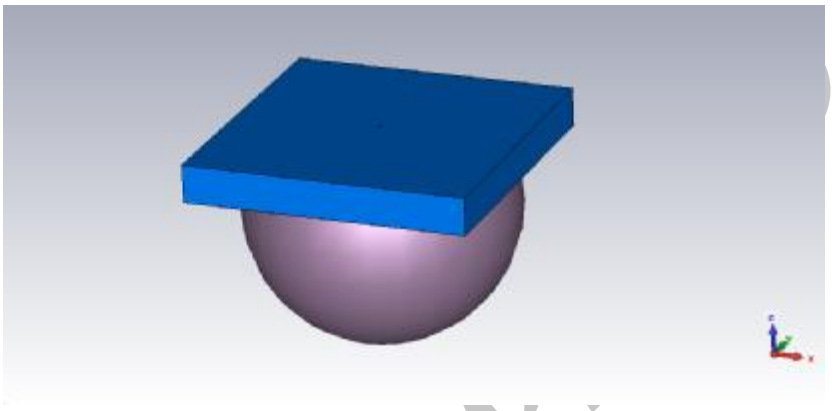
این نانوآنتن، به عنوان یک آنتن فرکانس بالای مبتنی بر گرافن که ارتباطات مابین نانوسیستم‌ها را افزایش می‌دهد، مطرح شده است. پیشرفت‌های حاصل شده در این زمینه، به دلیل ساختار منحصر به فرد گرافن و همچنین خواص جالب ذکر شده‌ی آن است. در نهایت، انتخاب لایه‌ی بی‌نهایت نازک گرافن به منظور کاربرد در نانوآنتن‌ها، به علت هدایت نسبتاً خوب الکترون‌های آزاد است که عمدتاً به فرکانس، دما، زمان استراحت (τ) الکترون و ناخالصی شیمیایی بستگی دارد. علاوه بر این، یکی از ویژگی‌های امیدوارکننده‌ی گرافن در مقایسه با فلزات، امکان تغییر هدایت آن با استفاده از بایاس میدان مغناطیسی الکترواستاتیکی خارجی است، که باعث تغییر پتانسیل شیمیایی گرافن می‌شود.

4- شبیه سازی نانوآنتن پلاسمونیکی مبتنی بر گرافن

در این پژوهش، ویژگی‌های انتشاری نانوآنتن پلاسمونیکی مبتنی بر گرافن در نزدیکی محدوده‌ی فرکانسی زیرتراهرتز (از حدود 0/1 تا 0/3 تراهرتز شامل محدوده‌ی زیرتراهرتز است) ارائه شده و امپدانس ورودی و

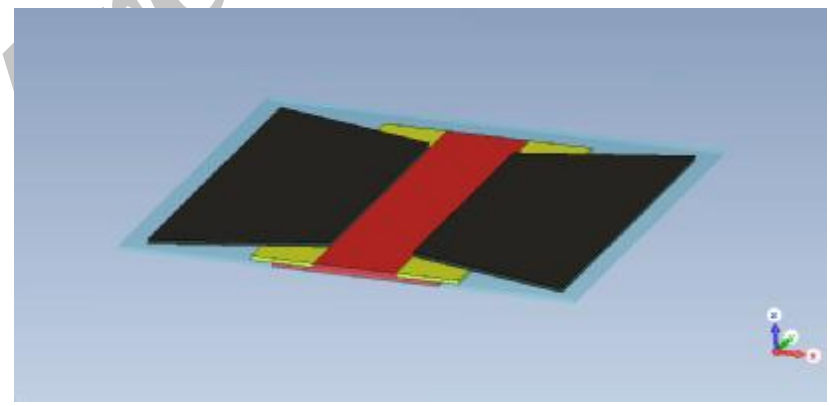
www.SID.ir
Archive of SID

خواص تابش این نانوآنتن پلاسمونیکی مبتنی بر گرافن، توسط نرم‌افزار CST Microwave Studio از طریق شبیه‌سازی‌های عددی تمام موج، بررسی شده است. ساختار نانوآنتن طراحی شده، بر روی یک زیرلایه از جنس گالیوم آرسناید (با ضریب گذردهی به مقدار 12/9) و با استفاده از لنز سیلیکونی (با ضریب گذردهی به مقدار 11/66) به منظور جهت‌گیری بهتر تابش تراهرتز خروجی، قرار داده شده است (شکل2).



شکل2: نمای کلی نانوآنتن پلاسمونیکی مبتنی بر گرافن که در مرکز زیرلایه‌ی گالیوم آرسناید، قرار داده شده است.

همچنین یک طراحی کلیدی برای نانوآنتن دو قطبی انجام شده است که از صفحات گرافن به شکل ذوزنقه‌ای بهره می‌برد (شکل3).



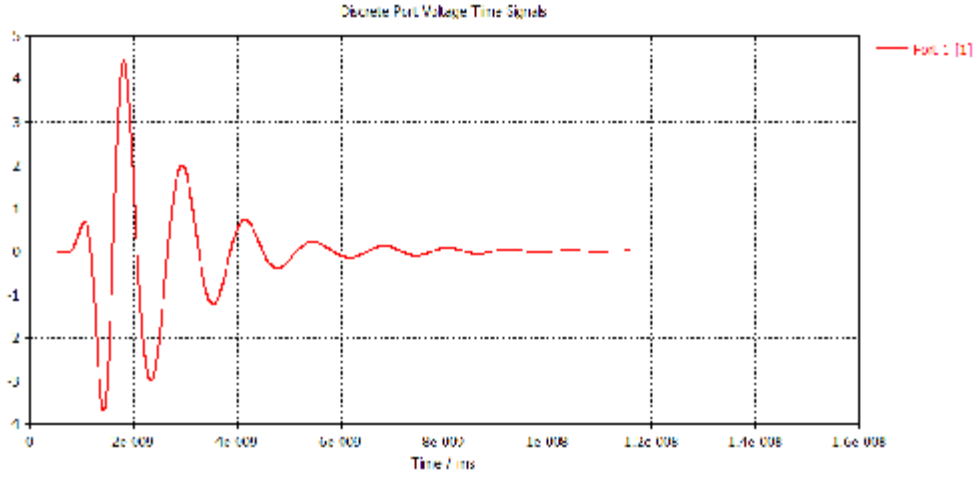
شکل3: نمای کلی ساختار ذوزنقه‌ای استفاده شده در نانوآنتن پلاسمونیکی مبتنی بر گرافن

www.SID.ir

نانوآنتن طراحی شده، با یک آنتن دو قطبی قابل مقایسه است. در این حالت، آنتن دو قطبی مجموعه‌ای از دو صفحه‌ی گرافن به شکل ذوزنقه‌ای است که به وسیله‌ی لایه‌ی نازکی از اکسید آلومینیوم (با ضریب گذردهی به مقدار 9)، از هم دیگر جدا شده‌اند. این لایه‌ی اکسید آلومینیوم به این دلیل اضافه شده است که هدایت سطحی گرافن را از طریق اثر میدان الکترواستاتیکی موضعی، کنترل کند. همچنین، با استفاده از فوتومیکسر بسیار شفافی از جنس پلی متیل متاکریلات (هادی نوری بسیار عالی با ضریب شکست کم در حدود 587 نانومتر)، توسط تابش امواج لیزر مادون قرمز به عنوان تغذیه‌ی نوری برای تزویج با میدان الکترومغناطیسی عرضی رزونانس‌های موضعی و نیز به منظور ایجاد اثر فوتوالکتریک در الکترودهای طلا، می‌توان امواج فرکانسی تراهرتز را تولید نمود. فوتومیکسر تراهرتز، با تزویج منبع تولید رزونانس موضعی تراهرتز (در این مورد دو توده‌ی گرافن ذوزنقه‌ای انباشته شده بر روی هم) و نور مادون قرمز برخوردی، انتشار در فضای آزاد را امکان‌پذیر می‌سازد. با افزایش ولتاژ اعمال شده در مقطع گرافن، پتانسیل شیمیایی گرافن افزایش می‌یابد که به این طریق، فرکانس رزونانس نانوآنتن نیز افزایش می‌یابد. فرکانس‌های بالاتر، راندمان‌های سیستمی را بهبود می‌بخشند.

صفحات ذوزنقه‌ای گرافن به ضخامت 1 نانومتر، با اندازه‌ی هندسی ضلع کوچک 6 میکرومتر، ضلع بزرگ 8 میکرومتر و عرض 4 میکرومتر، طراحی شده‌اند. طول و عرض زیرلایه 1/5 میلی‌متر و ضخامت آن 160 میکرومتر است. همچنین ارتفاع لنز سیلیکونی 572 میکرومتر و شعاع آن 547 میکرومتر است. ضخامت الکترودهای طلای به کار رفته در این نانوآنتن، 100 نانومتر است، که بر روی فوتومیکسر از جنس پلی متیل متاکریلات با ضخامت مرکزی 200 نانومتر، کاشت شده است. همچنین فاصله‌ی شکاف میانی ساختار نانوآنتن، 2 میکرومتر در نظر گرفته شده است.

به منظور شروع شبیه‌سازی و اعمال بایاس ورودی از پورت Discrete برای ایجاد پارامترهای پراکندگی استفاده شده است (شکل4).

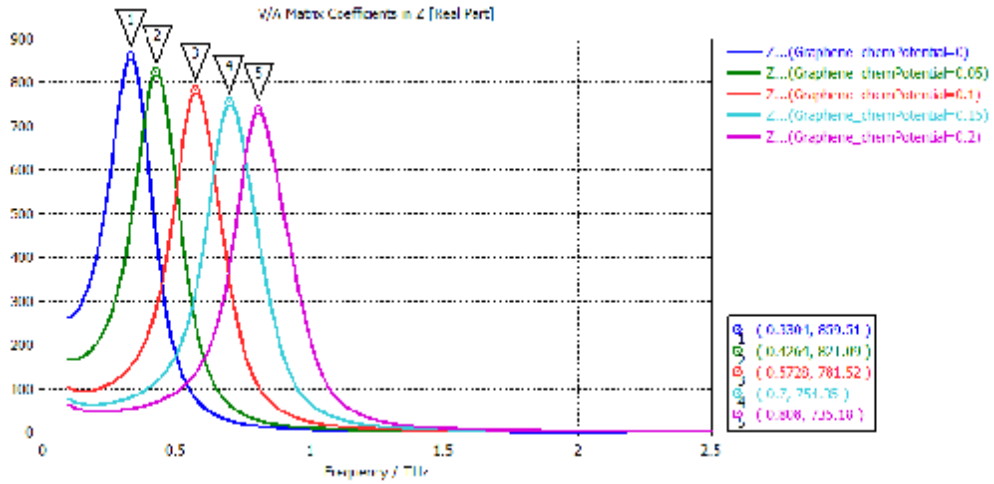


Archive of SID

www.SID.ir

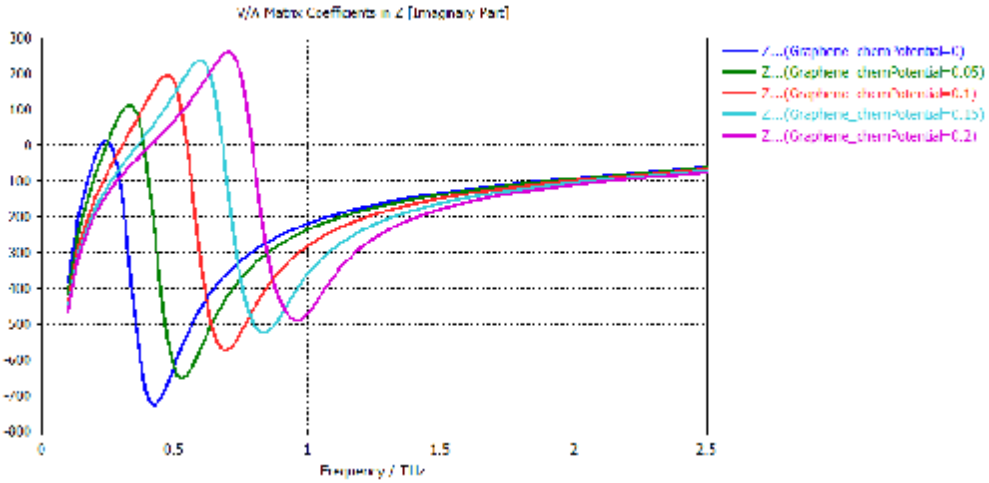
شکل4: نمودار ولتاژ بایاس ورودی اعمال شده توسط پورت Discrete

با توجه به منحنی‌های فرکانس رزونانس پلاسمونیکی نشان داده شده در شکل5 و شکل6، به وسیله‌ی تغییر پتانسیل شیمیایی صفحات گرافن (از 0eV تا 0/2eV با پنج گام)، فرکانس‌های رزونانسی متفاوتی تولید می‌شود. همچنین امپدانس ورودی (در پتانسیل شیمیایی 0eV) نسبت به ساختارهای مشابه به میزان 72 درصد افزایش یافته است که این افزایش باعث تطبیق امپدانس بهینه‌تری می‌شود. با طراحی صفحات گرافن به صورت ذوزنقه‌ای، لبه‌های زیگزاگ گرافن، حالت لبه‌ای ویژه‌ای را نشان می‌دهد. حالت‌های انرژی در انرژی فرمی، صاف هستند و پیک‌های تیزی را در چگالی حالت‌ها ارائه می‌دهد، زیرا چگالی بار روی حالت‌های لبه، به شدت موضعی شده است. همین امر برای لبه‌ی آرمچیر، قابل استفاده نیست. همچنین تغییر عرض گرافن نشان می‌دهد که تاثیر مهمی بر روی حالت لبه دارد. در حقیقت گرافن با لبه‌ی زیگزاگ، بدون در نظر گرفتن عرض آن، همیشه فلزی است. همچنین در ساختار ارائه شده طبق نمودارهای به دست آمده، با افزایش امپدانس ورودی، راندمان پایدارتر و الگوی تابشی بهینه‌تری بدون تلفات برگشتی را شاهد هستیم.



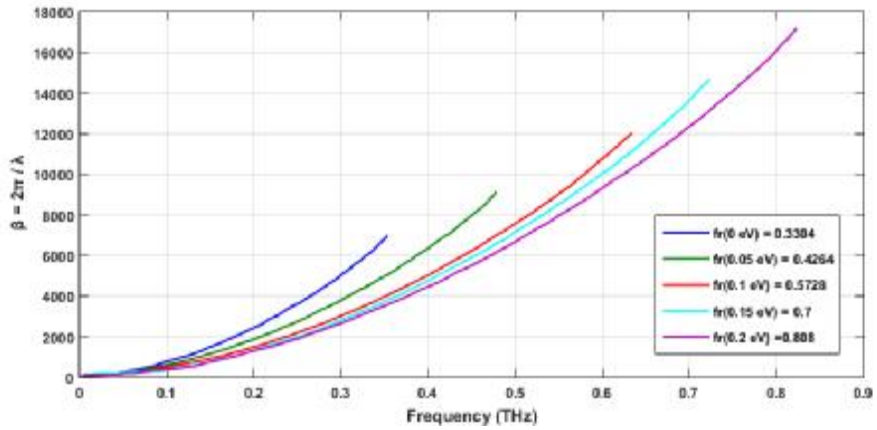
شکل5: نمودار فرکانس و قسمت حقیقی امپدانس ورودی نانوآنتن پلاسمونیکی مبتنی بر گرافن

www.SID.ir



شکل6: قسمت موهومی امپدانس ورودی (راکتانس) نانوآنتن پلاسمونیکی مبتنی بر گرافن

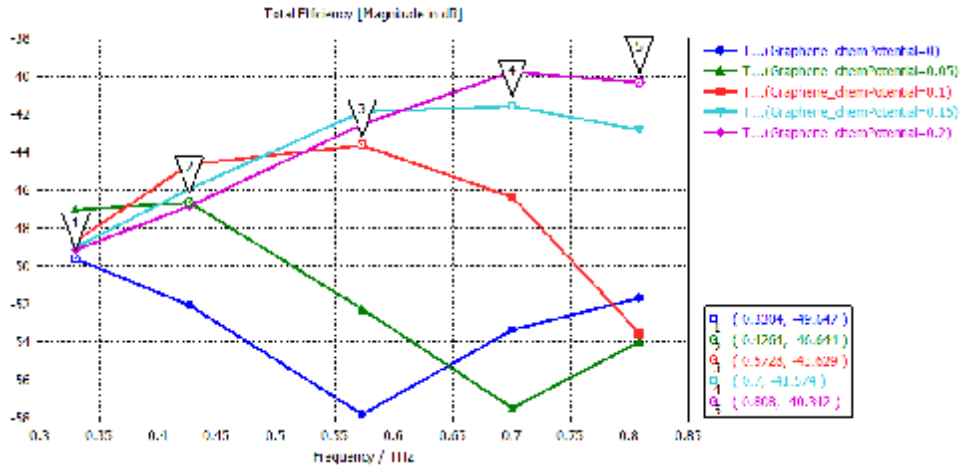
به دلیل ماهیت پراکندگی انتشار پلاسمونیکی نانوآنتن مبتنی بر گرافن، با کنترل دینامیکی پتانسیل شیمیایی صفحات گرافن، مدت واپاشی معکوس نانوآنتن در فرکانس‌های رزونانسی مختلف، در شکل7 نشان داده شده است.



شکل7: کنترل دینامیکی مدت واپاشی معکوس نانوآنتن پلاسمونیکی مبتنی بر گرافن

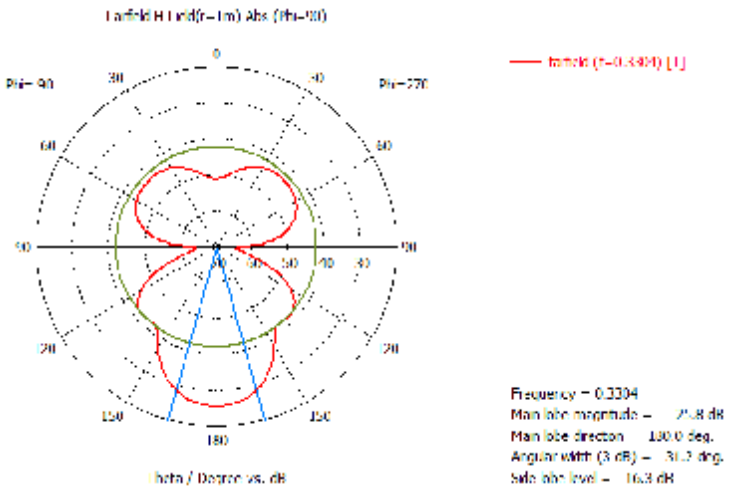
همچنین نمودارهای راندمان تابشی کل نانوآنتن، با در نظر گرفتن فوتومیکسر تراهرتز با امپدانس داخلی 10کیلواهم (که یک مقدار معمول برای سیستم‌های موج پیوسته است)، در شکل8 نشان داده شده است.

www.SID.ir



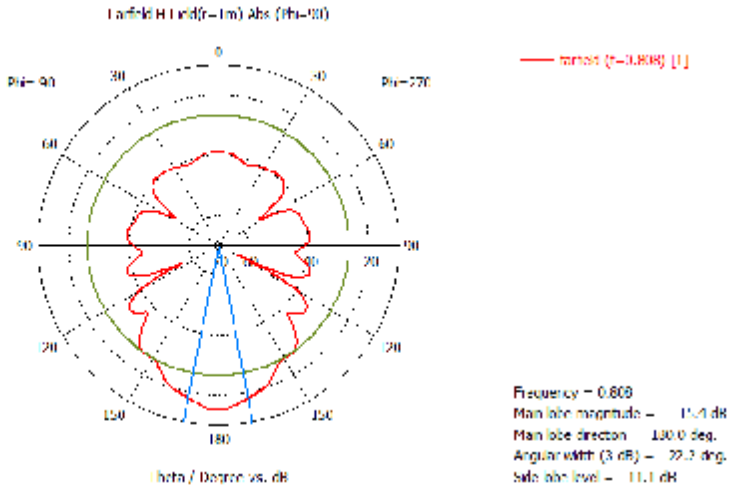
شکل8: راندمان تابشی کل بر حسب دسی‌بل در فرکانس‌های رزونانسی مختلف با در نظر گرفتن امپدانس فوتومیکسر

با توجه به نمودارهای قطبی (H-Field) میدان دور شکل9 و شکل10، از لحاظ جهت‌گیری تابش خروجی با الگوی تابشی نسبتاً خوب، توسط لنز سیلیکون و بدون لنز سیلیکون، تحلیل شده است. همچنین شایان ذکر است، لنز تاثیر بسیار ناچیزی بر امپدانس ورودی نانوآنتن پلاسمونیکی دارد.



شکل9: نمودار قطبی با جهت‌گیری تابش خروجی در فرکانس رزونانس 0/3304 تراهرتز با پتانسیل شیمیایی 0eV

www.SID.ir



شکل10: نمودار قطبی با جهت‌گیری تابش خروجی در فرکانس رزونانس 0/808 تراهرتز با پتانسیل شیمیایی 0/2eV

5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، نانوآنتن پلاسمونیکی مبتنی بر گرافن برای کاربردهای فراوان امواج تراهرتز، طبق حالت‌های پلاسمونیکی مورد بحث، و با بررسی نحوه‌ی انتشار امواج تراهرتز، طراحی شده است. با بهره‌گیری از نرم‌افزار شبیه سازی CST Microwave Studio، طراحی این نانوآنتن امکانپذیر است. به منظور تحلیل بسیار دقیق این نانوآنتن در فضای سه بُعدی، به زمان بسیار طولانی به کمک رایانه‌هایی با حافظه‌ی رَم بسیار زیاد و پردازنده‌ی فوق‌العاده قوی، نیازمند است. بدین منظور، با کاهش نسبی مش‌بندی ساختار و محصور کردن فضای محاسباتی با استفاده از شرایط مرزی جاذب (PML)، می‌توان امواج تابش شده را بدون تلفات برگشتی، منتشر کرد. با بررسی و تحلیل نمودارهای به دست آمده، می‌توان نشان داد که پاسخ نوسانی نانوآنتن پلاسمونیکی مبتنی بر گرافن، تابعی از پارامترهای موثر ورودی، ابعاد، شکل، جنس و ضریب گذردهی محیط است. با توجه به ساختارهای طراحی شده در گذشته، فرکانس رزونانس این نانوآنتن پلاسمونیکی، در محدوده‌ی پایین‌تر طیف فرکانسی امواج تراهرتز، تابش می‌کند. همچنین با کنترل پتانسیل شیمیایی، شکل هندسی و عرض صفحات گرافن، امپدانس ورودی نانوآنتن پلاسمونیکی طراحی شده، افزایش یافته و می‌توان به تطبیق امپدانس بهینه‌تری دست یافت. به دلیل پهنای باند کمتر و تیز بودن فرکانس رزونانس، ضریب کیفیت این نانوآنتن بالا بوده و نیز، جهت‌گیری انرژی تابشی باریک‌تری نسبت به ساختارهای مشابه دارد.

مراجع

[1] Shao, Y., Yang, J. J. and Huang, M. (2016). *A review of computational electromagnetic methods for graphene modeling*. International Journal of Antennas and Propagation.

www.SID.ir

[2] Pierantoni, L., Mencarelli, D., Bozzi, M., Moro, R., & Bellucci, S. (2014). *Graphene-Based Electronically Tuneable Microstrip Attenuator*. Nanomaterials and Nanotechnology, *4*, 18.

[3] Gomez-Diaz, J. S. and Perruisseau-Carrier, J. (2012). *Microwave to THz properties of graphene and potential antenna applications*. International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP*)*, Nagoys, 2012, pp. 239-242.

[4] Bharadwaj, P., Deutsch, B. and Novotny, L. (2009). *Optical Antennas*, Adv. Opt. Photon. 1, 438-483.

[5] Krasnok, A. E., Denisyuk, A. I., Belov, P. A., Simovski, C. R., Kivshar, Y. S., Maksymov, I. S. and Miroshnichenko, A. E. (2013). *Optical nanoantennas*. Physics-uspekhi, 56, 6, 539-564.

[6] Xi, N. and Lai, K. W. (2012). *Nano-optoelectronic sensors and devices: nanophotonics from design to manufacturing*. Amsterdam: William Andrew.

[7] Park, Q. (2009). *Optical antennas and plasmonics*. Contemporary Physics,50(2), 407-423.

[8] Llatser, I., Kremers, C., Chigrin, D. N., Jornet, J. M., Lemme, M. C., Cabellos-Aparicio, A. and Alarcon, E. (2012). *Characterization of graphene-based nano-antennas in the terahertz band*. 2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP).

[9] Bala, R., Marwaha, A. and Marwaha, S. (2016). *Performance Enhancement of Patch Antenna in Terahertz Region Using Graphene*. Current Nanoscience, 12(2), 237-243.

[10] Mencarelli, D., Dragoman, M., Pierantoni, L., Rozzi, T. and Coccetti, F. (2013). *Design of a coplanar graphene-based nano-patch antenna for microwave application*. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT).

[11] Mao, F., Huang, M., Zhang, J., Yang, J. and Li, T. (2015). *Graphene Assisted Radiation Adjustable OAM Generator*. Progress In Electromagnetics Research M, 42, 31-38.

[12] Jornet, J. M. and Akyildiz, I. F. (2014). *Graphene-based plasmonic nano-transceiver for terahertz band communication*. The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014).

Archive of SID

www.SID.ir

[13] Llatser, I., Cabellos-Aparicio, A., Alarcon, E., Kremers, C., Chigrin, D. N. and Jornet, J. M. (2012). *Graphene-based nano-patch antenna for terahertz radiation*. Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications, 10, 4, 353-358.

[14] Shapoval, O. V., Gomez-Diaz, J. S., Perruisseau-Carrier, J., Mosig, J. R. and Nosich, A. I. (2013). *Integral Equation Analysis of Plane Wave Scattering by Coplanar Graphene-Strip Gratings in the THz Range*. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 3(5), 666-674.

[15] Wu, B., Zhu, B., Ren, G. and Jian, S. (2016). *Circular Polarization-Dependent Wavefront Control of Plasmons on Graphene*. IEEE Photonics Technology Letters, 28(18), 1940-1943.

[16] Gatte, M. T., Soh, P. J., Rahim, H. A., Ahmad, R. B., & Malek, F. (2016). *The Performance Improvement Of Thz Antenna Via Modeling And Characterization Of Doped Graphene*. Progress In Electromagnetics Research M, 49, 21-31.

[17] Tamagnone, M., Gómez-Díaz, J. S., Mosig, J. R. and Perruisseau-Carrier, J. (2012). *Analysis and design of terahertz antennas based on plasmonic resonant graphene sheets*. Journal of Applied Physics, 112(11), 114915.

[18] Tamagnone, M., Gómez-Díaz, J. S., Mosig, J. R. and Perruisseau-Carrier, J. (2012). *Reconfigurable terahertz plasmonic antenna concept using a graphene stack*. Applied Physics Letters, 101(21), 214102.

Archive of SID

www.SID.ir