



## طراحی و شبیه سازی ساختاری پلاسمونیک مبتنی بر گرافن شناور جهت

### تولید و افزایش هارمونیک سوم

محمدجواد رحیمزاده<sup>۱</sup>، رحیم غیور<sup>۲\*</sup>، مریم محیط پور<sup>۳</sup>

۱- گروه مهندسی برق، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

[mjrahimzade1356@gmail.com](mailto:mjrahimzade1356@gmail.com)

۲- گروه مهندسی برق، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

[rghayour@shirazu.ac.ir](mailto:rghayour@shirazu.ac.ir)

۳- گروه مهندسی برق، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

[mohitpour@gmail.com](mailto:mohitpour@gmail.com)

**چکیده:** در این مقاله بر اساس ویژگی غیرخطی گرافن و قراردادن لایه‌ای از گرافن بر روی بستر مناسب، یک موجبر پلاسمونیک مبتنی بر گرافن شناور جهت تولید هارمونیک سوم پیشنهاد شده است. نقش پارامترهای مختلف گرافن تک‌لایه در خاصیت رزونانس و رسانایی غیرخطی گرافن تعیین شده است. نشان داده شده که با تغییر پتانسیل الکتروشیمیایی گرافن ( $\mu_{eg}$ )، می‌توان تولید هارمونیک سوم را که بر اساس خواص غیرخطی گرافن تک‌لایه است، تنظیم کرد. روش محاسباتی تفاضل محدود در حوزه زمان برای شبیه‌سازی عددی و تجزیه و تحلیل ساختار پیشنهادی در محدوده طول موج مادون قرمز میانی استفاده شده است. در شبیه‌سازی‌های ما بهره توان تبدیلی در حدود  $48/08$  - دسی‌بل محاسبه شد که افزایش قابل توجهی نسبت به سایر منابع نشان می‌دهد. استفاده از نمونه‌های گرافن با کیفیت بالا و شناور کردن آن‌ها و در نهایت استفاده از دی‌الکتریک  $Si_3N_4$  عملکرد ساختار پیشنهادی را در مقایسه با سایر مراجع، بهبود بخشیده است. نتیجه این کار می‌تواند برای توسعه طیف وسیعی از برنامه‌های کاربردی مهم مانند تولید فرکانس جدید، پردازش سیگنال، طیف‌سنجی، سنسجش شیمیایی و سوئیچ‌ها در محدوده فرکانس مادون قرمز میانی مورد استفاده قرار گیرد.

واژه های کلیدی: بهره توان تبدیلی، گرافن شناور، موجبر پلاسمونیک، هارمونیک سوم

## Design and simulation of plasmonic structure based on suspended graphene sheets for enhancing third harmonic generation

Mohammad Javad Rahimzadeh<sup>1</sup>, Rahim Ghayour<sup>2\*</sup>, Maryam Mohitpour<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran  
[mjrahimzade1356@gmail.com](mailto:mjrahimzade1356@gmail.com)

<sup>2</sup> Department of Electrical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran  
[rghayour@shirazu.ac.ir](mailto:rghayour@shirazu.ac.ir)

<sup>3</sup> Department of Electrical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran  
[mohitpour@gmail.com](mailto:mohitpour@gmail.com)

### Abstract:

In this article, based on the nonlinear property of graphene and placing a layer of graphene on a suitable substrate, a plasmonic waveguide based on suspended graphene has been proposed to enhance third harmonic generation (THG). The role of different parameters of single-layer graphene in resonance properties and nonlinear conductivity of graphene has been determined. It is shown that by changing the electrochemical potential of graphene, it is possible to tune the THG, which is based on the nonlinear properties of monolayer graphene. The finite difference computing method in the time



domain (FDTD) has been used for numerical simulation and analysis of the proposed structure in the mid-infrared wavelength range. In our simulations, the conversion efficiency was calculated at about -48.08 dB, which shows a significant increase compared to other sources. Using high quality graphene samples and floating them and finally using  $\text{Si}_3\text{N}_4$  dielectric has improved the performance of the proposed structure compared to other references. The result of this work can be used to develop a wide range of important applications such as new frequency generation, signal processing, chemical sensing and switches in the MIR frequency range.

**Keywords:** conversion efficiency, suspended graphene, Plasmonic waveguide, Third harmonic.

DOI: 00.00000/0000

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ چاپ مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۰۸

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۲۳

## ۱- مقدمه

تحریک کند. پلاسمون برانگیخته شده روی گرافن در محدوده تراهرتز و مادون قرمز میانی طیف الکترومغناطیسی قرار دارد [۶]. اخیراً ساختارهای مختلفی برای تولید هارمونیک سوم در محدوده عملکرد نوری مورد بررسی قرار گرفته است [۷]. در [۸] یک موجبر مبتنی بر سیلیکون معرفی شده که در آن لایه‌ای از طلا بر روی یک بستری سیلیکونی قرار می‌گیرد. با اعمال نور در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر به سازه، هارمونیک سوم در طول موج ۵۱۷ نانومتر تولید می‌شود. مشکل اصلی در دستگاه‌های پلاسمونیک که از نقره و طلا ساخته می‌شوند، تلفات قابل توجه آنها در محدوده‌های فرکانسی مختلف است. به دلیل این تلفات، کارایی این دستگاه‌های پلاسمونیک به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، اثرات غیرخطی مانند THG در موجبرهای پلاسمونیک مبتنی بر فلزات نجیب مانند نقره و طلا در مقایسه با اثرات غیرخطی در موجبرهای پلاسمونیک مبتنی بر گرافن بسیار ضعیف است. همچنین بهره غیرخطی مرتبه سوم در فلزات نجیب با تحریک الکتریکی قابل تنظیم نیست و نیاز به تغییر هندسه سازه دارد. در واقع، در گرافن، اثر غیرخطی را می‌توان با تغییر پتانسیل الکتروشیمیایی بدون تغییر ساختار تنظیم کرد [۹]. گرافن علاوه بر داشتن خواص غیرخطی خوب، خواص الکترونیکی، مغناطیسی و نوری مفیدی از خود نشان می‌دهد و تلفات بسیار کمتری در محدوده  $\text{THz}^4$  و مادون قرمز میانی دارد [۱۰]. به‌طور کلی، گرافن دو مزیت عمده نسبت به مواد پلاسمونیک معمولی دارد. اولاً، طول انتشار SPPs در گرافن در مناطق THz و مادون قرمز میانی بیشتر از فلزات معمولی است. دوم، قابلیت تنظیم خواص نوری گرافن توسط دوپینگ و ولتاژ بیاس خارجی در دسترس است [۱۱]. بنابراین، دستگاه‌های پلاسمونیک مبتنی بر گرافن، از جمله موجبرها، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. تحرک بالای حامل گرافن منجر به زمان استراحت طولانی حامل‌ها می‌شود و بنابراین، طول انتشار پلاریتون پلاسمون‌های سطحی گرافن<sup>۵</sup> (GSPP) به طور معقولی افزایش می‌یابد. تلفات انتشار موجبرهای پلاسمونیک مبتنی بر گرافن پیشنهادی در تحقیقات گذشته از مرتبه  $4\text{-}6\text{dB}\mu\text{m}^{-1}$  است که هنوز هم زیاد است [۱۲]. تلفات انتشار بالا مانع از توسعه مدارهای مجتمع پلاسمونیک می‌شود.

یکی از فرایندهای نور غیرخطی، تولید هارمونیک نوری است که در آن تعدادی فوتون ( $N$ ) با انرژی ( $E$ ) و فرکانس ( $\omega$ ) یکسان، (که در آن  $E = \hbar\omega$ ) با یک ماده غیرخطی بر همکنش کرده و تولید یک فوتون جدید با انرژی  $E_N = NE$  یا فرکانس ( $\omega_N = N\omega$ ) می‌کنند [۱]. در دهه اخیر، گسترش منابع نور با استفاده از تولید هارمونیک سوم (THG) بسیار مورد توجه قرار گرفته و تحقیقات زیادی انجام شده است. یکی از پارامترهای مهم در این تحقیقات، بهره توان هارمونیک سوم است. به‌طور کلی، در یک موجبر نوری با تطبیق فاز مناسب بین فرکانس اصلی و هارمونیک سوم می‌توان نرخ تبدیل هارمونیک سوم را افزایش داد که این امر با روش‌هایی مانند مهندسی سازه انجام می‌شود [۲]. چنین تطبیق فازی معمولاً به ساختارهای پیچیده‌ای نیاز دارد که پیاده‌سازی آنها در عمل دشوار است. مکانیسم تولید هارمونیک سوم با استفاده از برهم‌کنش شدت نور با یک ماده غیرخطی یک روش بسیار مؤثر است و از مهندسی ساختارهای پیچیده اجتناب می‌کند [۱]. مطالعات اخیر کاربردهای مهم گرافن را در اپتیک و الکترونیک نشان می‌دهد که بر اساس ویژگی‌های مختلف گرافن از جمله رفتار غیرخطی گرافن است [۳]. گرافن یک ماده کریستالی دو بعدی از کربن است که در آن اتم‌های کربن در یک شبکه لانه زنبوری قرار گرفته‌اند. خواص الکتریکی، نوری و فیزیکی خارق‌العاده گرافن به دلیل ساختار پیوند لانه زنبوری آن است که این ماده را از سایر مواد دو بعدی متمایز می‌کند [۴]. پلاسمونیک به‌طور کلی یک رویکرد هیجان‌انگیز برای غلبه بر حد پراش نور است به‌طوری که طراحی و ساخت مدارهای مجتمع فوتونی در مقیاس نانو امکان‌پذیر می‌شوند. در دهه اخیر، گرافن به‌عنوان یک ماده پلاسمونیک ویژه با رفتار غیرخطی در محدوده‌ی خاصی از طول موج مورد استفاده قرار گرفته است [۵].

پلاریتون پلاسمون سطحی قوی<sup>۲</sup> (SPP) و تنظیم‌پذیری آسان پتانسیل الکتروشیمیایی گرافن<sup>۳</sup> ( $\mu\text{cg}$ ) از مزایای پلاسمون‌های سطحی شگفت‌انگیز گرافن نسبت به فلزات نجیب مانند طلا و نقره است [۶]. با اعمال نور شدید، پلاریتون‌های پلاسمون سطحی، برانگیخته شده و در مرز مشترک فلز - عایق پخش می‌شوند. جفت‌شدن چنین میدان‌هایی می‌تواند اثرات غیرخطی گرافن (به‌ویژه هارمونیک سوم) را بیشتر

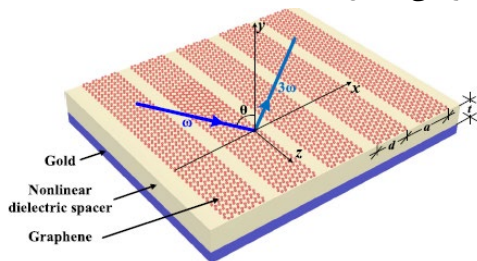
<sup>4</sup> Terahertz<sup>5</sup> Graphene surface plasmon polaritons<sup>1</sup> Third harmonic generation<sup>2</sup> Surface plasmon polaritons<sup>3</sup> Electrochemical potential

لایه‌های گرافن معلق، تحرک حامل بالایی با بیش از  $10^{10}$  سانتی‌متر مربع بر ولت، ثابته نشان می‌دهند [۱۳]. در حالی که با قرار دادن یک لایه گرافن بر روی یک بستر می‌تواند تحرک حامل‌های گرافن را به طور قابل توجهی به  $10^{10}$  سانتی‌متر مربع بر ولت، ثابته کاهش دهد، بنابراین زمان استراحت حامل‌ها به طور قابل توجهی محدود می‌شود. چنین تخریبی در تحرک حامل‌ها عمدتاً به دلیل برهم‌کنش گرافن با بستر زیرین است. وجود عواملی مانند فونون‌های سطحی، تله‌های بار سطحی، نقص و... در زیر لایه می‌تواند باعث این محدودیت شود [۱۴]. بنابراین، بسیار مطلوب است که دستگاه‌های یکپارچه مبتنی بر ورقه‌های گرافن معلق ساخته شوند. ترانزیستورهای اثر میدانی با کارایی بالا با استفاده از لایه‌های گرافن معلق قبلاً پیشنهاد شده‌اند [۱۵]، که نقش مهمی در مدارهای الکترونیکی آینده ایفا می‌کنند. با این حال، دستگاه‌های اپتوالکترونیکی غیر خطی مبتنی بر گرافن معلق بررسی نشده‌اند. در بخش ۲ هدایت گرافن و تأثیر تغییر پارامترهای مهم پتانسیل الکتروشیمیایی گرافن، زمان آرامش حامل‌ها و فرکانس نور اعمالی بر روی رسانایی غیرخطی گرافن و توان هارمونیک سوم مورد بررسی قرار گرفته است. در اینجا ما یک موجبر پلاسمونیک مبتنی بر گرافن شناور جهت تولید هارمونیک سوم ارائه کرده‌ایم که مشکلات کاهش تحرک حامل‌ها را نداشته و با افزایش زمان آرامش حامل‌ها و کاهش تلفات، در نهایت باعث افزایش بهره توان تبدیلی (نسبت توان هارمونیک سوم به توان نور اعمالی) نسبت به سایر منابع شده است. ماکزیمم بهره توان تبدیلی محاسبه شده در این ساختار که در بخش ۳ محاسبه شده است، به ازای پارامترهای مهم شدت میدان ورودی  $1 \text{ MW/cm}^2$ ، زمان آرامش حامل‌ها  $3 \text{ ps}$  و ضریب غیر خطی مرتبه سوم  $3 \times 10^{-18} \text{ m}^2 \text{ V}^{-2}$  برابر  $-48.08 \text{ dB}$  به دست آمده است. در ادامه به برخی از تحقیقات انجام شده قبلی، نقاط قوت و ضعف آنها اشاره شده است.

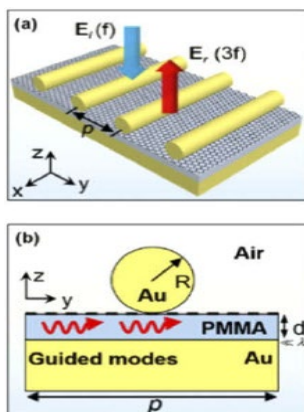
یکی از روش‌های متداول جهت تولید هارمونیک سوم استفاده از ساختار توری شکل است [۱]. در اینجا با اعمال یک میدان الکترومغناطیسی با دامنه  $0.19$  مگاوات بر سانتی‌متر مربع در فرکانس  $10/48$  تراهرتز، هارمونیک سوم را محاسبه کرده است. ماکزیمم بهره توان تبدیلی در این ساختار  $64/34$  - دسی بل به دست آمده است [۱]. در این مقاله تأثیر پارامترهای مهمی مانند فرکانس ورودی، پتانسیل الکتروشیمیایی گرافن و زمان آرامش حامل‌ها بررسی نشده است. همچنین ماکزیمم بهره توان تبدیلی ساختار پیشنهادی از این مرجع بیشتر است. استفاده از نانو نوارهای گرافن به صورت پرپودیک روش دیگری جهت تولید هارمونیک سوم است. شکل (۱) چنین ساختاری را نشان می‌دهد. نانو نوار گرافن به صورت پرپودیک بر روی یک دی‌الکتریک غیرخطی قرار دارد و کل مجموعه بر روی یک بستر طلا قرار گرفته است. افزایش ضریب پذیرفتاری گرافن ( $10^{-1} \times 1/3$ ) می‌تواند به طور چشمگیری بهره توان تبدیلی هارمونیک سوم را افزایش دهد. زیرلایه فلزی نیز می‌تواند به عنوان الکتروود گیت عمل کند تا از

طریق ولتاژ بایاس اعمال شده، انرژی فرمی قابل تنظیم باشد [۷]. نکته قابل توجه در این مقاله بهره بالای ساختار (۲۶- دسی بل) است که ناشی از ضریب پذیرفتاری غیرخطی بسیار بزرگ در نظر گرفته شده برای گرافن بوده که  $4/7 \times 10^7$  برابر ضریب پذیرفتاری ساختار پیشنهادی ما است. افزایش ضریب غیر خطی مرتبه سوم حتی با مقادیر کمتر توان ورودی، افزایش بهره توان تبدیلی را در پی خواهد داشت.

شکل (۲) ساختار جالبی جهت تولید هارمونیک سوم ارائه کرده است. این ساختار شامل یک لایه گرافن بر روی دی‌الکتریک با ضریب دی‌الکتریک  $2/25$  بوده که روی زیرلایه‌ای از طلا قرار گرفته و بر روی گرافن استوانه‌هایی از طلا به صورت پرپودیک قرار دارند. نکته قابل توجه، استفاده از یک منبع میدان الکترومغناطیسی با فرکانس یک سوم فرکانس تشدید پلاسمون‌ها است؛ تا بتواند با استفاده از خاصیت غیرخطی گرافن فرکانس سه برابر فرکانس نور اعمالی تولید کرده و خود باعث افزایش تشدید و در نهایت افزایش هارمونیک سوم شود. ماکزیمم بهره توان تبدیلی هارمونیک سوم در این ساختار  $104/3$  - دسی بل است [۱۶]. در ساختار فوق توجه به این نکته حائز اهمیت است که به دلیل تلفات ساختار، به هر حال توان هارمونیک سوم تولید شده جهت تشدید بیشتر اثرات غیرخطی، از توان منبع اعمالی کمتر بوده و لذا ممکن است به عنوان یک منبع جهت ایجاد تشدید در ساختار از کارایی مناسبی برخوردار نباشد. همچنین استفاده از فلز نجیب طلا می‌تواند باعث تلفات در ساختار شود. نکته آخر اینکه طراحی هندسی چنین ساختارهایی مشکل است.



شکل (۱): ساختار تولید هارمونیک سوم توسط گرافن بستر توری [۹].



شکل (۲): (الف) ساختار تولید هارمونیک سوم، (ب) مقطع دوبعدی از ساختار [۱۶].

حامل‌ها بسیار کاهش خواهد یافت و لذا طول انتشار پلاریتون پلاسمون‌های سطحی به شدت کاهش یافته و تلفات افزایش می‌یابد که منجر به کاهش بهره توان هارمونیک سوم شده است. دوم، استفاده از فلزات نجیب در ساختارهای پلاسمونیک و در محدوده فرکانس تراهرتز و مادون قرمز باعث کاهش طول انتشار پلاریتون پلاسمون‌ها و افزایش تلفات می‌شود. در نهایت استفاده از منابع با شدت زیاد صرف نظر از مشکلات ساخت و تلفات زیاد آن‌ها، می‌تواند باعث افزایش توان هارمونیک سوم شود. جنبه‌های نوآوری در این مقاله در ادامه بیان می‌شود. همانگونه که در فوق نیز اشاره شد، استفاده از گرافن به صورت معلق می‌تواند تحرک حامل‌ها را به شدت افزایش داده و با افزایش رسانایی و کاهش تلفات، باعث افزایش توان هارمونیک سوم شود. مهمترین نوآوری در این مقاله، طراحی و شبیه‌سازی یک موجبر پلاسمونیک غیرخطی مبتنی بر یک لایه گرافن معلق جهت تولید و افزایش هارمونیک سوم است؛ که برای اولین بار پیشنهاد شده است. لذا با توجه به شناور بودن گرافن مقدار زمان آرامش حامل‌ها نسبت به سایر منابع بیشتر است. در نتیجه علاوه بر افزایش بهره توان تبدیلی سبب افزایش طول انتشار نیز می‌گردد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان‌دهنده بهبود قابل توجه بهره توان هارمونیک سوم نسبت به سایر مراجع است.

ادامه ساختار مقاله به صورت زیر است. در بخش دوم تئوری و مبنای فیزیکی ساختار پیشنهادی و هدایت خطی و غیرخطی گرافن مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین رابطه پراکندگی در یک ساختار مبتنی بر گرافن شناور به منظور بررسی حساسیت شدید نور به صورت تئوری مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش سوم یک موجبر پلاسمونیک مبتنی بر گرافن شناور جهت تولید و افزایش بهره توان هارمونیک سوم طراحی و با نرم‌افزار لومریکال شبیه‌سازی کرده‌ایم. نتایج شبیه‌سازی را با توجه به پارامترهای مختلف مورد بررسی قرار داده و در یک جدول با نتایج مراجع دیگر مقایسه کرده‌ایم. در نهایت در بخش چهارم نتیجه‌گیری مقاله ارائه شده است.

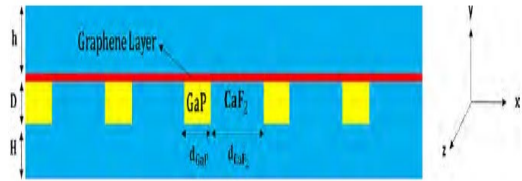
## ۲- تئوری و مبنای فیزیکی

در این بخش ساختار فیزیکی موجبر پلاسمونیک مبتنی بر گرافن معلق و مبنای نظری رسانایی سطحی در گرافن با توجه به پدیده پلاسمونیک ارائه شده و روش شبیه‌سازی و نرم‌افزار کاربردی به اختصار توضیح داده شده است.

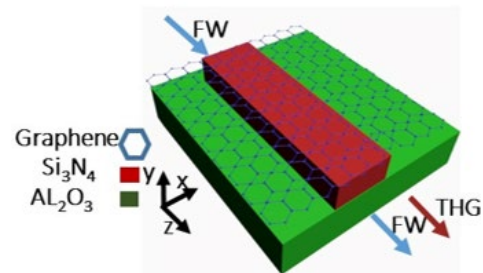
### ۲-۱- شماتیک سه‌بعدی موجبر پلاسمونیک مبتنی

#### بر گرافن معلق<sup>۱</sup> (SGPWG)

شماتیک سه‌بعدی (SGPWG) معلق پیشنهادی در شکل (۵-الف) نشان داده شده است. نمای مقطع سازه نیز در شکل (۵-ب) نشان داده



شکل (۳): تصویر شماتیک از فرا سطح پلاسمونیک بر اساس لایه گرافن قرار گرفته بر روی توری  $\text{CaF}_2$  که شیارهای آن با  $\text{GaP}$  پر شده است [۱۷].



شکل (۴): شماتیک موجبر پلاسمونیک مبتنی بر گرافن [۱۸].

ساختار نشان داده شده در شکل (۳) شامل لایه‌های گرافن قرار گرفته بر روی یک توری تصادفی است که از مدهای پلاسمونیک موضعی اندرسون پشتیبانی می‌کند. در اینجا، ابتدا تولید هارمونیک سوم را در یک متاسطح پلاسمونیک متشکل از سه لایه از گرافن که بر روی توری کلسیم فلوراید ( $\text{CaF}_2$ ) رسوب کرده و شیارهای آن با گالیم فسفید ( $\text{GaP}$ ) پر شده، مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه تأثیر تصادفی بودن تراشه‌های  $\text{CaF}_2$  بر THG را نشان داده که منجر به تولید مدهای موضعی اندرسون برای امواج SPP منتشر شده از طریق لایه گرافن می‌شود. در این تحقیق، تولید هارمونیک سوم در فرکانس‌های رزونانس مربوط به مدهای موضعی نسبت به ساختار تناوبی معمولی ۱۲۵ برابر قوی‌تر است. در اینجا افزایش بیشتر THG زمانی اتفاق می‌افتد که سه لایه از گرافن به جای توری دوره‌ای روی یک توری تصادفی قرار گیرد [۱۷]. نقطه قوت این تحقیق، بهره بالای این ساختار (۳۹/۰۳- دسی بل) است. اما شدت میدان اعمالی ۱۶ برابر ساختار پیشنهادی ما است. به تبع با افزایش توان ورودی می‌توان بهره توان هارمونیک تولیدی را افزایش داد. در شکل (۴) یک موجبر پلاسمونیک مبتنی بر گرافن جهت تولید هارمونیک سوم در محدوده طول موج مادون قرمز میانی ارائه شده است. در این ساختار از فرمول کوبو جهت رسانایی گرافن استفاده شده و تأثیر تغییر پارامترهای مهم ساختار بر روی توان هارمونیک سوم مورد بررسی قرار گرفته است. ماکزیمم بهره توان تبدیلی ۵۱/۰۶- دسی بل محاسبه شد. [۱۸]. مزیت ساختار فوق کار در ناحیه مادون قرمز میانی است. اما بهره توان تبدیلی آن از ساختار پیشنهادی ما کمتر است.

به طور کلی در ساختارهای فوق نکات زیر را باید مدنظر قرارداد. اول اینکه به دلیل قرار گرفتن گرافن بر روی زیر لایه، عملاً تحرک

<sup>۱</sup> Suspended graphene plasmonic waveguide



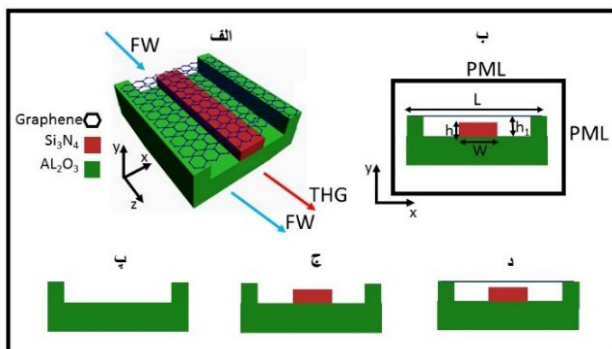


$$\tau = \mu_c \mu_e / ev_f^2 \quad (4)$$

که در آن  $v_f$  سرعت فرمی و برابر  $10^6$  متر بر ثانیه و  $\mu$  تحرک حامل‌های بار است. معمولاً تحرک حامل‌های بار در گرافن در حدود ۱ متر مربع بر ولت‌ثانیه در نظر گرفته می‌شود. در مطالعات اخیر برای ساختارهای پلاسمونیک مقدار  $\mu$  تا ۱۰ مترمربع بر ولت‌ثانیه نیز گزارش شده است [۲۰]. به نظر می‌رسد این مقدار از  $\mu$  برای یک لایه گرافن که بر روی یک بستر قرار گرفته است، یک فرض واقعی نیست. با این حال تحرک حامل‌ها به بزرگی ۱۲ متر مربع بر ولت‌ثانیه برای یک لایه گرافن شناور با کیفیت بالا گزارش شده است [۱۹]. در ساختار پلاسمونیک ارائه شده در این مقاله مقدار تحرک حامل‌ها برای گرافن شناور برابر ۶ مترمربع بر ولت‌ثانیه در نظر گرفته شده که بسیار کمتر از مقادیر گزارش شده است. در شبیه‌سازی ما، مقدار پتانسیل الکتروشیمیایی گرافن برابر  $0.35$  الکترون ولت می‌باشد، لذا مطابق (۴)، مقدار  $\tau$  برابر  $2/1$  پیکوثانیه به دست می‌آید. برای گرافن تک‌لایه، اگر فرکانس کاری کم باشد ( $\hbar\omega < 2\mu_{cg}$ ) سرعت انتقال الکترون‌های بین‌باندی در مقایسه با درون باند کوچک خواهد بود، در نتیجه رسانایی مرتبه سوم با  $1/\omega^3$  متناسب است، در حالیکه برای فرکانس‌های بالا ( $\hbar\omega > 2\mu_{cg}$ )، پدیده غالب انتقال بین‌باندی الکترون‌ها است و فرکانس رسانایی مرتبه سوم متناسب با  $1/\omega^4$  خواهد بود [۹]. فرکانس کاری ما در محدوده تراهرتز پایین است، جایی که انتقال درون باند غالب است.

در محدوده THz و با استفاده از گرافن با دوپ متوسط، فقط عبارت درون‌بند در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه رسانایی غیرخطی گرافن از مدل درود استفاده شده است که برابر است با [۲۰]:

$$\sigma_3(\omega) = i \frac{3}{32} \frac{e^2}{\pi \hbar^2} \frac{(ev_f)^2}{\mu_c \omega^3} (1 - i\alpha_t) \quad (5)$$



شکل (۵): (الف) نمای سه‌بعدی ساختار موجبر پلاسمونیک مبتنی بر گرافن شناور، (ب) نمای مقطع دو بعدی ساختار، (پ) الگوی بستر اکسید آلومینیوم واچ کردن قسمت وسط آن، (ج) قرار دادن لایه Si3N4 با استفاده از روش PECVD و اچ از طرفین، (د) انتقال گرافن بر روی لایه Si3N4.

شده است. همانطور که دیده می‌شود، یک برجستگی از  $Si_3N_4$  با عرض  $W$  و ارتفاع  $h$  در وسط سازه قرار دارد. ورق گرافن معلق توسط برجستگی‌های دی‌اکسید آلومینیوم ( $Al_2O_3$ ) کمی بالاتر از هسته (در وسط) نگه داشته می‌شود. مراحل ممکن از فرآیند ساخت برای SGPWG پیشنهادی به طور خلاصه در شکل‌های (۵-پ، ج و د) نشان داده شده است. ابتدا یک بستر آلومینیومی با استفاده از لیتوگرافی پرتو الکترونی و به دنبال آن اچ کردن یون واکنشی<sup>۱</sup> (RIE) الگوبرداری می‌شود [۱۹]. در نتیجه دو برآمدگی آلومینیومی در دو طرف سازه تشکیل می‌شود (شکل ۵-پ). در مرحله بعد، لایه  $Si_3N_4$  با ضخامت  $h_1$  و به روش رسوب بخار شیمیایی استاندارد افزایش یافته با پلازما<sup>۲</sup> (PECVD) رشد می‌کند. لایه  $Si_3N_4$  به گونه‌ای صیقل داده می‌شود که یک سطح صاف روی کل نمونه وجود دارد. با استفاده از فرآیند لیتوگرافی و به دنبال آن اچ کردن انتخابی  $Si_3N_4$  قسمت میانی لایه  $Si_3N_4$  نگه داشته می‌شود در حالی که کناره‌های  $Si_3N_4$  حذف می‌شود (شکل ۵-ج). در نهایت، گرافن که قبلاً روی مس رشد کرده با استفاده از روش انتقال مرطوب روی لایه  $Si_3N_4$  منتقل می‌شود [۲۰]. این مرحله همچنین می‌تواند با قرار دادن یک تک لایه گرافن لایه‌برداری شده مکانیکی در بالای نمونه انجام شود (شکل ۵-د) [۱۴].

## ۲-۲- هدایت نوری در گرافن

گرافن یکی از بهترین هادی‌های قابل کنترل است که تا به امروز کشف شده است. رسانایی الکتریکی بالای این ماده به دلیل پیکربندی باندهای انرژی آن است. نوارهای ظرفیت و رسانایی در گرافن مخروطی و روبه‌روی هم بوده و در نقاط دیراک بر یکدیگر مماس هستند. در واقع ناحیه بریلوئن به شکل شش‌ضلعی است که نقاط دیراک آن رؤس آن هستند [۱۲]. در سیستم‌های معمولی و واقعی، از مدل درود برای بیان رسانایی خطی گرافن استفاده می‌شود. ابتدا ضریب دی‌الکتریک مختلط برای گرافن را معرفی می‌کنیم که برابر است با [۱۲، ۲۷]:

$$\epsilon_g(\omega) = 1 + \frac{i\sigma(\omega)}{\omega\epsilon_0\Delta} \quad (1)$$

که در آن  $\Delta$  ضخامت یک‌لایه گرافن و برابر با  $0.34$  نانومتر،  $\sigma$  رسانایی مختلط،  $\omega$  فرکانس زاویه ای و  $\epsilon_0$  ثابت گذردهی خلا است. برای محاسبه سهم انتقال درون‌بند و بین‌بند در رسانایی مختلط گرافن، از فرمول معروف Kubo استفاده می‌کنیم [۱۲]:

$$\sigma_{intra}(\omega) = \frac{ie^2\mu_c}{\pi\hbar^2(\omega + i\tau^{-1})} \quad (2)$$

$$\sigma_{inter}(\omega) = \frac{ie^2}{4\pi\hbar} \ln \left( \frac{2|\mu_c| - \hbar(\omega + i\tau^{-1})}{2|\mu_c| + \hbar(\omega + i\tau^{-1})} \right) \quad (3)$$

که  $\mu_c$  پتانسیل الکتروشیمیایی گرافن و  $\tau$  زمان استراحت حامل‌ها بوده و برابر است با:

<sup>2</sup> Plasma-enhanced chemical vapor deposition

<sup>1</sup> Reactive ion etching

که در آن  $\omega$  و  $\omega'$  فرکانس‌های زاویه‌ای سیگنال‌های پروب و پمپ و  $E$  دامنه میدان الکتریکی سیگنال پمپ است. با قرار دادن (۱۰) در (۹) و با فرض اینکه  $k_0(N_{\text{eff}} + iK_{\text{eff}}) = q$  و پس از انجام ساده‌سازی‌ها (از آنجایی که  $d$  و  $K_{\text{eff}}$  بسیار کوچک هستند)، بخش‌های حقیقی و موهومی (۹) را می‌توان به صورت (۱۱) جدا کرد که در آن ثابت دی‌الکتریک زیرلایه به‌عنوان  $\epsilon_1$  در نظر گرفته می‌شود [۱۲]:

$$N_{\text{eff}} = \epsilon_0 \pi \hbar^2 \omega \frac{(P\omega - 2\pi \hbar^2 \tau^{-2} |\sigma_{NL}| |E|^2)}{(P^2 - 4\pi^2 \hbar^4 \tau^{-2} |\sigma_{NL}|^2 |E|^4)} \times \quad (12)$$

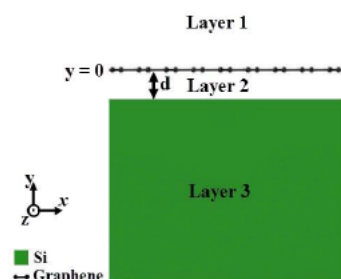
$$(\epsilon_{si} + 1) \frac{\tanh(k_0 N_{\text{eff}} d) + 1}{k_0 \epsilon_{si} \tanh(k_0 N_{\text{eff}} d) + k_0}$$

$$K_{\text{eff}} = \epsilon_0 \pi \hbar^2 \omega \tau^{-1} \frac{(P + 2\omega \pi \hbar^2 |\sigma_{NL}| |E|^2)}{(P^2 + 4\pi^2 \hbar^4 \tau^{-2} |\sigma_{NL}|^2 |E|^4)} (\epsilon_{si} + 1) \times \quad (12)$$

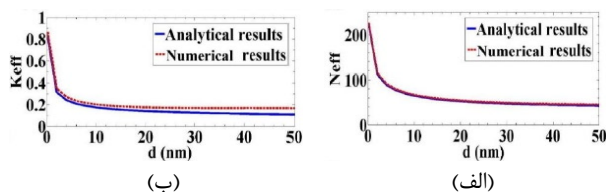
$$\frac{\tanh(k_0 N_{\text{eff}} d) + 1}{k_0 \epsilon_{si} \tanh(k_0 N_{\text{eff}} d) + k_0^2 \epsilon_{si} N_{\text{eff}} d + k_0 - \frac{k_0 \epsilon_{si} \tanh(k_0 N_{\text{eff}} d) + k_0}{\tanh(k_0 N_{\text{eff}} d) + 1}}$$

$$P = e^2 \mu_c - 2\pi \hbar^2 |\sigma_{NL}| |E|^2 \omega \quad (13)$$

بخش حقیقی و موهومی شاخص مؤثر در حالت غیرخطی به‌عنوان تابعی از  $d$  و در طول موج ۱۰ میکرومتر و پتانسیل شیمیایی ۰/۳۵ الکترون‌ولت محاسبه شده و به ترتیب در شکل‌های (۷-الف و ب) نشان داده شده است. دیده می‌شود که  $N_{\text{eff}}$  و  $K_{\text{eff}}$  با افزایش  $d$  کاهش می‌یابند. با توجه به (۱۱-۱۲)، می‌توان نتیجه گرفت که  $N_{\text{eff}}$  و  $K_{\text{eff}}$  با  $d$  رابطه معکوس دارند. هنگامی که  $d$  افزایش می‌یابد، برهم‌کنش بین GSP ها و بستر سیلیکونی کاهش می‌یابد و در نتیجه، GSP ها ثابت دی‌الکتریک مؤثر زیر لایه را تجربه می‌کنند. همچنین مقادیر بزرگ  $N_{\text{eff}}$  در شکل (۷-الف) محصور شدن بالای GSP ها را تایید می‌کند که باعث تحریک و انتشار پلاریتون پلاسمون‌های گرافن می‌شود [۱۲].



شکل (۶): ساختار مبتنی بر گرافن شناور [۱۲].



شکل (۷): محاسبه شاخص‌های مؤثر GSP های معلق در حالت

غیرخطی به‌ازای تغییر شکاف بین لایه گرافن معلق و بستر سیلیکون.

(الف) قسمت حقیقی و (ب) قسمت موهومی [۱۲].

در اینجا  $\alpha_t$  ضریب جذب دوفتون در گرافن بوده و برابر ۰/۱ در نظر گرفته می‌شود [۱۹]. به طور معمول، دما در شبیه‌سازی‌های ما ۳۰۰ درجه کلوین در نظر گرفته شده است. اثرات غیرخطی گرافن به دلیل برهم‌کنش میدان نوری با الکترون‌های لایه بیرونی اتم‌های کربن است؛ بنابراین باعث حرکت الکترون نسبت به هسته می‌شود. در واقع این پدیده به دلیل دوقطبی‌های لحظه‌ای (قطبی شدن) است. حال، اگر این جابه‌جایی بزرگ باشد، قطبش الکترون غیرخطی بوده و با بسط تیلور به‌صورت زیر بیان می‌شود [۲۱]:

$$p = \epsilon_0 \chi^{(1)} E + \epsilon_0 \chi^{(2)} E^2 + \epsilon_0 \chi^{(3)} E^3 + \dots \quad (6)$$

پلاریزاسیون غیرخطی مرتبه سوم به شرح زیر است [۲۱]:

$$p^{(3)}(t) = \epsilon_0 \chi^{(3)} E^3(t) \quad (7)$$

با اعمال میدان الکتریکی تک فرکانس  $E(t) = E \cos(\omega t)$  در (۷)، پلاریزاسیون غیرخطی مرتبه سوم به‌صورت زیر خواهد شد [۲۱]:

$$p^{(3)}(t) = \frac{1}{4} \chi^{(3)} E^3 \cos(3\omega t) + \frac{3}{4} \chi^{(3)} E^3 \cos(\omega t) \quad (8)$$

جمله اول در (۸)، میدانی با فرکانس  $3\omega$  را نشان می‌دهد که به دلیل اعمال میدان الکتریکی با فرکانس  $\omega$  به یک ماده غیرخطی ایجاد شده است که منجر به پیدایش هارمونیک سوم می‌شود. با اعمال نور شدید، میدان بسیار قوی در ساختارهای پلاسمونیک ایجاد می‌شود که می‌تواند اثرات غیرخطی THG را افزایش دهد.

اگرچه موجبرهای پلاسمونیک به طور کامل مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۲۲]؛ اما پلاسمونیک‌های غیرخطی موجبر بر اساس گرافن شناور کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. ساختار پیشنهادی یک موجبر پلاسمونیک غیرخطی مبتنی بر گرافن شناور است که با نرم‌افزار Lumerical در بخش ۳ شبیه‌سازی شده است. استفاده از گرافن به‌عنوان یک ماده غیرخطی جدید در موجبرهای پلاسمونیک، ماده امیدوارکننده‌ای در توسعه فناوری‌های پیشرفته است که سرعت‌های فوق‌العاده سریع و ابعاد بسیار کوچک را ارائه می‌کنند.

## ۳-۲- پراکندگی غیرخطی در ساختار گرافن معلق

شماتیک ساختار مبتنی بر گرافن معلق که در جهت‌های  $x$  و  $z$  ثابت است در شکل (۶) نشان داده شده است [۱۲]. ساختار شامل گرافن، فاصله هوایی، و زیر لایه است. با فرض انتشار در جهت  $z$ ، میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی مد TM در لایه‌های مختلف را می‌توان با استفاده از معادلات ماکسول محاسبه کرد. رابطه پراکندگی ساختار چندلایه به‌صورت زیر است [۱۲]:

$$\frac{-i \sigma q}{\omega \epsilon_0} = 1 + \frac{\tanh(qd) + \epsilon_{si}}{\epsilon_{si} \tanh(qd) + 1} \quad (9)$$

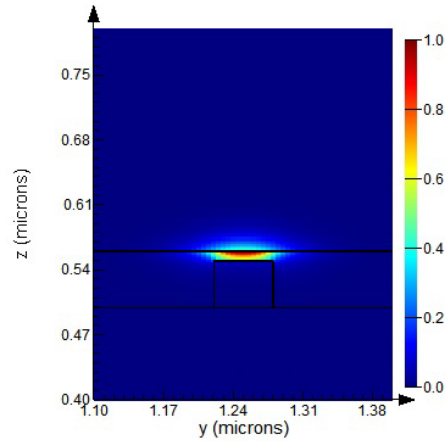
حال می‌خواهیم از عبارات بالا برای استخراج رابطه پراکندگی GSP های شناور در حالت غیرخطی استفاده کنیم. رسانایی کل گرافن را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد [۱۲]:

$$\sigma(\omega, \omega') = \sigma_{\text{intra}}(\omega) + 2\sigma_{NL}(\omega') |E|^2 \quad (10)$$

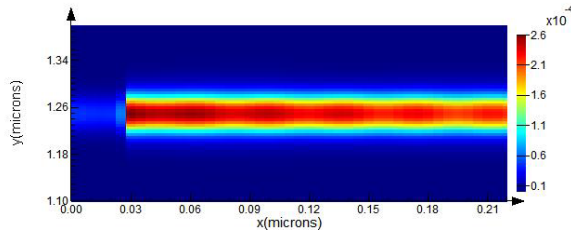
### ۳- طراحی موجبر پلاسمونیک مبتنی بر گرافن شناور برای تولید هارمونیک سوم

در این بخش، ساختار موجبر پلاسمونیک مبتنی بر گرافن معلق برای بهبود قابل توجه THG طراحی و با نرم افزار لومریکال شبیه سازی شده است. همچنین تأثیر تغییر پارامترهای مختلف بر روی بهره توان هارمونیک سوم مورد بررسی قرار گرفته است. ساختار پیشنهادی در شکل (۵) نشان داده شده است؛ بخش (الف) نمودار سه بعدی و قسمت (ب) یک مقطع دوبعدی از یک موجبر پلاسمونیک مبتنی بر گرافن شناور (SGPWG) برای تولید هارمونیک سوم در محدوده THz را نشان می دهد. ساختار پیشنهادی از زیر لایه های  $Al_2O_3$  تشکیل شده است و روی زیر لایه، لایه ای از دی الکتریک  $Si_3N_4$  قرار دارد. لازم به ذکر است که ضریب شکست  $Si_3N_4$  و  $Al_2O_3$ ، طبق فرمول پالیک برای محدوده فرکانس کاری  $37/7 - 38/7$  تراهرتز به صورت عددی بهینه شده است [۲۵]. در نهایت یک لایه گرافن بر روی دی الکتریک  $Si_3N_4$  قرار می گیرد. همان طور که مشاهده می شود یک فاصله ای بین هسته و گرافن در وسط ساختار وجود دارد. پارامترهای هندسی به صورت  $h=50nm$ ،  $h_1=60nm$ ،  $w=60nm$  در نظر گرفته شده است. جهت پیشگیری از تأثیر برجسته گی های کناری بر روی مد اصلی هسته، مقدار  $l=1.2\mu m$  در نظر گرفته شده است. شبیه سازی به صورت سه بعدی با تکنیک FDTD انجام شده است. در این ساختار، ضریب شکست خطی (طبق فرمول Kubo) و ضریب غیر خطی مرتبه سوم (حساسیت) گرافن برابر  $\chi^{(3)} = 3 \times 10^{-18} m^2 V^{-2}$  اعمال می شود [۱۸ و ۲۶]؛ جایی که ما هارمونیک سوم را در پتانسیل الکتروشیمیایی گرافن  $\mu_{eg} = 0.35eV$  محاسبه می کنیم. یک منبع مد نوری در جهت  $x$  به سازه اعمال شده و ابعاد سازه برای حداکثر توان THG تنظیم می گردد. بنابراین پروفیل مد میدان الکتریکی به دست آمده و در شکل (۸) نشان داده شده است.

در این مقاله، پتانسیل الکتروشیمیایی گرافن  $\mu_{eg} = 0.35eV$  و شدت نور اعمال شده برابر با  $I = 0.1 MW/cm^2$ ، بازای فرکانس ورودی  $f_{in} = 37.7 THz$  در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی خواص انتقال و بازتاب سازه، از یک لایه تطبیق کامل (PML) به عنوان لایه مرزی در جهت  $z$  استفاده شده است. با اعمال نور فرودی، پلاسمون ها (مطابق شکل (۹) و بحثی که در قسمت ۲-۲ انجام شد) تحریک شده و در طول موجبر منتشر می شوند. تولید هارمونیک سوم در گرافن عمدتاً تحت تأثیر سه عامل قرار می گیرد. باتوجه به (۵)، پتانسیل الکتروشیمیایی کمتر گرافن باعث رسانایی غیر خطی مرتبه سوم قوی تر گرافن می شود. لذا پاسخ غیر خطی قوی تری برای گرافن با سطوح فرمی پایین تر انتظار می رود، و عمدتاً به این دلیل است که برای عملکرد در ناحیه ی غیر خطی، کل انرژی به دست آمده توسط الکترون ها در گرافن تحت اعمال نور با شدت بالا باید در مقایسه با میانگین انرژی فرمی آنها به اندازه کافی بزرگ باشد. عامل بعدی در تولید هارمونیک سوم قوی، شدت میدان الکترومغناطیسی اعمال شده ( $I_{FW}$ ) است.



شکل (۸): پروفایل مد میدان موجبر پلاسمونیک گرافن شناور



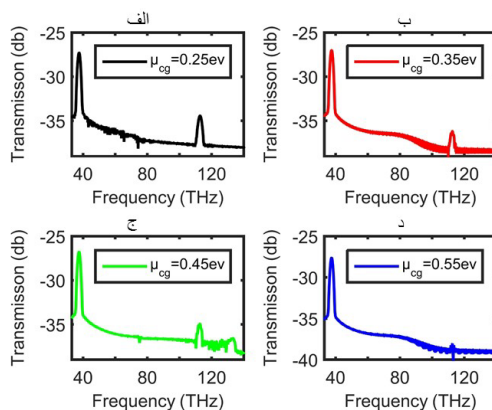
شکل (۹): تحریک پلاسمونها و انتشار آنها بر روی سطح گرافن در موجبر پلاسمونیک مبتنی بر گرافن شناور

### ۴-۲- مبنای شبیه سازی

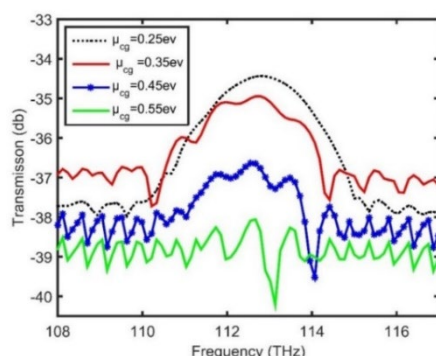
جهت طراحی ادوات نوری و افزاره های نانوفتونیک مانند سوئیچ های پلاسمونیک، موجبرهای پلاسمونیک، گیت های منطقی، تشدیدگرها و... در اندازه های نانومتر و بررسی توزیع مد و رفتار پلاسمونیک، حل عددی معادلات ماکسول ضروری است. به طور معمول، از روش دامنه زمانی تفاضل محدود، FDTD، برای تجزیه و تحلیل امواج الکترومغناطیسی در ساختارهای پلاسمونیک پیچیده استفاده می شود [۲۳]. تحلیل مودال و انتقال و انعکاس موجبرها به روش عددی در حوزه فرکانس و زمان در این کار انجام شده است. در روش عددی، ساختار پیشنهادی مورد نظر به یک شبکه مربع تقسیم شده و برای پارامترهای محیط، تقریب پله ای در نظر گرفته می شود [۲۳]. همچنین میدان های الکترومغناطیسی گسسته شده و معادلات ماکسول با تقریب محافظه کارانه آنها جایگزین شده و میدان های الکترومغناطیسی در طول زمان محاسبه می شوند [۲۴]. این روش به صورت شرطی پایدار است و به طور کلی مشکل همگرایی ندارد. نرم افزار Lumerical، این روش را به خوبی پشتیبانی می کند. در این مقاله از نرم افزار Lumerical برای شبیه سازی استفاده شده است. نکته مهم در شبیه سازی استفاده از مش بندی مناسب است، به این معنی که ابعاد مشبک سازی کوچک تر باعث شبیه سازی دقیق تر و در عین حال باعث افزایش زمان شبیه سازی شده و نیاز به حافظه بیشتری دارد. کاهش اندازه مش به خصوص در شبیه سازی سه بعدی، زمان شبیه سازی را به شدت افزایش می دهد. شبیه سازی ما به صورت سه بعدی با مش بندی مناسب انجام شده است.

در واقع، اثرات غیرخطی در شدت نور اعمال شده زیاد فعال می‌شوند، از آنجایی که اثرات غیرخطی نتیجه برهم‌کنش فوتون با فوتون است، ذاتاً ضعیف هستند بنابراین شدت نور بالاتر، اثر غیرخطی را افزایش می‌دهد و به نوبه خود THG بالاتری را تحریک می‌کند. سومین عامل مؤثر در THG فرکانس نور اعمال شده ( $f_{FW}$ ) است. طبق (۵)، در فرکانس بالاتر میدان اعمال شده، رسانایی مرتبه سوم پایین‌تری در گرافن مشاهده می‌شود، در نتیجه THG کاهش می‌یابد. ما این سه عامل را با شبیه‌سازی ساختار شکل (۵) در محیط FDTD بررسی کرده‌ایم. شکل (۱۰) طیف‌های انتقال را به ازای مقادیر مختلف پتانسیل الکتروشیمیایی گرافن نشان می‌دهد. نمودارهای هارمونیک سوم و فرکانس اصلی را می‌توان به وضوح مشاهده کرد. جهت بهتر دیده شدن تغییرات طیف توان هارمونیک سوم، در شکل (۱۱) طیف توان هارمونیک سوم به ازای مقادیر مختلف پتانسیل الکتروشیمیایی جهت مقایسه آورده شده است. همانگونه که انتظار می‌رفت، مطابق (۵) مشاهده می‌شود که با افزایش پتانسیل الکتروشیمیایی گرافن ( $\mu_{cg}$ ) و کاهش رسانایی آن، توان خروجی THG کاهش می‌یابد. بنابراین با تنظیم پتانسیل الکتروشیمیایی گرافن می‌توان قدرت THG را کنترل کرد. در مرحله بعد با تغییر فرکانس نور ورودی و با شبیه‌سازی سه‌بعدی، THG مربوطه را به دست آورده‌ایم. شبیه‌سازی‌ها برای فرکانس‌های  $35.5$  و  $36.5$  و  $37.5$  و  $38.5$  THz انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی در شکل (۱۲) آورده شده است. در اینجا نیز انتظار ما بر آورده‌شد. مطابق (۵) دیده می‌شود با افزایش فرکانس ورودی، توان هارمونیک سوم کاهش می‌یابد. در مرحله آخر تغییرات توان هارمونیک سوم را به‌ازای تغییر توان ورودی بررسی می‌کنیم. شکل (۱۳)، THG را برای تغییر توان ورودی نشان می‌دهد. با تغییر توان ورودی، THG نیز متناسب با آن تغییر می‌کند.

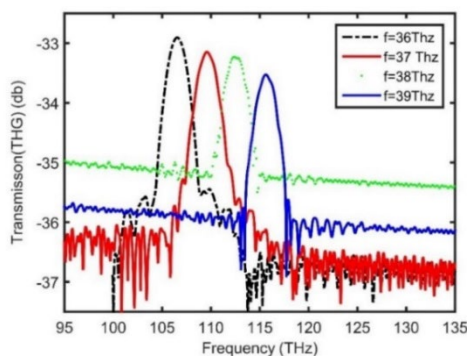
برای درک بهتر توان هارمونیک سوم تولید شده، از مفهوم راندمان توان تبدیلی (CE) استفاده می‌کنیم که به‌صورت  $CE = 10 \log(p_{out_{TH}}/p_{in_{FW}})$  تعریف شده است [۹]؛ که در آن  $p_{out_{TH}}$  توان هارمونیک سوم در فرکانس  $3\omega$  توان ورودی در فرکانس  $\omega$  است. شکل (۱۴-الف) بهره توان تبدیلی را به ازای تغییرات پتانسیل الکتروشیمیایی گرافن، شکل (۱۴-ب) بهره توان تبدیلی را به ازای تغییرات فرکانس ورودی و شکل (۱۴-ج) تغییرات بهره توان را نسبت به توان ورودی نشان می‌دهد. ماکزیمم بهره توان تبدیلی محاسبه شده در این ساختار به ازای پارامترهای مهم شدت میدان ورودی ۱ مگاوات بر سانتی‌متر مربع، زمان آرامش حامل‌ها ۳ پیکوثانیه و ضریب غیر خطی مرتبه سوم  $3 \times 10^{-18}$  مترمربع بر مربع ولت، برابر  $48/08$  دسی‌بل به‌دست آمده است. بررسی اثر زمان استراحت حامل‌ها  $\tau$  بر توان خروجی نتایج جالبی را نشان می‌دهد. مطابق (۲) با افزایش  $\tau$ ، رسانایی گرافن نیز افزایش می‌یابد و باعث کاهش تلفات می‌شود و در نهایت توان خروجی را افزایش می‌دهد. همچنین، اگر  $\tau$  کمتر از حد ( $0.1$  پیکوثانیه) باشد، تلفات گرافن قلیل‌توجه خواهد بود و عملیات



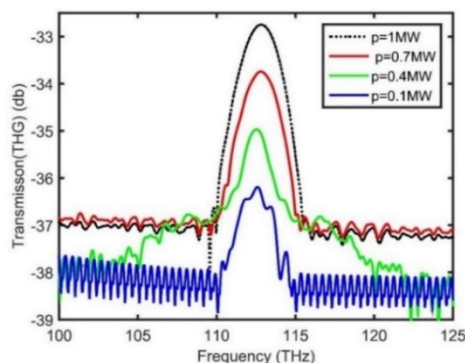
شکل (۱۰): طیف انتقال در SGPWG بر حسب پتانسیل الکتروشیمیایی: (الف)  $\mu_{cg}=0.25\text{eV}$  (ب)  $\mu_{cg}=0.35\text{eV}$  (ج)  $\mu_{cg}=0.45\text{eV}$  (د)  $\mu_{cg}=0.55\text{eV}$



شکل (۱۱): طیف توان های انتقال در SGPWG به ازای مقادیر مختلف پتانسیل الکتروشیمیایی گرافن.



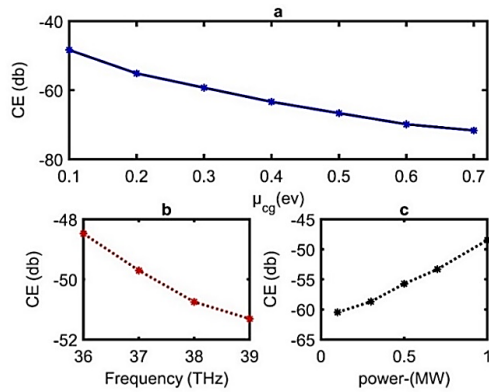
شکل (۱۲): طیف انتقال هارمونیک سوم به ازای مقادیر مختلف فرکانس ورودی.



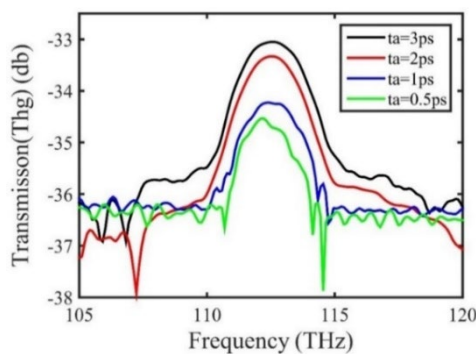
شکل (۱۳): طیف توان های انتقال به ازای مقادیر مختلف توان ورودی.







شکل (۱۴): بهره توان تبدیل (CE): (الف) بر حسب پتانسیل الکتروشیمیایی گرافن  $\mu_{cg}$ ، (ب) بر حسب فرکانس ورودی  $f_{FW}$  و (ج) بر حسب توان ورودی  $P_{FW}$ .



شکل (۱۵): طیف THG بر حسب زمان آرامش حامل  $\tau = 0.5, 1, 2, 3ps$

جدول (۱): مقایسه حداکثر بازده تبدیل (MCE)

منبع	سال	$I$ ( $MW/cm^2$ )	$\mu_{cg}$ ( $eV$ )	$\tau$ ( $ps$ )	$\chi^{(3)}$ ( $m^2V^{-2}$ )	MCE (db)
[۹]	۲۰۱۶	۰/۱	۰/۴	۳	$11/4 \times 10^{-14}$	-۱۳۵
[۷]	۲۰۱۷	۰/۳	۰/۳	۰/۵	$1/3 \times 10^{-10}$	-۲۶
[۱]	۲۰۱۸	۰/۱۹	۰/۶۵	۰/۵	نامشخص	-۶۴/۳۴
[۱۶]	۲۰۲۰	۲/۳	۰/۳	۱۰	نامشخص	-۱۰۴/۳
[۱۷]	۲۰۲۳	۱۶	۰/۵۵	نامشخص	نامشخص	-۳۹/۰۳
این مقاله	۲۰۲۴	۱	۰/۳۵	۰/۵	$3 \times 10^{-18}$	-۴۸/۰۸

## مراجع

- [1] J. Li, T. Zhang, L. Chen, " High-Efficiency Plasmonic Third-Harmonic Generation with Graphene on a Silicon Diffractive Grating in Mid-infrared Region", Nano Express, vol. 13, no. 338, 25 October 2018, (doi:10.1186/s11671-018-2750-8).
- [2] Z. Wang, V. Kalathingal, Y. Wei Ho, T X. Hoang, H. Chu, Y. Guo, J C. Viana-Gomes, G. Eda, C. A. Nijhuis, "Phase Matching via Plasmonic Modal Dispersion for Third Harmonic Generation", Advanced Science published by Wiley-VCH GmbH, Volume 9, no 21, 25 July 2022, (doi: 10.1002/advs.202201180).

غیرخطی احتمالاً به منابع با شدت بسیار زیاد و احتمالاً غیرقابل دسترس نیاز خواهد داشت. در این مقاله با شبیه‌سازی موجبر پلاسمونیک مبتنی بر گرافن شناور، اثر تغییر  $\tau$  را در شکل (۱۵) بررسی کرده‌ایم. همان‌طور که انتظار داشتیم با افزایش زمان آرامش حامل‌ها، توان خروجی افزایش می‌یابد.

در نهایت، با مقایسه بهره THG سازه پیشنهادی با مقالات اخیر، می‌توان کارایی سازه را بهتر تجسم کرد. این موضوع در جدول (۱) قابل مشاهده است. نتایج نشان‌دهنده کارایی بالای ساختار پیشنهادی نسبت به سایر منابع است. لازم به ذکر است که برای هر مرجع حداکثر توان به دست آمده درج شده است. با توجه به اینکه نتایج این مقالات مطابق با پارامترهای مختلف موجود در آن‌ها است، لذا در این جدول مرتبط‌ترین پارامترها که شامل ضریب شکست غیرخطی مرتبه سوم، شدت نور ورودی، پتانسیل الکتروشیمیایی گرافن و زمان استراحت حامل‌ها می‌باشد، آورده شده است. هرچند به نظر می‌رسد بهترین گزینه برای مقایسه ماکزیمم بهره توان تبدیلی<sup>۱</sup> (نسبت ماکزیمم توان خروجی هارمونیک سوم به توان ورودی) در مراجع مختلف است. نکته قابل توجه در جدول فوق، بهره بالای [۱۷، ۷] است. در [۱۷]، به نظر می‌رسد بهره تبدیلی بالا به دلیل شدت بالای نور ورودی (۱۶ مگاوات بر سانتی متر مربع) است که ۱۶ برابر شدت نور در این مقاله است. طبیعی است که به ازای شدت میدان اعمالی بیشتر، توان هارمونیک سوم تولیدی افزایش یافته و در نهایت، بهره توان تبدیلی نیز زیاد خواهد شد. در [۷]، نکته قابل توجه اعمال ضریب غیرخطی بزرگ  $10 \times 10^7$  است که  $4/7 \times 10^7$  برابر ضریب غیر خطی این مقاله است. این نکته حائز اهمیت است که به ازای ضریب غیرخطی بیشتر، حتی با شدت نور کمتر نیز می‌توان بهره توان تبدیلی را افزایش داد.

## ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک موجبر پلاسمونیک مبتنی بر گرافن شناور جهت تولید هارمونیک سوم در محدوده تراهرتز پیشنهاد شده که عملکرد آن بر اساس خواص غیرخطی مرتبه سوم گرافن است. در این مقاله بهره توان تبدیلی در حدود  $48/08$  دسی‌بل محاسبه شد که در مقایسه با سایر منابع افزایش داشته است. مشاهده گردید که برای پتانسیل الکتروشیمیایی مختلف گرافن، توان خروجی THG تغییر می‌کند، بالاترین مقدار توان خروجی در فرکانس ورودی  $37/7$  تراهرتز و در پتانسیل الکتروشیمیایی گرافن  $0/35$  الکترون‌ولت به دست آمد. اثرات تغییر فرکانس ورودی و توان ورودی نیز در نظر گرفته شد، در واقع، افزایش/کاهش توان ورودی باعث افزایش/کاهش توان خروجی می‌شود. از طرف دیگر، توان خروجی THG با فرکانس ورودی نسبت عکس دارد و با افزایش فرکانس ورودی، توان خروجی کاهش می‌یابد.

<sup>1</sup> Maximum conversion efficiency (MCE)

- plasmonic Anderson localized states", *Optics & Laser Technology*, Vol. 161, June 2023, 109123, (doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109123).
- [18] M.J. Rahimzadeh, R.Ghayour, M.Mohitpour, "Enhancing third harmonic generation using a mid-infrared graphene plasmonic waveguide", *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 55, September 2023, (doi.org/10.1007/s11082-023-05256-z).
- [19] Z. Qi, Z. Zhu, W. Xu, J. Zhang, C. Guo, K. Liu, X. Yuan, S. Qin, "Electrically tuneable directional coupling and switching based on multimode interference effect in dielectric loaded graphene plasmon waveguides", *Journal of Optics*, Vol. 18, no. 6 18, 2016, (doi.10.1088/2040-8978/18/6/065003).
- [20] J. Cardenas, C.B. Poitras, J.T. Robinson, K. Preston, L. Chen, M. Lipson, "Low loss etchless silicon photonic waveguides", *Opt. Express*, Vol. 17, no. 6, pp. 4752-4757, 2009, (doi. 10.1364/oe.17.004752).
- [21] R. W. Boyd, "Nonlinear Optics", Third Edition, 28 March, 2008, Elsevier.
- [22] W. Xu, Z. H. Zhu, K. Liu, J. F. Zhang, X. D. Yuan, Q. S. Lu, and S. Q. Qin, "Dielectric loaded graphene plasmon waveguide", *Optics Express*, Vol. 23, no. 4, pp. 5147-5153, 2015, (doi.10.1364/OE.23.005147).
- [23] U. S. Inan, R. A. Marshall, "Numerical Electromagnetics", Cambridge University Press, June 2012, (doi.10.1017/CBO9780511921353).
- [24] S. D. Gedney, "Introduction to the Finite-Difference Time – Domain (FDTD) method for electromagnetic" , Morgan & Claypool, 2011.
- [25] <https://refractiveindex.info>, Kischkat et al. 2012.
- [26] C. JL, Ve.N, S. JE. "Third order optical nonlinearity of graphene", *New Journal of Physics*, Volume. 16, May 2014, (doi.10.1088/1367-2630/16/5/053014).
- [27] M. Katebi Jahromi, R. Ghayour, Z. Adelpour, 2021, , "Modeling electric field increment in the Tip-Enhanced Raman Spectroscopy by using grating on the probe of atomic force nanoscope", *Optical and Quantum Electronics*, vol. 53, Pages.1-19.
- [3] C H. Costa, LFC. Pereira, G. Bezerra, "Light propagation in quasiperiodic dielectric multilayers separated by graphene", *Phys. Rev*, Vol. 96, pp. 12–15 September 2017, (doi.org/10.1103/PhysRevB.96.125412).
- [4] A. H. Castro Neto, F. Guinea, N. M. R. Peres, K. S. Novoselov, A. K. Geim, "The electronic properties of graphene", *Rev. Mod. Phys*, Vol. 81, no. 1, pp. 109–162, January - March 2009, (doi:10.1103/RevModPhys.81.109).
- [5] C. Beckerleg, J. C.Thomas, I. Zeimpekis, M. H.Samuel,C. Chris, W.H. Daniel, E. Hendry, "Cavity enhanced third harmonic generation in graphene", *Applied Physics Letters*, Vol. 112, no. 1, pp. 11102-11106, January 2018, (<https://doi.org/10.1038/s41565-018-0145-8>).
- [6] W. Yindi, L. Hongxia , W. Shulong , C. Ming , Z. Haifeng , Q. Yanbin "Electrical Phase Control Based on Graphene Surface Plasmon Polaritons in Mid-infrared", *Nanomaterials*, Vol. 10, March 2020, (doi:10.3390/nano10030576).
- [7] B. Jin1, T. Guo, C. Argyropoulos, "Enhanced third harmonic generation with graphene metasurfaces", *Journal of Optics*, Vol. 19, no. 919, pp. 345-349, 2017, (doi.org/10.1088/2040-8986/aa8280).
- [8] N. A. Savostianova, S. A. Mikhailov, "Third harmonic generation from graphene lying on different substrates: optical-phonon resonances and terference effects", *Optics Express*, VOL. 25, PP. 3268-3285, 2017, (doi.org/10.1364/OE.25.003268).
- [9] H. Nasari, M. S. Abrishamian, "Electrically tunable, plasmon resonance enhanced,terahertz third harmonic generation via graphene", *RSC Adv*,VOL. 6, PP. 50190-50200. 2016, (doi: 10.1039/c6ra08086c).
- [10] J. Wu, S. Guo, Z. Li, X. Li, H. Xue, Z. Wang, "Graphene Hybrid Surface Plasmon Waveguide with Low Loss Transmission", *Plasmonics*, March 2021, (doi.org/10.1007/s11468-020-01181-z).
- [11] A.N. Grigorenko, M. Polini, K.S. Novoselov, "Graphene plasmonics", *Nature Photonics*, vol. 6, PP. 749–758, 2012, (doi:10.1038/NPHOTON.2012.262).
- [12] ] S. Bahadori-Haghighi, R. Ghayour, M. H. Sheikhi, "Design and analysis of low loss plasmonic waveguide and directional coupler based on pattern-free suspended graphene sheets", *Carbon*, Vol. 129,no. 129, pp. 653-660, 2018, (doi.org/10.1016/j.carbon.2017.12.066).
- [13] K.I. Bolotin, K.J. Sikes, J. Hone, H.L. Stormer, P. Kim, "Temperature-dependent transport in suspended graphene", *Phys. Rev. Lett.* 101, (2008) 096802, (doi.org/10.1103/PhysRevLett.101.096802).
- [14] K.I. Bolotin, K.J. Sikes, Z. Jiang, M. Klima, G. Fudenberg, J. Hone, P. Kim, H.L. Stormer, "Ultrahigh electron mobility in suspended graphene, *Solid State Commun*", VoL. 146, PP. 9–10, Pages 351-355146, 2008, (doi:10.1016/j.ssc.2008.02.024).
- [15] K.I. Bolotin, K.J. Sikes, Z. Jiang, M. Klima, G. Fudenberg, J. Hone, P. Kim, H.L. Stormer, "Ultrahigh electron mobility in suspended graphene, *Solid State Commun*", VoL. 146, PP. 9–10, Pages 351-355146, 2008, (doi:10.1016/j.ssc.2008.02.024).
- [16] Y. LIU, S. ZHU, Q. ZHOU, Y. CAO, Y. FU, L. GAO, H. CHEN, Y. XU, "Enhanced third-harmonic generation induced by nonlinear field resonances in plasmonic-graphene metasurfaces", *Optics Express*, Vol. 28, No. 9, 27 April 2020, (doi.org/10.1364/OE.391294).
- [17] M.Sedaghat Nejad, M.Ghasempour Ardakani, "Significant enhancement of third harmonic generation in graphene layers placed on a random grating supporting

## COPYRIGHTS

©2024 by the authors. Published by the Islamic Azad University Shiraz Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

