

دست یابی به ناحیه عملیاتی تکمد در یک موجبر نانو نوار گرافینی

مرتضی حاجتی^۱، یاسر حاجتی^۲

^۱آموزش و پرورش استان خوزستان

^۲گروه فیزیک، دانشگاه شهید چمران اهواز

چکیده - ناحیه عملیاتی تکمد به علت دارا بودن محصور شدنگی بالا و تلفات انتشاری اندک در اکثر کاربردهای عملی مورد نیاز می‌باشد. در این مقاله وابستگی ناحیه عملیاتی تکمد به پارامترهای عرض موجبر و فرکانس در یک موجبر نانو نوار گرافینی با استفاده از روش المان محدود بررسی شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های صورت گرفته نشان می‌دهند که ناحیه عملیاتی تکمد در موجبر نانو نوار گرافینی در طول موج‌های فروسرخ میانی به شدت به عرض موجبر و فرکانس حساس می‌باشد به‌گونه‌ای که با کاهش عرض و یا کاهش فرکانس، می‌توان ساختار موجبر را در شرایط عملیاتی تکمد قرار داد.

کلید واژه- روش المان محدود، طول انتشار، موجبر، ناحیه عملیاتی تکمد، نانو نوار گرافین.

Investigation of Single-mode Operation in Graphene Nanoribbon Waveguide

Morteza Hajati¹, Yaser Hajati²

¹Department of Education, Khoozestan, Iran

²Department of Physics, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Abstract- Single-mode operation (SMO) is favorable in most practical applications because of its high mode confinement and low transmission loss. In this paper, we study the dependence of SMO region on the width and operation frequency of a graphene nano-ribbon waveguide (GNRW) using finite-element method. Numerical results show that SMO in GNRW strongly depends on the overall width and operation frequency and SMO can be realized by decreasing the overall width or operation frequency.

Keywords: Finite-element method, Propagation length, Waveguide, Single-mode operation, Graphene nanoribbon.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

۲- روش محاسباتی

برای شبیه‌سازی گرافین به روش المان محدود، گرافین به عنوان یک لایه بسیار نازک با ضخامت نانومتری و با رسانندگی نوری $\sigma_{\text{N}} = \sigma_{\text{intra}} + \sigma_{\text{inter}}$ در نظر گرفته شده که σ_{intra} و σ_{inter} به ترتیب گذارهای بین باندی و درون باندی بوده که از طریق فرمول کوبو قابل محاسبه می‌باشند [۷]. رسانندگی نوری گرافین به پارامترهای فرکانس زاویه‌ای (ω)، پتانسیل شیمیایی (μ)، زمان واهلش حاملهای بار (τ) و دما (T) وابسته می‌باشد. گذردهی نسبی گرافین را می‌توان با استفاده از رابطه $\Delta/\epsilon_0\omega\Delta = 1 + j\sigma_{\text{intra}}/\epsilon_0\omega\Delta$ محاسبه کرد [۸]. در این رابطه Δ و σ_{intra} به ترتیب ضخامت موثر گرافین و گذردهی فضای آزاد می‌باشند.

۳- نتایج و بحث

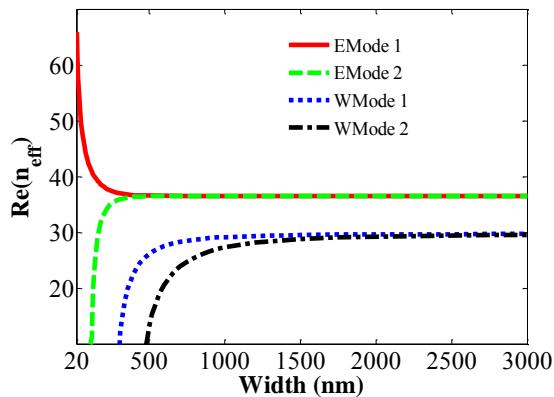
به منظور محاسبه رسانندگی نسبی گرافین در محاسبات مقادیر $V = 0.3 \text{ eV}$ ، $\mu = 0.3 \text{ ps}$ ، $\tau = 0.5$ و $T = 300 \text{ K}$ در نظر گرفته شده‌اند. همچنین ضخامت گرافین تک‌لایه $\Delta = 0.5 \text{ nm}$ در نظر گرفته شده است. وابستگی مولفه حقیقی و موهومی بهنجار شده رسانندگی نسبی گرافین به فرکانس در شکل ۱ نشان داده شده است. در این شکل می‌توان مشاهده کرد که با تغییر فرکانس، مولفه موهومی رسانندگی نسبی گرافین دارای هر دو مقدار مثبت و منفی می‌باشد. وقتی مولفه موهومی رسانندگی گرافین مثبت (منفی) باشد، گرافین مانند یک فلز (دی‌الکتریک) رفتار کرده و امواج پلاسمون پلاریتون سطحی (SPP) با قطبش TM را هدایت می‌کند (نمی‌کند). با توجه به پارامترهای انتخاب شده برای رسانندگی گرافین مشاهده می‌شود که با انتخاب فرکانس‌های کوچکتر از ۱۲۳ تراهرتز (که مولفه موهومی رسانندگی مثبت است)، گرافین می‌تواند امواج SPP با قطبش TM را هدایت کند.

در این قسمت وابستگی خصوصیات مهم پلاسمونیکی ساختار نانو نوار گرافینی شامل ضریب شکست موثر ($n_{\text{eff}} = \text{Re}(\beta)/k_0$) و طول انتشار پلاسمون‌های سطحی ($L_m = 1/\text{Im}(\beta)$) به عرض موج بر بررسی می‌گردد. در این روابط β و k_0 به ترتیب شماره موج در موج بر و فضای آزاد می‌باشند. در شکل ۲ ضریب شکست موثر پلاسمون‌های سطحی نانو نوار گرافینی بر حسب عرض موج بر برای مدهای

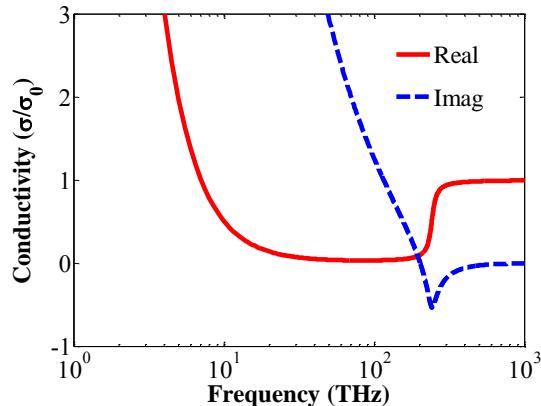
۱- مقدمه

علم پلاسمونیک که ترکیبی از اپتیک و نانوالکترونیک می‌باشد در سال‌های اخیر به شدت مورد توجه محققان قرار گرفته است [۱]. این علم اندرکنش بین میدان‌های الکتروموغنطیسی و الکترون‌های رسانش فلزات با ابعاد نانو را مورد بررسی قرار می‌دهد. در علم پلاسمونیک برخلاف اپتیک از فلزاتی مانند طلا و نقره استفاده می‌شود. تلفات اهمی زیاد در فرکانس‌های اپتیکی، عدم تنظیم‌پذیری پس از ساخت و همچنین مشکلات موجود در فرآیند ساخت فیلم‌های بسیار نازک از بزرگ‌ترین معایبی هستند که استفاده از فلزات را در افزارهای پلاسمونیکی جدید محدود ساخته است. در بین مواد پلاسمونیکی جدید، گرافین یکی از بهترین جایگزین‌ها برای این فلزات می‌باشد. گرافین با داشتن خصوصیاتی مانند تلفات بسیار کم، قابلیت تنظیم‌پذیری و محصورشدنگی بسیار بالای مدهای نوری، به بستری مناسب برای موج‌برهای پلاسمونیکی در فرکانس‌های فروسرخ میانی و تراهرتز تبدیل شده است [۲-۴]. در این رابطه، نشان داده شده است که میکرو [۵] و نانو [۶] نوارهای گرافینی قادرند علاوه‌بر انتشار مدهای نوری معمول از نوع موج‌بُری، مدهای شدیداً جایگزیده شده‌ای که در لبه ساختار منتشر می‌شوند را نیز منتشر کنند. ناحیه عملیاتی تکمد به علت دارا بودن خصوصیاتی مانند محصورشدنگی بالا، تلفات انتشاری اندک و کیفیت بالای پرتو الکترونی در اکثر کاربردهای عملی مورد نیاز می‌باشد. از آنجاکه گرافین پس از ساخت بر روی زیرلایه قرار داده می‌شود و در ناحیه عملیاتی تکمد مورد مورد استفاده قرار می‌گیرد، لذا مطالعه و بررسی چگونگی رسیدن به ناحیه عملیاتی تکمد در یک موج‌بر نانو نوار گرافینی می‌تواند از نظر کاربردی بسیار مفید باشد.

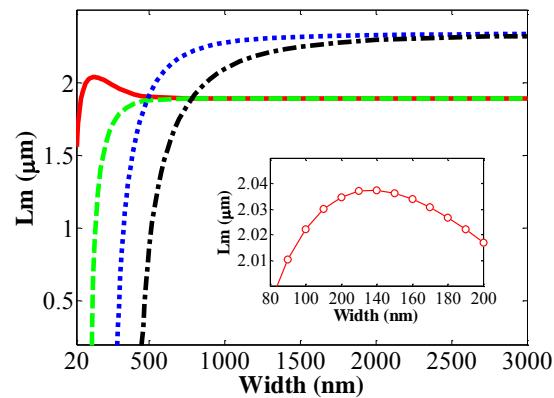
در این مقاله وابستگی ناحیه عملیاتی تکمد به پارامترهای عرض موج‌بر و فرکانس در یک نانو نوار گرافینی بررسی شده است. برای این منظور پارامترهای مهم پلاسمونیکی ساختار نانو نوار گرافینی از جمله رسانندگی نسبی گرافین، ضریب شکست موثر و طول انتشار در طول موج‌های فروسرخ میانی مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۲: ضریب شکست موثر پلاسمون‌های سطحی در نانو نوار گرافینی بر حسب تغییرات عرض موجبر در فرکانس ۳۰ تراهرتز برای مدهای لبه‌ای و موجبری.



شکل ۱: مولفه حقیقی و موهومی بهنجار شده رسانندگی نسبی گرافین بر حسب تغییرات فرکانس. ضریب بهنجارش رسانندگی $\sigma_0 = 60.8 \mu\text{S}$ است.



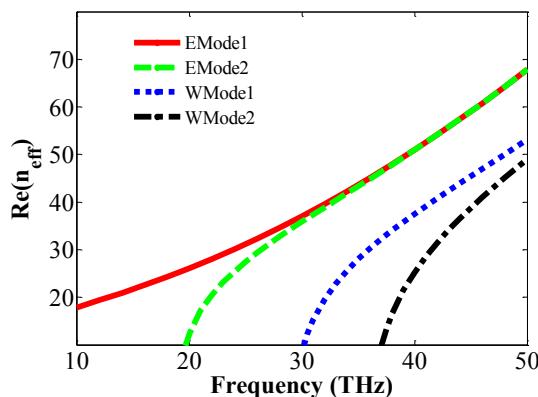
شکل ۳: طول انتشار پلاسمون‌های سطحی در نانو نوار گرافینی بر حسب عرض موجبر در فرکانس ۳۰ تراهرتز برای مدهای لبه‌ای و موجبری. نمودار داخلی، بیشینه طول انتشار مد پایه را نشان می‌دهد.

(اول و دوم) و مدهای موجبری (اول و دوم) رسم شده است. برخلاف شکل ۲ که مدهای لبه‌ای در تمامی عرض‌هایی بررسی شده ضریب شکست بالاتری نسبت به مدهای موجبری داشتند، در شکل ۳ مدهای موجبری قادرند در عرض‌های بالاتر، طول انتشار بیشتری از خود نشان دهند و در نتیجه تلفات انتشاری کمتری تولید کنند. به عنوان مثال، طول انتشار مدهای موجبری اول و دوم به ترتیب در عرض‌های ۴۹۶ و ۷۸۱ نانومتر از طول انتشار مدهای لبه‌ای بیشتر می‌شوند. همچنین از نمودار داخلی شکل ۳ (منحنی قرمز) مشاهده می‌شود که مد پایه در ناحیه تکمد دارای طول انتشار بیشینه ۲۰۳۷ میکرومتر در عرض ۱۴۰ نانومتر است.

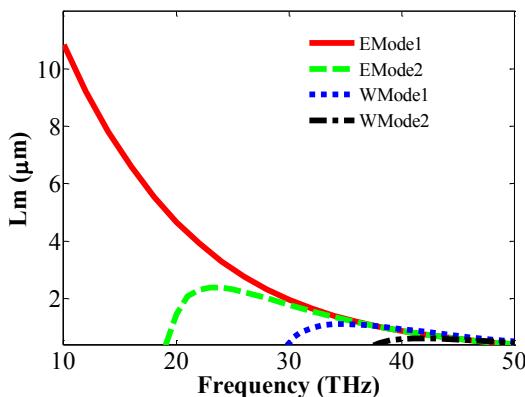
در ادامه به بررسی خواص پلاسمونیکی موجبر گرافینی در طول موج‌های فروسرخ میانی می‌پردازیم. در شکل ۴

لبه‌ای اول و دوم (EMode1-2) و مدهای موجبری اول و دوم (WMode1-2) رسم شده است. عرض موجبر در این شکل از ۲۰ تا ۳۰۰ نانومتر تغییر داده شده است. لازم به یادآوری است که تعداد مدهای موجبری در یک نانو نوار گرافینی به پارامترهای متعددی مانند عرض موجبر، فرکانس و رسانندگی نوری گرافین وابسته می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با کاهش عرض موجبر، ضریب شکست موثر مدهای موجبری ساختار کاهش می‌یابد به‌طوری که مدهای موجبری دوم و اول به ترتیب در عرض‌های ۴۴۰ و ۲۸۵ نانومتر از ساختار حذف می‌گردند و فقط مدهای لبه‌ای در ساختار باقی می‌مانند. علت این پدیده ترکیب شدگی مدهای پلاسمون سطحی لبه گرافین در یک صفحه نیمه نامتناهی گرافین است. همچنین با کاهش بیشتر عرض موجبر، مد لبه‌ای دوم نیز در عرض ۱۱۵ نانومتر از مدار حذف شده و در این حالت فقط مد لبه‌ای اول (مد پایه) در ساختار باقی می‌ماند. به عبارت دیگر می‌توان با کاهش دادن عرض موجبر، به ناحیه عملیاتی تکمد در ساختار نانو نوار گرافینی دست یافت. از طرف دیگر می‌توان مشاهده کرد که در محدوده عملیاتی تکمد (۱۱۵ تا ۲۰ نانومتر)، با کاهش بیشتر عرض موجبر، ضریب شکست موثر مد پایه به شدت افزایش یافته که این امر خود باعث افزایش بسیار زیاد میزان محصور شدگی نوری پلاسمون‌های سطحی مد پایه در ساختار گرافینی می‌گردد.

در شکل ۳ طول انتشار پلاسمون‌های سطحی ساختار نانو نوار گرافینی بر حسب عرض موجبر برای مدهای لبه‌ای



شکل ۴: ضریب شکست موثر پلاسمون‌های سطحی در نانو نوار گرافینی بر حسب تغییرات فرکانس برای مدهای لبه‌ای (اول و دوم) و مدهای موجبری (اول و دوم).



شکل ۵: طول انتشار پلاسمون‌های سطحی در نانو نوار گرافینی بر حسب تغییرات فرکانس برای مدهای لبه‌ای (اول و دوم) و مدهای موجبری (اول و دوم).

مراجع

- [1] S. Maier, *Plasmonics: Fundamentals and Applications*, Springer, 2007.
- [2] M. Jablan, H. Buljan, and M. Soljačić, “Plasmonics in graphene at infrared frequencies,” *Phys. Rev. B*, vol. 80, p. 245435, 2009.
- [3] F. Koppens, D. Chang, and F. Garcia de Abajo, “Graphene plasmonics: A platform for strong light matter interactions,” *Nano Lett.*, vol. 11, pp. 3370–3377, 2011.
- [4] T. Low and P. Avouris, “Graphene Plasmonics for Terahertz to Mid-Infrared Applications,” *ACS Nano*, vol. 8, pp. 1086–1101, 2014.
- [5] A. Nikitin, F. Guinea, F. Garcia-Vidal, and L. Martin Moreno, “Edge and waveguide terahertz surface plasmon modes in graphene microribbons,” *Phys. Rev. B*, vol. 84, p. 161407, 2011
- [6] S. He, X. Zhang, and Y. He, “Graphene nano-ribbon waveguides of record-small mode area and ultra-high effective refractive indices for future VLSI,” *Opt. Exp.*, vol. 21, pp. 30664–30673, 2013.
- [7] L. Falkovsky and S. Pershoguba, “Optical far-infrared properties of a graphene monolayer and multilayer,” *Phys. Rev. B*, vol. 76, pp. 153410–153414, 2007.
- A. Vakil and N. Engheta, “Transformation optics using graphene,” *Science*, vol. 332, pp. 1291–1294, 2011..

ضریب شکست موثر پلاسمون‌های سطحی نانو نوار گرافینی بر حسب فرکانس برای مدهای لبه‌ای (اول و دوم) و مدهای موجبری (اول و دوم) رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با کاهش فرکانس، ضریب شکست موثر تمامی مدهای مورد مطالعه در ساختار نانو نوار گرافینی کاهش می‌یابد که دلیل آن افزایش رسانندگی نسبی گرافین با کاهش فرکانس است (مطابق شکل ۱). با کاهش فرکانس در ابتدا مدهای موجبری دوم و اول به ترتیب در فرکانس‌های ۳۷ و ۲۹/۵ تراهرتز و سپس مدهای دوم در فرکانس ۱۹ تراهرتز از ساختار حذف گردیده و بدین صورت موج بر گرافینی در حالت عملیاتی تکمد قرار می‌گیرد. از آنجاکه با کاهش فرکانس، ضریب شکست پلاسمون‌های سطحی در نانو نوار گرافینی کاهش می‌یابد بنابراین در این حالت میزان محصورشدنی نوری مدهای موج بر نیز کاهش می‌یابد.

طول انتشار پلاسمون‌های سطحی در نانو نوار گرافینی بر حسب فرکانس برای مدهای لبه‌ای (اول و دوم) و مدهای موجبری (اول و دوم) در شکل ۵ رسم شده است. با کاهش فرکانس، مشاهده می‌شود که طول انتشار مدهای موجبری اول و دوم و همچنین طول انتشار مدهای لبه‌ای دوم در ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. در طرف مقابل، با کاهش فرکانس طول انتشار پلاسمون‌های سطحی در محدوده عملیاتی تکمد (۱۰ تا ۱۹ تراهرتز) به شدت افزایش می‌یابد. به طور مثال، طول انتشار مدهای در فرکانس ۱۰ تراهرتز به ۱۰/۸۵ میکرومتر افزایش می‌یابد. همچنین در فرکانس‌های بالاتر، تمامی مدهای ساختار طول انتشار یکسانی را از خود نشان می‌کنند.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از روش المان محدود وابستگی ناحیه عملیاتی تکمد به پارامترهای عرض موج بر و فرکانس در یک نانو نوار گرافینی بررسی شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که با تغییر عرض موج بر یا تغییر فرکانس می‌توان خواص پلاسمون‌های سطحی از جمله ضریب شکست موثر و طول انتشار را در یک نانو نوار گرافینی به شدت تغییر داد به‌گونه‌ای که با کاهش عرض موج بر و یا کاهش فرکانس، می‌توان ساختار موج بر را در شرایط عملیاتی تکمد قرار داد.