

مدولاتور نوری الکتروجذب بر پایه گرافن چند لایه

فاطمه سادات طباطبایی، محمدصادق ابریشمیان

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، تهران، ایران

tabatabaei@email.kntu.ac.ir

msabri@eetd.kntu.ac.ir

چکیده - در این مقاله ساختاری برای مدولاتور نوری الکتروجذب پیشنهاد می‌شود که در آن عمق مدولاسیون با بکارگیری لایه‌های گرافن اطراف موجبر نوری سیلیکونی، افزایش می‌باید. تحت تابش فوتون‌هایی با طول موج 1537 nm . با اعمال ولتاژ به لایه‌های گرافن و تغییر سطح فرمی، عمق مدولاسیون در ساختار با سه و چهار لایه گرافن به ترتیب به 9.2 dB و 13.13 dB می‌رسد.

کلید واژه- اپتوالکترونیک، الکتروجذب، چند لایه، گرافن، مدولاتور نوری

Multilayer Graphene Based Optical Electro-Absorption Modulator

Fatemeh Sadat Tabatabaei, Mohammad Sadegh Abrishamian

K. N. Toosi University of Technology, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Tehran, Iran

Abstract- In this paper a structure for optical electro-absorption modulator is proposed in which modulation depth is increased by exploiting multilayers of graphene to coat the silicon optical waveguide. Under incidence of photons with wavelength $\lambda=1537\text{ nm}$, with biasing voltage of graphene layers and changing the Fermi level, modulation depth reaches 9.2 dB and 13.13 dB in three and four layer-graphene structure respectively.

Keywords: Optoelectronics, electro-absorption, multilayer, graphene, optical modulator

تغییراتی در قسمت حقیقی و موهومی ضربی شکست شود. بر این اساس در صورتی که تغییر در قسمت حقیقی ضربی شکست رخ دهد، مدولاتور الکتروشکست^۲ و اگر قسمت موهومی ضربی شکست تغییر کند مدولاتور الکتروجذب^۳ خواهد بود[۱].

۳- طراحی و شبیه‌سازی مدولاتور

در این مقاله شبیه‌سازی‌ها به صورت سه‌بعدی و بخشی از آن با روش المان محدود^۴ و بخش دیگر با روش مد ویژه تفاضل محدود^۵ انجام شده است. سیستم مورد استفاده در شبیه‌سازی دارای پردازنده i7-6700MQ CPU @ 2.20GHz Intel(R) Core(TM)

، رم 6 GB است.

۱-۳ مدولاتور نوری با سه لایه گرافن

اولین طرح با استفاده از سه لایه گرافن است. زیرلایه از جنس SiO_2 با ارتفاع $2\mu\text{m}$ است. موجبر نوری سیلیکونی با ابعاد $0.4 \times 0.34 \times 40\mu\text{m}^3$ در مرکز و بر روی زیرلایه قرار دارد. اطراف موجبر با 5nm اکسید آلومینیوم Al_2O_3 پوشانده شده است تا حامل‌ها از گرافن به درون موجبر تزریق نشود. الکترودها در فاصله 600nm از موجبر قرار داده می‌شوند تا مدهای نوری را تحت تاثیر قرار ندهند[۶]. الکترودها از جنس طلا و سطح مقطع آن‌ها $1.8 \times 0.11\mu\text{m}^2$ است. لایه‌های دوم و سوم گرافن توسط 0.013μm اکسید آلومینیوم از هم جدا شده‌اند. در شکل ۱ نمایی از این ساختار مشاهده می‌شود. رسانایی درون‌نواری و بین‌نواری گرافن به شدت به پتانسیل شیمیایی و بسامد نور تابشی وابسته است. پتانسیل شیمیایی یا انرژی فرمی گرافن توسط غلظت حامل‌ها براساس معادله ۳ مشخص می‌شود (E_F انرژی فرمی)[۷].

$$E_F \approx \mu_c \approx \sqrt{\pi \hbar^2 v_F^2 n_0} \quad (3)$$

که $v_F \approx 9.5 \times 10^5 \text{ m/s}$ سرعت فرمی و n_0 چگالی حامل‌ها است [۷]. غلظت حامل‌ها می‌تواند از طریق آلائیدگی شیمیایی یا آلائیدگی الکتریکی طبق معادله ۴

۱- مقدمه

ساختار الکترونیکی گرافن اثر الکتروجذب قوی را موجب می‌شود که در سایر مواد مشاهده نشده است. با تغییر سطح فرمی گرافن توسط آلائیدگی شیمیایی یا آلائیدگی الکتریکی، گذرهای نوری در گرافن می‌تواند در یک پهنهای باند وسیع تنظیم شود[۱]. مدولاتور الکتروجذب موجبری بر اساس گرافن چند مزیت شاخص دارد از جمله بهره-گیری از برهمنش قوی نور و گرافن، عملکرد پهن‌باندی و سرعت بالا[۲]. در این مقاله با شبیه‌سازی سه‌بعدی مدولاتورهای الکتروجذب که در آن‌ها از سه و چهار لایه گرافن استفاده شده است، نشان می‌دهیم که عمق مدولاسیون می‌تواند مناسب با تعداد لایه‌ها افزایش یابد.

۲- گرافن و مدل الکترونیکی آن

گرافن آلوتروپ دو بعدی کربن با ساختار شبکه لانه زنیوری است [۳]. گرافن با سطح بسیار نازک با رسانایی سطحی $\sigma(\omega, \mu_c, \Gamma, T)$ مدل می‌شود که ω بسامد زاویه‌ای، μ_c پتانسیل شیمیایی، Γ نرخ پدیده پراکنده و T دما است. با استفاده از فرمول کوبو، رسانایی گرافن می‌تواند با رابطه انتگرالی ۱ توصیف شود (با فرض

تغییرات زمانی به فرم $e^{j\omega t}$) [۴] :

$$\sigma(\omega, \mu_c, \Gamma, T)_{\text{(inter and intra)}} = \frac{je^2(\omega - j2\Gamma)}{\pi\hbar^2} \times \left[\frac{1}{(\omega - j2\Gamma)^2} \int_0^\infty \varepsilon \left(\frac{\partial f_f(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} - \frac{\partial f_f(-\varepsilon)}{\partial \varepsilon} \right) d\varepsilon \right. \\ \left. - \int_0^\infty \frac{f_d(-\varepsilon) - f_d(\varepsilon)}{(\omega - j2\Gamma)^2 - 4(\varepsilon/\hbar)^2} d\varepsilon \right] \quad (1)$$

که در این رابطه $\hbar = h/2\pi$ ثابت پلانک کاهاش یافته، e -بار الکترون، و k_B ثابت بولتزمن است. $f_d(\varepsilon)$ توزیع فرمی-دیراک است که با معادله ۲ مشخص می‌شود[۴].

$$f_d(\varepsilon) = (e^{(\varepsilon - \mu_c)/k_B T} + 1)^{-1} \quad (2)$$

رسانایی گرافن یک جمله غیرخطی نیز دارد[۵]. چون در این مقاله از خاصیت جذب گرافن استفاده می‌کنیم وارد مباحث غیرخطی نمی‌شویم، جمله غیرخطی را لحاظ نمی‌کنیم. پذیرفتاری^۱ خطی موثر^(۱) χ می‌تواند با اعمال میدان الکتریکی در گرافن تغییر کند و در نتیجه منجر به

² Electro-Refractive

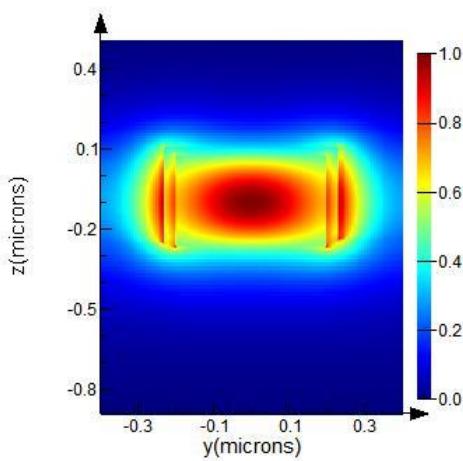
³ Electro-Absorptive

⁴ Finite Element Method

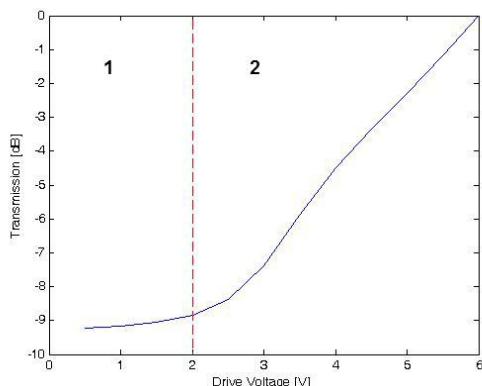
⁵ Finite Difference Eigenmode

¹ Susceptibility

میزان عبور نور (بر حسب dB) از مدولاتور در بازه ولتاژ اعمالی است [۲].



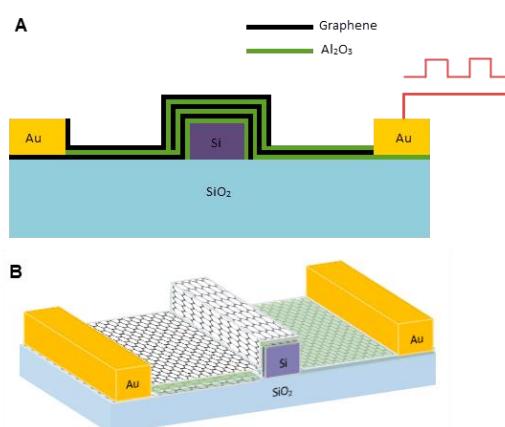
شکل ۲: توزیع میدان الکتریکی در موجبر و اطراف آن بیشترین و کمترین عبور نور در ولتاژهای ۶V و ۰.۵V است که به ترتیب برابر با ۰dB و -۹.۲dB است. بنابراین طبق تعریف، عمق مدولاسیون ساختار B ۹.۲dB است.



شکل ۳: پاسخ استاتیکی نوری مدولاتور با سه لایه گرافن با اعمال ولتاژ منفی به ساختار، پاسخ تقریباً مشابهی بدست خواهد آمد زیرا تغییر علامت ولتاژ، تنها نقش لایه‌های گرافن را به عنوان آند و کاتد تغییر خواهد داد و تاثیری در پاسخ به نور تابشی نخواهد داشت [۶].

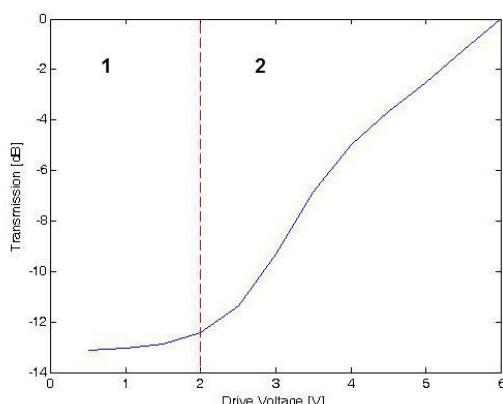
۳-۲- مدولاتور نوری با چهار لایه گرافن
دومین طرح، با اضافه کردن یک لایه دیگر گرافن به ساختار قبل بدست می‌آید. در شکل ۴ نمایی از این ساختار نشان داده شده است.

$$n_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s V_g}{d e} \quad (4)$$



شکل ۱: A نمای سطح مقطع، B نمای سه بعدی ساختار مدولاتور برپایه سه لایه گرافن در رابطه ۴، V_g ولتاژ بایاس، d ضخامت زیرلایه، ϵ_s ضریب گذردگی^۶ زیرلایه و ϵ_0 ضریب گذردگی فضای آزاد است [۳]. بنابراین با اعمال ولتاژ به گرافن، چگالی حامل‌ها، پتانسیل شیمیایی (انرژی فرمی) و رسانایی آن و در نتیجه میزان عبور یا جذب نور تغییر می‌کند. ولتاژ DC در بازه ۰.۵~۶ Volt به الکترود سمت راست اعمال می‌شود. برای محاسبه عمق مدولاسیون فوتون‌هایی با طول موج ۱۵۳۷ nm به ساختار تابیده شد. شکل ۲ توزیع میدان الکتریکی در موجبر و اطراف آن را نشان می‌دهد. شکل ۳ پاسخ استاتیکی نوری مدولاتور طراحی شده را نشان می‌دهد. طبق اصل طرد پاولی فوتون‌های با انرژی کمتر از $2E_F$ (که انرژی فرمی گرافن است) جذب نمی‌شوند [۸]. در ناحیه ۱ انرژی فرمی لایه‌ها نزدیک نقطه دیراک است و فوتون‌های تابشی جذب می‌شوند و مدولاتور در حالت خاموش است. هنگامی که ولتاژ افزایش می‌یابد و در ناحیه ۲ است، لایه‌های گرافن آلائیده شده و تشکیل یک خازن می‌دهند. در این بازه تمامی سطوح انرژی اشغال و لایه‌ها به حالت شفاف تبدیل می‌شوند و در نتیجه فوتون‌های تابشی جذب نمی‌شوند. در این بازه مدولاتور در حالت روشن قرار دارد. طبق تعریف، عمق مدولاسیون برابر با قدر مطلق اختلاف بیشترین و کمترین

^۶ Permittivity



شکل ۶: پاسخ استاتیکی نوری مدولاتور با چهار لایه گرافن

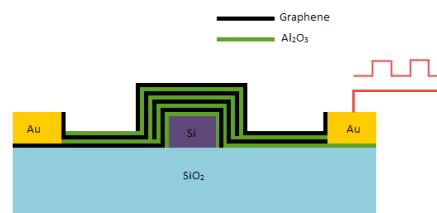
به ترتیب تقریبا سه و چهار برابر ساختاری است که در آن از یک لایه گرافن استفاده شده است (جدول ۱). این امر منجر به بهبود پاسخ در بخش آشکارسازی می شود.

جدول ۱: مقایسه عمق مدولاسیون بر اساس تعداد لایه های گرافن

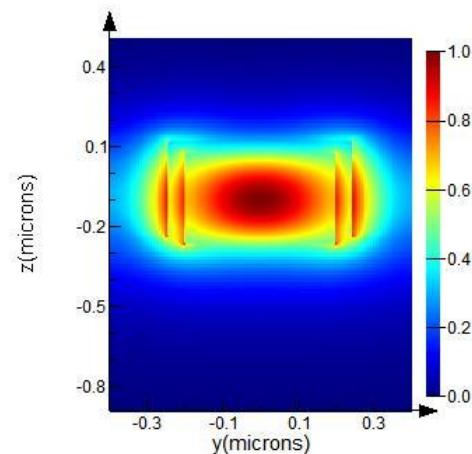
مرجع	(dB)	عمق مدولاسیون (dB)	تعداد لایه های گرافن
[۷]	3.4		یک لایه
[۸]	6.5		دو لایه
این مقاله	9.2		سه لایه
این مقاله	13.13		چهار لایه

مراجع

- [1] Q. Bao and K. P. Loh, "Graphene photonics, plasmonics, and broadband optoelectronic devices," *ACS nano*, vol. 6, no. 5, pp. 3677-3694, 2012.
- [2] M. Liu *et al.*, "A graphene-based broadband optical modulator," *Nature*, vol. 474, no. 7349, pp. 64-67, 2011.
- [3] K. S. Novoselov *et al.*, "Electric field effect in atomically thin carbon films," *science*, vol. 306, no. 5696, pp. 666-669, 2004.
- [4] G. W. Hanson, "Dyadic Green's functions and guided surface waves for a surface conductivity model of graphene," *Journal of Applied Physics*, vol. 103, no. 6, p. 064302, 2008.
- [5] A. Gorbach, "Nonlinear graphene plasmonics: amplitude equation for surface plasmons," *Physical Review A*, vol. 87, no. 1, p. 013830, 2013.
- [6] M. Liu, X. Yin, and X. Zhang, "Double-layer graphene optical modulator," *Nano letters*, vol. 12, no. 3, pp. 1482-1485, 2012.
- [7] X. Luo, T. Qiu, W. Lu, and Z. Ni, "Plasmons in graphene: recent progress and applications," *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 74, no. 11, pp. 351-376, 2013.
- [8] A. Grigorenko, M. Polini, and K. Novoselov, "Graphene plasmonics," *Nature photonics*, vol. 6, no. 11, pp. 749-758, 2012.



شکل ۴: نمای سطح مقطع ساختار مدولاتور برپایه چهار لایه گرافن
شکل ۵ توزیع میدان الکتریکی در موجبر و اطراف آن را نشان می دهد. شکل ۶ پاسخ استاتیکی نوری مدولاتور با چهار لایه گرافن را نشان می دهد.



شکل ۵: توزیع میدان الکتریکی در موجبر و اطراف آن همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است، بیشترین و کمترین میزان عبور نور ۰dB و ۱3.13dB است که به ترتیب در ولتاژهای ۰.۵v و ۶v است. در نتیجه عمق مدولاسیون ساختار به ۱3.13 dB می‌رسد. مانند ساختار قبل در ناحیه ۱ انرژی فرمی لایه‌ها نزدیک نقطه دیراک است و فوتون‌های تابشی جذب می‌شوند و مدولاتور را در حالت خاموش قرار می‌دهند. در ناحیه ۲ لایه‌های گرافن شفاف هستند و فوتون‌های تابشی جذب نمی‌شوند و مدولاتور روشن است.

۴- نتیجه‌گیری

در حالی که سه و چهار لایه گرافن استفاده شود، به دلیل افزایش جذب نور توسط لایه‌های بیشتر، عمق مدولاسیون