

## مدولاتور نوری الکترو جذب 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](mailto:tabatabaei@email.kntu.ac.ir)

[msabrish@eetd.kntu.ac.ir](mailto:msabrish@eetd.kntu.ac.ir)

چکیده - در این مقاله ساختاری برای مدولاتور نوری الکترو جذب پیشنهاد می شود که در آن عمق مدولاسیون با بکارگیری لایه های گرافن اطراف موجبر نوری سیلیکونی، افزایش می یابد. تحت تابش فوتون هایی با طول موج  $1537\text{ nm}$ ، با اعمال ولتاژ به لایه های گرافن و تغییر سطح فرمی، عمق مدولاسیون در ساختار با سه و چهار لایه گرافن به ترتیب به  $9.2\text{ dB}$  و  $13.13\text{ dB}$  می رسد.

کلید واژه - اپتوالکترونیک، الکترو جذب، 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  $9.2\text{ dB}$  and  $13.13\text{ dB}$  in three and four layer-graphene structure respectively.

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

## ۱- مقدمه

تغییراتی در قسمت حقیقی و موهومی ضریب شکست شود. بر این اساس در صورتی که تغییر در قسمت حقیقی ضریب شکست رخ دهد، مدولاتور الکتروشکست<sup>۲</sup> و اگر قسمت موهومی ضریب شکست تغییر کند مدولاتور الکتروجدب<sup>۳</sup> خواهد بود [۱].

## ۳- طراحی و شبیه‌سازی مدولاتور

در این مقاله شبیه‌سازی‌ها به صورت سه‌بعدی و بخشی از آن با روش المان محدود<sup>۴</sup> و بخش دیگر با روش مد ویژه تفاضل محدود<sup>۵</sup> انجام شده است. سیستم مورد استفاده در شبیه‌سازی دارای پردازنده Intel(R) Core(TM) i7-4702MQ CPU @ 2.20GHz، رم 6 GB است.

## ۳-۱- مدولاتور نوری با سه لایه گرافن

اولین طرح با استفاده از سه لایه گرافن است. زیرلایه از جنس SiO<sub>2</sub> با ارتفاع 2 μm است. موجبر نوری سیلیکونی با ابعاد 0.4 × 0.34 × 40 μm<sup>3</sup> در مرکز و بر روی زیرلایه قرار دارد. اطراف موجبر با 5nm اکسید آلومینیوم Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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 × 0.11 μm<sup>2</sup> است. لایه‌های دوم و سوم گرافن توسط 0.013 μm 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<sub>F</sub> انرژی فرمی) [۷].

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

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

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

## ۲- گرافن و مدل الکترونیکی آن

گرافن آلوتروپ دو بعدی کربن با ساختار شبکه لانه زنبوری است [۳]. گرافن با سطح بسیار نازک با رسانایی سطحی  $\sigma(\omega, \mu_c, \Gamma, T)$  مدل می‌شود که  $\omega$  بسامد زاویه‌ای،  $\mu_c$  پتانسیل شیمیایی،  $\Gamma$  نرخ پدیده پراکندگی 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]:

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

که در این رابطه  $\hbar = h/2\pi$  ثابت پلانک کاهش 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 و وارد مباحث غیرخطی نمی‌شویم، جمله غیرخطی را لحاظ نمی‌کنیم. پذیرفتاری<sup>۱</sup> خطی موثر  $\chi^{(1)}$  می‌تواند با اعمال میدان الکتریکی در گرافن تغییر کند و در نتیجه منجر به

<sup>1</sup> Susceptibility

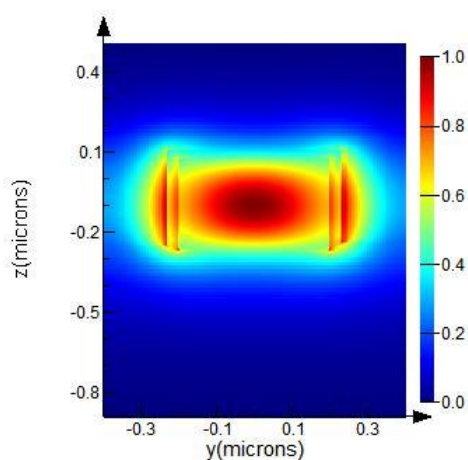
<sup>2</sup> Electro-Refractive

<sup>3</sup> Electro-Absorptive

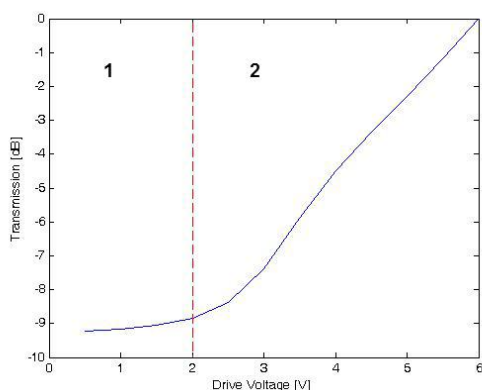
<sup>4</sup> Finite Element Method

<sup>5</sup> Finite Difference Eigenmode

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 6v و 0.5v است که به ترتیب برابر با 0dB و -9.2dB است. بنابراین طبق تعریف، عمق مدولاسیون ساختار 9.2dB است.



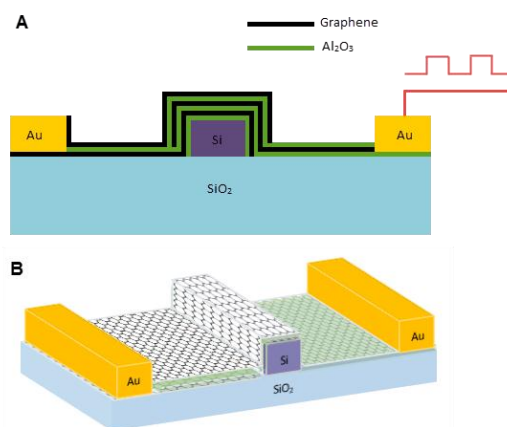
شکل ۳: پاسخ استاتیکی نوری مدولاتور با سه لایه گرافن با اعمال ولتاژ منفی به ساختار، پاسخ تقریباً مشابهی بدست خواهد آمد زیرا تغییر علامت ولتاژ، تنها نقش لایه-های گرافن را به عنوان آند و کاتد تغییر خواهد داد و تاثیری در پاسخ به نور تابشی نخواهد داشت [۶].

### 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.

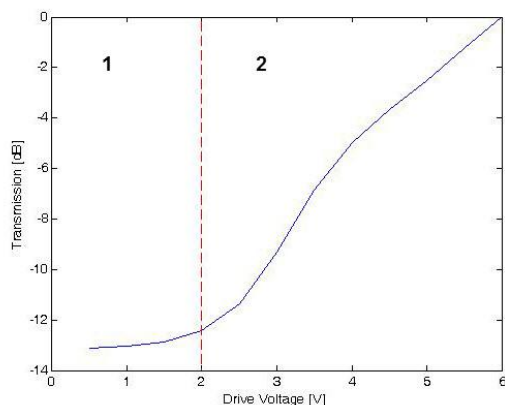
کنترل شود [۳].

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



شکل ۴: A نمای سطح مقطع، B نمای سه‌بعدی ساختار مدولاتور برپایه سه لایه گرافن در رابطه ۴،  $V_g$  ولتاژ بایاس،  $d$  ضخامت زیرلایه،  $\epsilon_s$  ضریب گذردهی<sup>۶</sup> زیرلایه و  $\epsilon_0$  ضریب گذردهی 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 0.5~6 ولت به الکتروود سمت راست اعمال می‌شود. برای محاسبه عمق مدولاسیون فوتون‌هایی با طول موج 1537 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  $E_F$  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 قدرمطلق اختلاف بیشترین و کمترین

<sup>6</sup> Permittivity

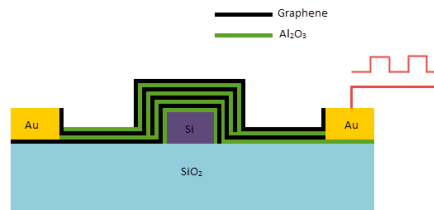


شکل ۶: پاسخ استاتیکی نوری مدولاتور با چهار لایه گرافن به ترتیب تقریباً سه و چهار برابر ساختاری است که در آن از یک لایه گرافن استفاده شده است (جدول ۱). این امر منجر به بهبود پاسخ در بخش آشکارسازی می‌شود. جدول ۱: مقایسه عمق مدولاسیون بر اساس تعداد لایه‌های گرافن

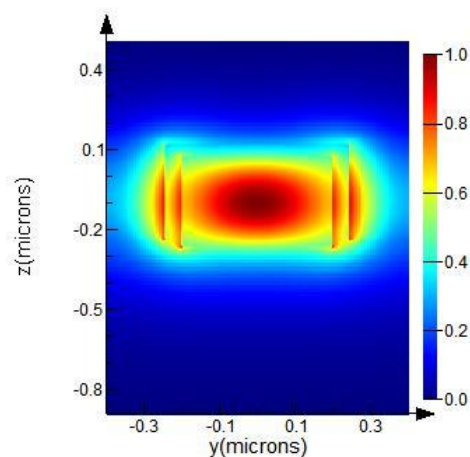
مرجع	عمق مدولاسیون (dB)	تعداد لایه‌های گرافن
[۲]	3.4	یک لایه
[۸]	6.5	دو لایه
این مقاله	9.2	سه لایه
این مقاله	13.13	چهار لایه

#### 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 بر پایه چهار لایه گرافن شکل ۵ توزیع میدان الکتریکی در موجبر و اطراف آن را نشان می‌دهد. شکل ۶ پاسخ استاتیکی نوری مدولاتور با چهار لایه گرافن را نشان می‌دهد.



شکل ۵: توزیع میدان الکتریکی در موجبر و اطراف آن همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است، بیشترین و کمترین میزان عبور نور 0dB و -13.13dB است که به ترتیب در ولتاژهای 6V و 0.5V است. در نتیجه عمق مدولاسیون ساختار به 13.13 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 حالتی که سه و چهار لایه گرافن استفاده شود، به دلیل افزایش جذب نور توسط لایه‌های بیشتر، عمق مدولاسیون