مدولاتور نوری الکتروجذب برپایه گرافن چندلایه

فاطمه سادات طباطبایی، محمدصادق ابریشمیان

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

tabatabaei@email.kntu.ac.ir msabrish@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 می‌یابد. 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 Univerisity 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 λ=1537 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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

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

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 پهنای باند وسیع تنظیم شود[۱]. مدولاتور الکتروجذب موجبری بر اساس گرافن چند مزیت شاخص دارد از جمله بهره-گیری از برهم‌کنش 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 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 ω بسامد زاویه‌ای، μ_c پتانسیل شیمیایی، Γ 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]:

$$\sigma(\omega,\mu_c,\Gamma,T)(\text{inter and intra}) = \frac{je^2(\omega - j2\Gamma)}{\pi\hbar^2}\times$$
$$\left[\frac{1}{(\omega - j2\Gamma)^2}\int_0^{\infty}\varepsilon\left(\frac{\partial f_f(\varepsilon)}{\partial\varepsilon} - \frac{\partial f_f(-\varepsilon)}{\partial\varepsilon}\right)d\varepsilon\right. \qquad (۱)$$
$$\left. - \int_0^{\infty}\frac{f_d(-\varepsilon) - f_d(\varepsilon)}{(\omega - j2\Gamma)^2 - 4(\varepsilon/\hbar)^2}d\varepsilon\right]$$

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].

$$f_d(\varepsilon) = (e^{(\varepsilon-\mu_c)/k_BT} + 1)^{-1} \qquad (۲)$$

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[1] خطی موثر $\chi^{(1)}$ می‌تواند با اعمال میدان الکتریکی در گرافن تغییر کند و در نتیجه منجر به 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[2] و اگر قسمت موهومی ضریب شکست تغییر کند مدولاتور الکتروجذب[3] خواهد بود[۱].

۳- طراحی و شبیه‌سازی مدولاتور

در این مقاله شبیه‌سازی‌ها به صورت سه‌بعدی و بخشی از آن با روش المان محدود[4] و بخش دیگر با روش مد ویژه تفاضل محدود[5] 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_2 با ارتفاع $2\mu m$ است. موجبر نوری سیلیکونی با ابعاد $0.4\times0.34\times40\mu m^3$ 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 $1.8\times0.11\mu m^2$ است. لایه‌های دوم و سوم گرافن توسط $0.013\mu m$ 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].

$$E_F \approx \mu_c \approx \sqrt{\pi\hbar^2 v_F^2 n_0} \qquad (۳)$$

که $v_F \approx 9.5\times10^5 m/s$ سرعت فرمی و n_0 چگالی حامل‌ها است [۷]. غلظت حامل‌ها می‌تواند از طریق آلائیدگی شیمیایی یا آلائیدگی الکتریکی طبق معادله ۴

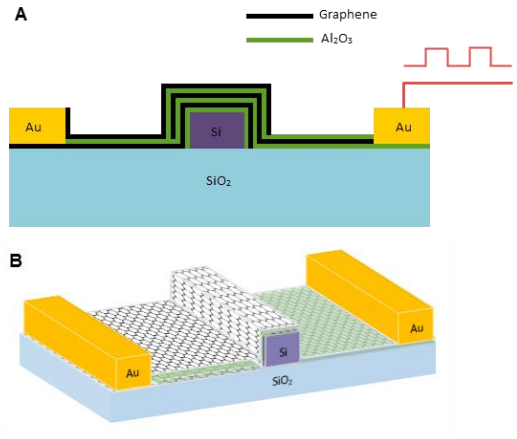
[1] Susceptibility
[2] Electro-Refractive
[3] Electro-Absorptive
[4] Finite Element Method
[5] Finite Difference Eigenmode

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

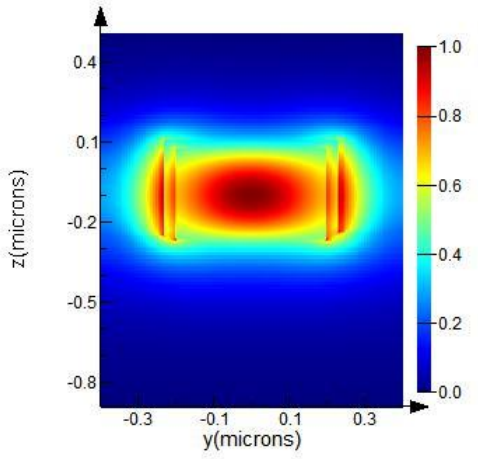
کنترل شود[۳].

$$n_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_s V_g}{de} \quad (۴)$$



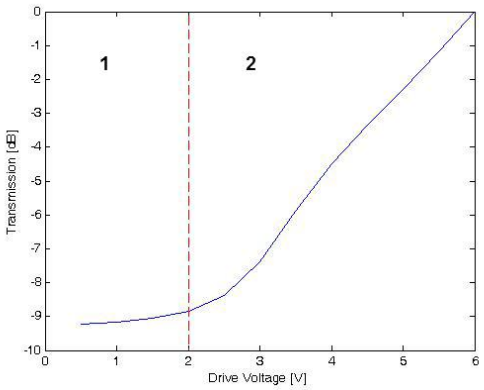
شکل ۱: A نمای سطح مقطع، B نمای سه‌بعدی ساختار مدولاتور برپایه سه لایه گرافن

در رابطه ۴، V_g ولتاژ بایاس، d ضخامت زیرلایه، ε_s ضریب گذردهی[۶] زیرلایه و $\varepsilon 0$ 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 الکترود 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 آن‌را 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 درنتیجه فوتون‌های تابشی جذب نمی‌شوند. در این بازه مدولاتور در حالت روشن قرار دارد. طبق تعریف، عمق مدولاسیون برابر با قدرمطلق اختلاف بیشترین و کمترین 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 به‌ترتیب 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 تقریبا 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].

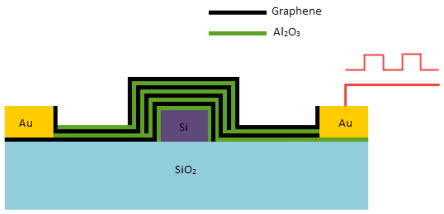
۳-۲- مدولاتور نوری با چهار لایه گرافن

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.

[6] Permittivity

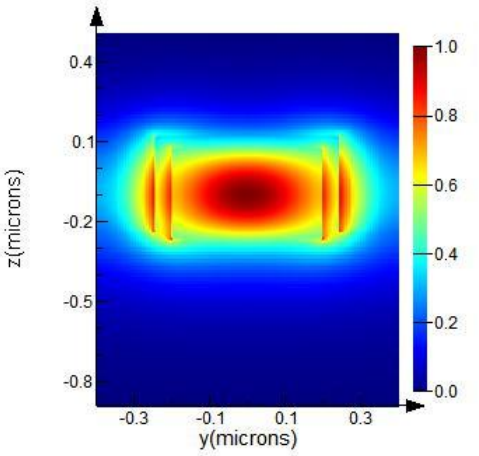
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]



شکل ۴: نمای سطح مقطع ساختار مدولاتور برپایه چهار لایه گرافن

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

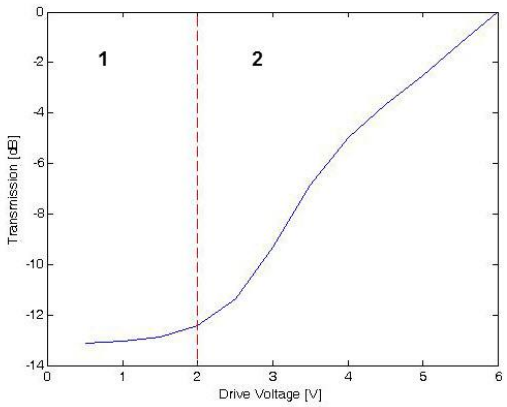


شکل ۵: توزیع میدان الکتریکی در موجبر و اطراف آن

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، به‌دلیل افزایش جذب نور توسط لایه‌های بیشتر، عمق مدولاسیون



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 می‌شود.

جدول ۱: مقایسه عمق مدولاسیون بر اساس تعداد لایه‌های گرافن

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

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.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]