





مدولاتور نورى الكتروجذب برپايه گرافن چندلايه

فاطمه سادات طباطبايي، محمدصادق ابريشميان

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 mm 1537، با اعمال ولتاژ به لایههای گرافن و تغییر سطح فرمی، عمق مدولاسیون در ساختار با سه و چهار لایه گرافن به تر تیب به 9.2 dB و 13.13 میرسد.

كليد واژه- اپتوالكترونيك، الكتروجذب، چند لايه، گرافن، مدولاتور نورى

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 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

۱- مقدمه

ساختار الكترونيكي گرافن اثر الكتروجذب قوى را موجب می شود که در سایر مواد مشاهده نشده است. با تغییر سطح فرمی گرافن توسط آلائیدگی شیمیایی یا آلائیدگی الکتریکی، گذرهای نوری در گرافن می تواند در یک پهنای باند وسيع تنظيم شود[۱]. مدولاتور الكتروجذب موجبري بر اساس گرافن چند مزیت شاخص دارد از جمله بهره-گیری از برهم کنش 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 مدولاسيون مي تواند متناسب با تعداد لايهها افزايش يابد.

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 می شود که ω بسامد زاویه ای، μ_c پتانسیل شیمیایی، Γ نرخ پدیده پراکندگی و T دما است. با استفاده از فرمول كوبو، رسانايي گرافن می تواند با رابطه انتگرالی ۱ توصیف شود (با فرض تغییرات زمانی به فرم *e ^{jæt} (e)* [۴]:

$$\sigma(\omega,\mu_{c},\Gamma,T)(\text{inter and intra}) = \frac{je^{2}(\omega-j2\Gamma)}{\pi\hbar^{2}} \times \left[\frac{1}{(\omega-j2\Gamma)^{2}} \int_{0}^{\infty} \varepsilon \left(\frac{\partial f_{f}(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} - \frac{\partial f_{f}(-\varepsilon)}{\partial \varepsilon}\right) d\varepsilon \right]$$
(1)
$$-\int_{0}^{\infty} \frac{f_{d}(-\varepsilon) - f_{d}(\varepsilon)}{(\omega-j2\Gamma)^{2} - 4(\varepsilon/\hbar)^{2}} d\varepsilon = S$$
(1)
$$\int_{0}^{\infty} \frac{f_{d}(-\varepsilon) - f_{d}(\varepsilon)}{(\omega-j2\Gamma)^{2} - 4(\varepsilon/\hbar)^{2}} d\varepsilon = S$$
(1)
$$\int_{0}^{\infty} \frac{f_{d}(\varepsilon)}{(\omega-j2\Gamma)^{2} - 4(\varepsilon/\hbar)^{2}} d\varepsilon = S$$
(1)
$$\int_{0}^{\infty} \frac{f_{d}(\varepsilon)}{(\varepsilon-j2\Gamma)^{2} - 4(\varepsilon/\hbar)^{2}} d\varepsilon = S$$
(1)
$$\int_{0}^{\infty} \frac{f_{d}(\varepsilon)}{(\varepsilon-j2\Gamma)^{2} - 4(\varepsilon/\hbar)^{2}} d\varepsilon = S$$
(1)
$$\int_{0}^{\infty} \frac{f_{d}(\varepsilon)}{(\varepsilon-j2\Gamma)^{2} - 4(\varepsilon/\hbar)^{2}} d\varepsilon = S$$
(1)
$$\int_{0}^{\infty} \frac{f_{d}(\varepsilon)}{(\varepsilon-j2\Gamma)^{2}} - \frac{f_{d}(\varepsilon)}{(\varepsilon-j2\Gamma)^{2}} d\varepsilon = S$$
(1)
$$\int_{0}^{\infty} \frac{f_{d}(\varepsilon-j2\Gamma)}{(\varepsilon-j2\Gamma)^{2}} d\varepsilon = S$$
(1)
$$\int_{0}^$$

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 و اگر قسمت موهومي ضريب شكست تغيير كند مدولاتور الكتروجذب^٣ خواهد بود[١].

۳- طراحي و شبيهسازي مدولاتور

در این مقاله شبیهسازیها به صورت سهبعدی و بخشی از آن با روش المان محدود ً و بخش دیگر با روش مد ویژه تفاضل محدود^۵ انجام شده است. سیستم مورد استفاده در شبیهسازی دارای پردازنده -Intel(R) Core(TM) i7 6 GB ، رم 6 GB ، 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 $40 \mu m^3 \times 0.34 \times 0.34 \times 0.34$ در مرکز و بر روی زیرلایه قرار دارد. اطراف موجبر با 5nm اکسید آلومینیوم Al₂O₃ پوشانده شده است تا حاملها از گرافن به درون موجبر تزریق نشود. الکترودها در فاصله 600nm از موجبر قرار داده می شوند تا مدهای نوری را تحت تاثير قرار ندهند [8]. الكترودها از جنس طلا و سطح مقطع آنها $0.11 \mu m^2$ است. لایههای دوم و سوم گرافن توسط 0.013µm اکسید آلومینیوم از هم جدا شدهاند. در شکل ۱ نمایی از این ساختار مشاهده می شود. رسانایی دروننواری و بیننواری گرافن به شدت به پتانسیل شیمیایی و بسامد نور تابشی وابسته است. یتانسیل شیمیایی یا انرژی فرمی گرافن توسط غلظت حامل ها براساس معادله ۳ مشخص می شود (E_F انرژی فرمي)[۷].

$$E_F \approx \mu_c \approx \sqrt{\pi \hbar^2 v_F^2 n_0} \tag{(7)}$$

که $v_F \approx 9.5 imes 10^5 \, {
m m/s}$ سرعت فرمی و n_0 چگالی حامل ها است [٧]. غلظت حامل ها مي تواند از طريق

آلائیدگی شیمیایی یا آلائیدگی الکتریکی طبق معادله ۴

³ Electro-Absorptive

⁴ Finite Element Method

⁵ Finite Difference Eigenmode

```
<sup>1</sup> Susceptibility
```

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت <u>WWW.Opsi.ir</u> قابل دسترسی باشد

² Electro-Refractive

کنترل شود[۳].





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

 ε_s ،در رابطه ۴، V_g ولتاژ بایاس، d ضخامت زیرلایه، V_g ضریب گذردهی 3 زیرلایه و 2 ضریب گذردهی فضای آزاد است[۳]. بنابراین با اعمال ولتاژ به گرافن، چگالی حامل ها، پتانسیل شیمیایی(انرژی فرمی) و رسانایی آن و در نتيجه ميزان عبور يا جذب نور تغيير مىكند. ولتاژ DC در بازه 6~0.5 ولت به الكترود سمت راست اعمال می شود. برای محاسبه عمق مدولاسیون فوتون هایی با طول موج nm 1537 به ساختار تابیده شد. شکل ۲ توزيع ميدان الكتريكي در موجبر و اطراف آنرا نشان مي-دهد. 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 نمی شوند [۸]. در ناحیه ۱ انرژی فرمی لایه ها نزدیک نقطه ديراک است و فوتونهای تابشی جذب میشوند و مدولاتور در حالت خاموش است. هنگامی که ولتاژ افزایش می یابد و در ناحیه ۲ است، لایه های گرافن آلائیده شده و تشکیل یک خازن میدهند. در این بازه تمامی سطوح انرژی اشغال و لایهها به حالت شفاف تبدیل می شوند و درنتیجه فوتونهای تابشی جذب نمی شوند. در این بازه مدولاتور در حالت روشن قرار دارد. طبق تعریف، عمق مدولاسيون برابر با قدرمطلق اختلاف بيشترين و كمترين

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 6۷ و 0.5۷ 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 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.

٣٩١



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 همان طور که در شکل ۶ مشخص است، بیشترین و کمترین میزان عبور نور 0dB و 0dB- است که به ترتیب در ولتاژهای 6v و 0.5v است. در نتیجه عمق مدولاسیون ساختار به 13.13 dB می رسد. مانند ساختار قبل در ناحیه ۱ انرژی فرمی لایه ها نزدیک نقطه دیراک است و فوتون های تابشی جذب می شوند و مدولاتور را در حالت خاموش قرار می دهند. در ناحیه ۲ لایه های گرافن شفاف هستند و فوتون های تابشی جذب نمی شوند 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 می شود.

جدول ۱: مقایسه عمق مدولاسیون بر اساس تعداد لایههای گرافن

مرجع	عمق مدولاسيون (dB)	تعداد لایههای گرافن
[٢]	3.4	یک لایه
[٨]	6.5	دو لايه
این مقاله	9.2	سه لايه
این مقاله	13.13	چهار لايه

مراجع

- 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.