بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷

طراحی و مدل سازی مدولاتور تمام نوری گرافنی بر اساس فیبر نوری با روکش پلیمری

امین نیکدل اسکویی، هادی صوفی، حامد باغبان، غلامرضا کیانی
دانشکده مهندسی فناوری های نوین، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده - مدولاتورهای گرافنی نسل جدیدی از مدولاتورهای تمام نوری هستند که با توجه به ویژگی‌های جالب توجه گرافن برای بهبود عملکرد و افزایش سرعت و کاهش توان مصرفی مدولاتورهای نوری طراحی شده اند. در این مقاله یک مدولاتور تمام نوری گرافنی به روش عددی مدل سازی شده است و نقش گرافن نیز در این آنالیز بررسی شده است. برای تحلیل یک فیبر نوری تک مد را در نظر گرفته و به روش مشخص شده، از طرفین کشیده شده و باریک شده است. سپس بر روی قسمت باریک شده گرافن کشیده شده و نتایج بررسی می شود. در نهایت یک لایه پلیمر نیز بر روی گرافن کشیده شده و بهبود عملکرد آن نشان داده شده است. در این تحقیق تاثیر میزان کشیدگی فیبر به عمق مدولاسیون و توان مصرفی بررسی شده است. کاهش شعاع قسمت باریک شده از ۱ تا ۰/۴ میکرومتر باعث بهبود چشمگیر عمق مدولاسیون و کاهش توان می شود.با اضافه کردن یک لایه پلیمر اضافی بر روی گرافن مصرف توان کاهش داده شده است.

کلید واژه- گرافن، مدولاتور گرافنی، تراز فرمی، سیگنال سوییچ، عمق مدولاسیون

Design and modeling of an all-optical graphene modulator based on a polymer-coated optical fiber

Amin Nikdel Oskuyi, Hadi Soofi, Hamed Baghban, and Gholamreza Kiani
School of Engineering-Emerging Technologies, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract- All optical-modulator is a new generation of modulators designed in conjunction with electro-absorbing modulators to improve performance, increase speed and reduce the power of these modulators. Graphene has also been used for this kind of modulator because of its unique optical properties. In this paper, an all optical graphene modulator is modeled numerically and the uniqe role of graphene has also been shown in this analysis. For the analysis , a single-mode optical fiber is considered and drawned from it's two sides and narrowed, Then on the narrowed portion a graphene layer was coverd and the results are checked. Finally, a layer of polymer is also coverd on graphene and it's Performance improvements is shown. In this research, the effect of fiber stretching on modulation depth and power consumption has been investigated. Reducing the radius of the narrowed section from 1 to 0.4 µm will significantly improve the depth of modulation and reduce power. Adding an extra polymer layer to graphene has reduced power consumption.

Keywords- Graphene, Graphene Modulator, Fermi Level, Switch Signal, Depth Modulation

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-20]

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

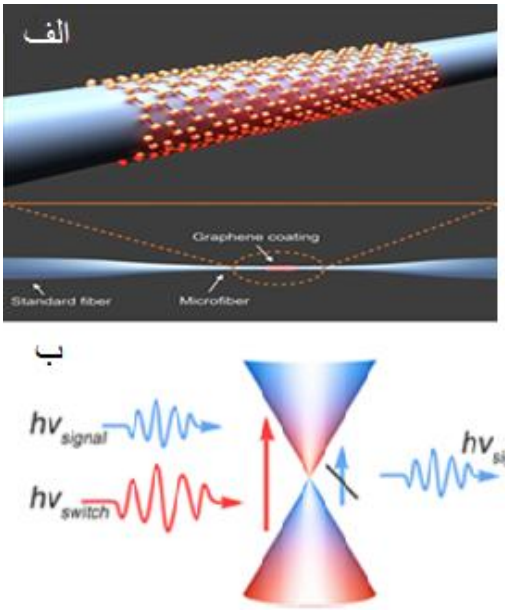
۱-مقدمه

قرن بیستم به خاطر کشف پلاستیک به عنوان قرن پلاستیک شناخته می شود.همچنین قرن بیست و یک را به خاطر کشف گرافن ، عصر گرافن نامیده اند.گرافن یک ماده ی منحصر به فرد است که به خاطر ساختار ساده و منظم شش ضلعی ویژگی های قابل توجه و بینظیری را از خود نشان می دهد.ویژگی هایی که هر یک می تواند در حوزه های مختلف علمی تحول شگرفی ایجاد کند..گرافن دارای ضریب شکست حقیقی و موهومی است اما وابستگی این دو پارامتر به انرژی فرمی آن باعث کاربرد گرافن در مدولاتورهای نوری شده است. یعنی تغییر چگالی حامل های بار در گرافن ، باعث تغییر تراز فرمی شده و به طبع آن باعث تغییر ضریب جذب گرافن می شود که همین ویژگی در مدولاتور های نوری استفاده می‌شود[۱].

اساس عملکرد مدولاتورهای الکتروجذبی گرافنی به این صورت است که گرافن را در ساختاری شبیه ترانزیستور FET قرار داده و با اعمال ولتاژ به آند و کاتد و ایجاد اختلاف ولتاژ ، باعث ایجاد بارهای حامل در گرافن می شوند.تحریک الکترون ها و انتقال آن‌ها به باند هدایت و پر شدن لایه بالا باعث می شود که فوتون‌های با انرژی کمتر قابلیت جذب و تحریک الکترون را نداشته و از گرافن عبور کنند (یک منطقی) و هنگامی که ولتاژ اعمال نشود نور در گرافن جذب شده و خروجی نخواهیم داشت (صفر منطقی)[۲و۳].

۱-۱ – مدولاتور تمام نوری

محدودیت های ساخت و سرعت پایین مدولاتورهای الکتروجذب و چند محدودیت دیگر باعث تغییر نگرش نسبت به مدولاتورهای تمام جذب شده است. در یکی از این نوع مدولاتورها از یک فیبر نوری تک مد از جنس سلیکا استفاده شده است. توسط یک روش حرارتی از دو طرف فیبر نوری کشیده می شود[۴]، سپس بر روی قسمت باریک شده یک تا چند لایه گرافن کشیده می شود. اساس عملکرد نیز مشابه روش الکتروجذب است. برای فرستادن یک منطقی، ابتدا یک نور با فرکانس بیشتر به فیبر وارد می شود. این نور باعث تحریک الکترون های گرافن شده و به لایه هدایت فرستاده می شوند. این باعث ایجاد به اصطلاح "پائولی بلاکینگ گرافن " می شود . در چنین شرایطی با وارد شدن نور ورودی ، نور کمتر جذب می شود و خروجی یک تشخیص داده می شود.



شکل ۱) ساختار یک مدولاتور تمام نوری گرافنی – الف) ساختار یک فیبر نوری است که از دو طرف کشیده شده و در قسمت باریک یک یا چند لایه گرافن به صورت سطح یک استوانه کشیده می شود. ب) نحوه عملکرد ساختار ، نور قرمز نور سویچینگ است که دارای فرکانس بیشتر از ورودی است و باعث به اشباع رساندن گرافن شده است و نور آبی که سیگنال ورودی است از ساختار عبور می کند [۵].

در مقابل برای حالت صفر نور سویچینگ خاموش می شود که در این حالت نور ورودی جذب شده و خروجی صفر تشخیص داده می شود.

۲-۱- رابطه ضریب شکست با تراز فرمی گرافن

همان طور که گفته شد تغییر تراز فرمی گرافن باعث تغییر ضریب شکست گرافن می شود. در گرافن دو بعدی رابطه زیر بین هدایت و ضریب شکست با تراز فرمی حکم فرماست.

$$\sigma = \sigma_{intra} + \sigma'_{inter} + i\sigma''_{inter} \quad (۱)$$

$$\sigma_{intra} = \sigma_0 \frac{4\mu}{\pi} \frac{1}{h\tau_1 - ih\omega} \quad (۲)$$

$$\sigma'_{inter} = \sigma_0 \left(1 + \frac{1}{\pi}\arctan\frac{h\omega - 2\mu}{h\tau_2} - \frac{1}{\pi}\arctan\frac{h\omega + 2\mu}{h\tau_2}\right) \quad (۳)$$

$$\sigma''_{inter} = -\sigma_0 \frac{1}{2\pi}\ln\frac{(h\omega+2\mu)^2 + h^2\tau_2^2}{(h\omega-2\mu)^2 + h^2\tau_2^2} \quad (۴)$$

$$\varepsilon = \frac{1 + i\sigma}{\varepsilon_0 \omega d_G} \quad (۵)$$

$$n = \sqrt{\varepsilon} \quad (۶)$$

در روابط بالا n ضریب شکست گرافن است که از دو بخش حقیقی و موهومی تشکیل شده است. σ هدایت و d_G ضخامت گرافن هستند. هدایت گرافن از سه پارمتر تشکیل

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-20]

شده است. μ تراز فرمی τ_1, τ_2 گرافن، h ثابت پلانک و ω هم $2\pi f$ که f هم فرکانس نور ورودی است. زمان های بازگشت است که به ترتیب ۱ پیکو و ۱ فمتو ثانیه در نظر گرفته شده است.

۲- روش انجام تحقیق

ابتدا با توجه به روابط بیان شده نمودار ضریب شکست گرافن با تراز فرمی را در نرم افزار متلب کد نویسی و بدست می آوریم (شکل ۲).

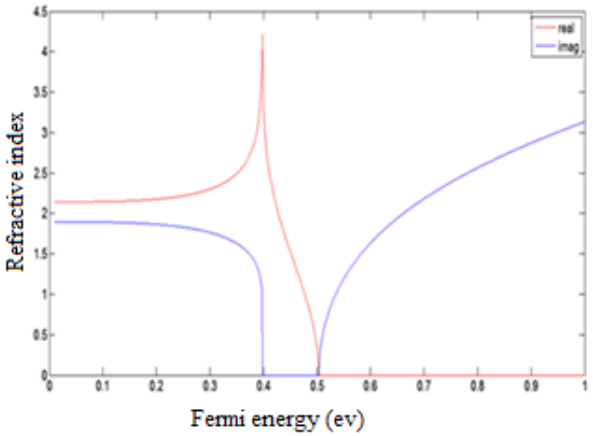
همانطور که در قسمت ۲-۱ ذکر شد، در مدولاتور تمام نوری ، دو نوع سیگنال ارسال می شود. سیگنال با فرکانس بیشتر که سیگنال سوویچ گفته می شود و سیگنال با فرکانس کمتر که سیگنال ورودی گفته می شود. در اینجا سیگنال سوویچ با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر و سیگنال ورودی با طول موج ۱۵۵۰ نانو متر فرستاده می شود. برای فرستادن یک منطقی باید سیگنال ورودی در خروجی وجود داشته باشد یا به عبارتی کمترین جذب را داشته باشد. یعنی سیگنال ورودی با کمترین جذب ممکن از ساختار عبور کند.پس باید گرافن را با فرکانس بیشتر از ورودی به اشباع برسانیم تا سیگنال ورودی کمترین جذب را داشته باشد.

برای کاهش ضریب جذب ساختار باید تراز فرمی گرافن را به نحوی جابه جا کنیم تا کمترین ضریب شکست موهومی را داشته باشد. به عبارتی یک سیگنال با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر به فیبر نوری وارد می شود . با توجه به شکل ۲ ، بازه ۰/۳۹ ev تا ۰/۴۹ تراز فرمی کمترین ضریب جذب را خواهد داشت. پس بایستی توان سیگنال سوویچ به اندازه ای باشد تا تراز فرمی گرافن از ۰/۴۹ بیشتر نشود. در غیر این صورت ضریب شکست موهومی گرافن به شدت افزایش یافته و در نتیجه ضریب جذب ساختار افزایش می یابد. با توجه به روابط زیر و حل معادله ها توان مورد نیاز بدست می آید.

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{I\alpha}{h\omega} - \frac{N}{\tau} \qquad (۷)$$

$$\alpha = 2\frac{\omega}{C}\kappa \qquad (۸)$$

N حامل های بار تولید شده در گرافن و I شدت نور ورودی است. c سرعت نور و ضریب جذب هستند. τ هم زمان استراحت گرافن که ۱۰ فمتو ثانیه در نظر گرفته شده است. κ نیز ضریب جذب موهومی گرافن است که توسط رابطه ۸ به ضریب جذب مرتبط شده است.



شکل ۲ – ضریب شکست حقیقی (قرمز) و موهومی (آبی) گرافن

همانطور که گفته شد در قسمت باریک شده فیبر روکش گرافنی به صورت یک سطح استوانه کامل کشیده شده که در اینجا از ۲ تا ۱۰۰ میکرومتر طول گرافن را در نظر گرفته ایم و بهترین طول را بدست می آوریم. برای محاسبه ی عمق مدولاسیون باید میزان تغییر جذب نور ورودی قبل و بعد اعمال سیگنال سوویچ بدست آید.شدت سیگنال ورودی در طول ساختار با رابطه زیر تلف می شود.

$$\frac{\partial I}{\partial z} = -\alpha I \qquad (۹)$$

که α ضریب جذب ساختار و I شدت نور ورودی است که در طول ساختار افت می شود. افت شدت سیگنال طبق رابطه ی ۷ باعث کاهش ضریب جذب و به طبع آن باعث کاهش تراز فرمی می شود. رابطه۷ و ۹ با همدیگر حل می شوند و تا همگرایی و رسیدن به حداقل اختلاف ممکن در جواب، این حل ادامه پیدا خواهد کرد. برای محاسبه ی ضریب جذب ساختار از نرم افزار کامسول استفاده شده است. ساختار کلی در شکل ۳ نشان داده شده است.

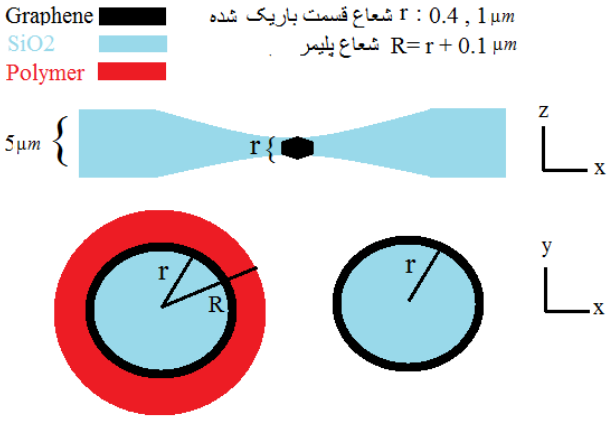
۳- نتایج

ما در این مقاله تاثیر میزان کشیدگی فیبر نوری را در عمق مدولاسیون و توان مورد نیاز برای اشباع را نشان می دهیم و از شعاع های ۱ و ۰/۴ میکرومتر فیبر نوری برای این منظور استفاده کرده ایم. پس از کشیدگی فیبر، شعاع قسمت باریک شده ۱ و ۰/۴ میکرومتر در نظر گرفته شده است. مدهای بدست آمده در نرم افزار کامسول در دو شعاع ۱ و ۰/۴ میکرومتر بدست آمده است.

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

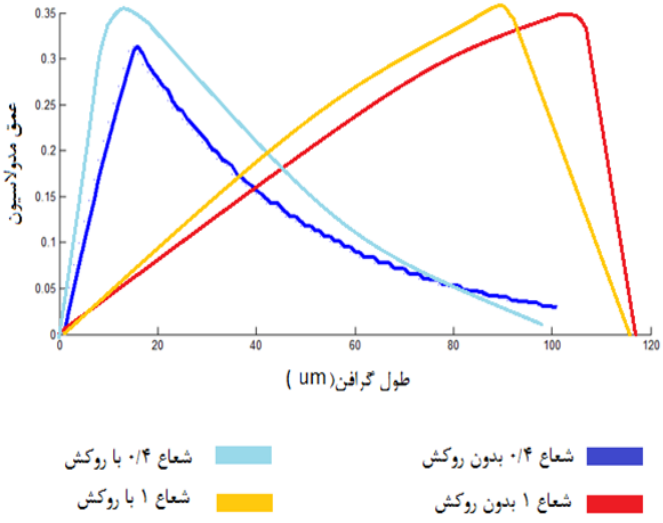
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-20]

در مد TM بعد از محاسبات در شعاع ۰/۴ میکرومتر به عمق مدولاسیون dB/μm ۰/۱۴ و در شعاع ۱ میکرومتر عمق مدولاسیون dB/μm ۰/۰۲۲ بدست آمد. همچنین توان مورد نیاز برای شعاع ۰/۴میکرومتر GW/cm^2 ۰/۳۸ و برای شعاع ۱ میکرومتر GW/cm^2 ۲/۸ است که این نشان دهنده ی کاهش چشمگیر توان مورد نیاز در کشیدگی بیشتر فیبر است.



شکل ۳- ساختار مدولاتور تمام نوری از دو جهت مختلف

گام بعدی اضافه کردن یک لایه پلیمر بر روی گرافن است که نتایج بدست آمده ارائه شده است. در این حالت نیز در دو شعاع کشیدگی ۰/۴ و ۱ میکرومتر نتایج بدست آمده است. مد بدست آمده برای این دو شعاع به صورت زیر است. در مد TM بعد از محاسبات در شعاع ۰/۴ میکرومتر با روکش پلیمری با ضریب شکست حدود ۱/۵به عمق مدولاسیون dB/μm ۰/۱۵ و در شعاع ۱ میکرومتر عمق مدولاسیون dB/μm ۰/۰۲۴ بدست آمد. تاثیر میزان کشیدگی بیشتر فیبر در عمق مدولاسیون در حالت روکش پلیمری چشمگیر است. هم چنین توان مورد نیاز برای شعاع ۰/۴میکرومتر GW/cm^2 ۰/۲۹ و برای شعاع ۱ میکرومتر GW/cm^2 ۲/۱ است که این نشان دهنده ی کاهش توان در هنگام اضافه کردن روکش پلیمری هست. پس نتیجه گیری کلی به این صورت است که می توان با کاهش شعاع قسمت باریک یا به عبارتی کشیدگی بیشتر فیبر، توان مصرفی و عمق مدولاسیون را بهبود بخشید. همچنین با اضافه کردن یک لایه پلیمری به صورت پوششی به دور گرافن توان مورد استفاده کاهش پیدا می کند. **مقالات منتشر شده بیشتر به صورت تجربی است. ما در این مقاله به صورت تئوری و با مدل سازی ریاضی ، توان و عمق مدولاسیون را بدست آوردیم. از همه مهم تر اینکه تاثیر میزان کشیدگی بیشتر را در عمق مدولاسیون و توان مورد نیاز بدست آوردیم . هم چنین تاثیر یک روکش پلیمری را نیز نشان دادیم که این برای اولین بار است که با این روش و با این روابط جدید مدل سازی ریاضی این کار را انجام دایدم که گام بسیار مهمی در کاهش مدل سازی و هزینه ها خواهد بود.**



شکل۴- عمق مدولاسیون در دو شعاع ۰/۴ و ۱ میکرومتر با و بدون روکش پلیمری در طول های مختلف گرافن

۴- منابع

[1]. Liu M, Yin X, Ulin-Avila E, Geng B, Zentgraf T, Ju L, et al. “A graphene-based broadband optical modulator.” Nature. 474:64–7و (2011)
[2]. Liu M, Yin X, Zhang X.” Double-layer graphene optical modulator”. Nano Lett.12:1482–5, (2012).
[۳]. A. Melikyan1, L. Alloatti1,A.Muslija1, D. Hillerkuss, P. C. Schindler1, J. Li1, R. Palmer1, D. Korn1.” High-speed plasmonic phase modulators” PUBLISHED ONLINE: 16 FEBRUARY (2014)
[4] R. Garcia-Fernandez, A. Stiebeiner, and A.Rauschenbeutel”Optical nanofibers andspectroscopy” Applied Physics B · May (2011)
[5]. Liu Z-B, Feng M, Jiang W-S, Xin W, Wang P, Sheng Q-W, et al.” Broadband all-optical modulation using a graphene-covered-microfiber”. Laser Phys Lett.10:065901,(2013).

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-20]