بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۶-۱۵ بهمن ۱۳۹۸

# طراحی و مدل سازی جاذب نوری تنظیم‌پذیر مبتنی بر ساختارهای هیبریدی گرافن-کریستال مایع

**حسن صادقی، هادی صوفی**

**دانشکده مهندسی برق- دانشگاه تبریز- تبریز- ایران**

**چکیده – در این مقاله یک جاذب نوری تنظیم پذیر مبتنی بر ساختار هیبریدی گرافن- کریستال مایع ارائه شده است. در این ساختار از یک توری سیلیکونی برای تنظیم طول موج به بازه مخابراتی و سپس اعمال ولتاژ به کریستال مایع برای تنظیم دقیق آن به طول موج مد نظر ا ستفاده شده ا ست. جاذب ارائه شده قادر به تنظیم طول موج جذب در بازه nm ۱۵۲۳ تا nm ۱۵۷۴ ا ست که این بازه، کل باند C و قسمتی از باند L مخابراتی را پوشش می دهد. نکته مهم این که، جاذب ارائه شده بسیار باند باریک است. به طوری که FWHM آن، تقریبا nm ۲/۲ بوده و لذا برای سیستم های مخابراتی مبتنی بر تسهیم طول موج بسیار منا سب می با شد. از این ساختار می توان برای طراحی افزاره های مختلف مخابراتی نظیر آشکارساز و یا مدولاتور بهره برد.**

کلید واژه- جاذب نوری تنطیم‌پذیر، کریستال مایع، گرافن.

# Design and modeling of tunable Absorber based on Graphene-Liquid Crystal hybrid structures

Hasan Sadeghi, Hadi Soofi

Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract- In this article a tunable optical absorber based on hybrid graphene- liquid crystal structure is presented. In this structure, a silicon grating is employed to adjust the absorption wavelength to the communication range. Afterwards, applying voltage to the liquid crystal can fine tune the absorption to the desired wavelength. The presented absorber can effectively tune the absorption wavelength in a range of 152**3** nm to 1574 nm which covers the entire C band plus a portion of the L band. It is worth noting that the presented absorber is ultra-narrow band having a FWHM of only 2.2 nm which makes it perfect for communication systems based on wavelength division multiplexing. The presented device can be utilized to design various devices such as photodetectors or modulators for optical communications.

Keywords: Tunable optical absorber, Liquid crystal, Graphene.



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

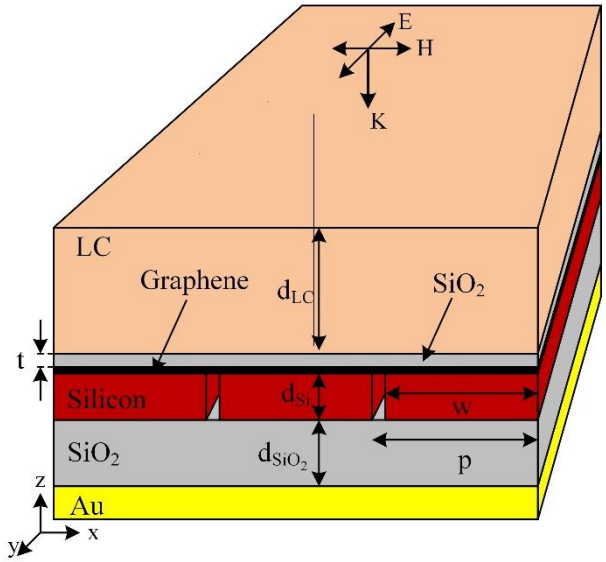
[ Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04 ]

## مقدمه

جاذب‌های نوری کاربرد وسیعی در حسگرها، سلول‌های خورشیدی، مدولاتورها، سوئیچ‌ها و آشکارسازهای نوری دارند. یکی از قسمت‌های مهم و پیچیده‌ی تمامی موارد ذکر شده در بالا، طراحی بخش جاذب نوری آنهاست. به طور مثال اینکه یک آشکارساز در چه حوزه‌ای از طول موج باید کار کند در طراحی قسمت جاذب نوری آن مشخص می‌شود. در این بین باند C مخابراتی[ ۱۵۶۱-۱۵۲۸] نانومتر و باند L مخابراتی[ ۱۶۲۰-۱۵۶۱] نانومتر، اهمیت و توجه ویژه‌ای پیدا کرده است[۱]. جاذب‌های نوری تنها می‌توانند در یک طول موج مشخص و یا حوزه‌ی بسیار محدودی از طول موج کار کنند. یک روش برای تغییر فرکانس جذب ساختار، تغییر هندسه‌ی ساختار است، در هر حال تنظیم‌پذیری دینامیکی چنین ساختارهایی بسیار مشکل است. استفاده از تغییر تراز فرمی گرافن هم به دلیل تنظیم‌پذیری بسیار ناچیز آن عملا قابل کاربرد نیست. یک پژوهش دیگر استفاده از عملکرد حرارتی و الکترواستاتیکی فناوری MEMS می‌باشد که به دلیل سرعت تنظیم‌پذیری کم، توان مصرفی بالا و اندازه بسیار بزرگ آن، طراحی پیچیده و ساخت پرهزینه‌ای دارد[۲]. جایگزین مناسب برای همه‌ی این راه حل‌ها استفاده از کریستال مایع است که می‌تواند یک تنظیم‌پذیری بزرگی را در ضریب شکست با اعمال ولتاژ متوسط و توان مصرفی پایین فراهم کند. اساس کار کریستال‌های مایع به این صورت است که با اعمال ولتاژ به دو سر کریستال جهت مولکول‌های کریستال مایع تغییر می‌کنند و این باعث تغییر ضریب شکست مؤثر کریستال مایع می‌شود. در مقاله‌ی حاضر جاذب نوری تنظیم‌پذیری ارائه شده است که بدون هیچ‌گونه تغییر مکانیکی ساختار، تنها با تغییر ولتاژ AC اعمالی به دو سر کریستال مایع، مولکول‌های کریستال به عنوان فیلتر تنظیم‌پذیر فبری-پرو LC-FP [۳] عمل می‌کنند و تنظیم‌پذیری بیش از ۵۰ نانومتر را در اطراف طول موج ۱۵۵۰ نانومتر فراهم می‌کنند. این تنظیم‌پذیری باند C مخابراتی را به طور کامل و بخشی از باند L را پوشش می‌دهد. این جاذب نوری در طول موج ۱۵۶۳ نانومتر در حالی یک جاذب کامل است( جذب ۱۰۰٪ ) که FWHM آن ۲/۲ نانومتر است و این برای کاربردهای مخابرات نوری بسیار حائز اهمیت است.

## طراحی و مدل‌سازی جاذب نوری تنظیم‌پذیر

نمای سه بعدی از جاذب پیشنهادی در شکل۱ دیده می‌شود.یک لایه دی الکتریک به ضخامت $t=۵\ nm$ روی تک لایه گرافن قرار داده شده است تا علاوه بر ولتاژ DC گیت گرافن، اعمال ولتاژ AC جداگانه به کریستال مایع به سهولت انجام شود. ضخامت کریستال مایع $d_{LC}=۱/۹\ \mu m$ است. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌کنید، شبکه‌ای از ماده سیلیکون به ضخامت $d_{Si}=۱۱۰\ nm$ که تنها در یک جهت یعنی جهتX به صورت متناوب تکرار می‌شود، زیر لایه‌ی گرافن قرار داده شده است. چگونگی عملکرد طراحی این شبکه سیلیکونی بر اساس نظریه‌ی CLMT[۴] انجام شده است. w عرض شبکه و p طول دوره تناوب است.




شکل۱. ساختار جاذب نوری تنظیم‌پذیر مبتنی برساختار هیبریدی گرافن-کریستال مایع

نظریه CLMT یک مدل تئوری قدرتمند برای تحلیل طول‌موج تشدید جذب نور در نانوساختارهای نیمه‌هادی



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

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04 ]

است، به این صورت که جذب نانوساختار با کوپلینگ نوری مابین نور ورودی و مد نشتی ساختار تعیین می‌شود و با فرض یک طول‌موج تشدید جذب مشخص (۱۵۵۰ نانومتر) با استفاده روش طراحی معکوس بر مبنای مدل CLMT ضرایب شکست قسمت‌های مختلف ساختار به ترتیب بدست می‌آید[۴]. بر اساس نظریه‌ی CLMT و برای تنظیم عملکرد جاذب نوری در باند C، w=۶۷۲ nm، p=۶۹۲ nm و ضخامت سیلیکون $d_{Si}$=۱۱۰ $nm$ بدست آمده است. ارتفاع بستر دی الکتریک ما بین طلا و سیلیکون هم $d_{Sio_2}$=۲۰۰ $nm$ است. نرخ پراکندگی ۰٫۰۰۳۳ eV و پتانسیل شیمیایی گرافن ۰٫۴۵ $eV$ بدست آمده است. کریستال مایعی که در این مقاله استفاده شده است W1791LC نام دارد. ضریب دو شکستی کریستال $\Delta n = n_e - n_o$=۰/۴ است. $n_o$=۱/۵۳ و $n_e$=۱/۹۴ که به ترتیب ضریب شکست عادی و غیرعادی کریستال در طول موج ۱۵۵۰ $nm$ هستند. ضرایب الاستیک کریستال مایع $k_{11} = 21.2pN$، $k_{22} = 8.3pN$ و $k_{33} = 25.2pN$ و در ولتاژ AC اعمالی در فرکانس $1.5kHz$ دارای ضرایب دی الکتریک $\varepsilon_{\parallel} = 20.9, \varepsilon_{\perp} = 4.5$ هستند[۵]. ولتاژ آستانه‌ی کریستال مایع از رابطه‌ی $V_{th} = \pi.(k_{11}/(\varepsilon_0.\Delta\varepsilon))^{1/2} L/d$ [۶] به‌دست می‌آید. $\varepsilon_0 = 8.85\times10^{-12} F.m^{-1}$، $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp} = 16.4$ و $L = 2\mu m$ و $d = 1.9\mu m$ که به ترتیب ضریب گذردهی الکتریکی خلا، ضریب دی الکتریک ناهمسانگرد، فاصله‌ی بین دو الکترود کریستال مایع و ضخامت کریستال می‌باشند.ولتاژ آستانه کریستال مایع 1.1v بدست می‌آید. با اعمال ولتاژ AC به کریستال مایع، زمانی که دامنه‌ی ولتاژ از ولتاژ آستانه فراتر رفت، مولکول‌های کریستال مایع شروع به تغییر جهت دادن می‌کنند که رابطه‌ی بین بیشترین تغییر زاویه $\theta_{max}$ و $V$ ولتاژ اعمالی از حل عددی معادله‌ی زیر بدست می‌آید[۶]:

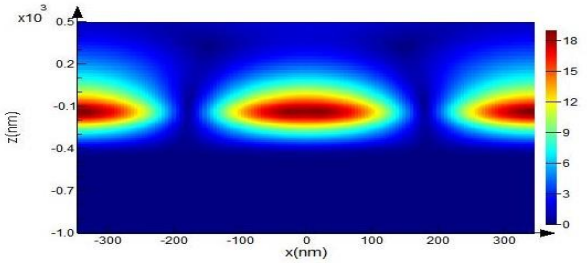
$$\frac{V}{V_{th}} = \frac{2}{\pi}\int_0^{\frac{\pi}{2}} \left( \frac{\cos^2\theta + (k_{33}/k_{11})\sin^2\theta}{\sin^2\theta_{max} - \sin^2\theta} \right)^{\frac{1}{2}} d\theta \quad (۱)$$

با مشخص شدن $\theta_{max}$ با استفاده از یک تغییر متغیر مناسب برای رابطه‌ی بالا می‌توان تغییر زاویه را هم بر حسب ولتاژ اعمالی بدست آورد. ضریب شکست مؤثر کریستال مایع از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$n_{eff}(\theta) = \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_e \cos^2\theta + n_o \sin^2\theta}} \quad (۲)$$

## نتایج و بحث

شبیه‌سازی جاذب نوری تنظیم‌پذیر ارائه شده در این مقاله با روش FDTD انجام شده است. شکل ۲ توزیع میدان الکتریکی نور در فرکانس تشدید ساختار در راستای Z را نشان می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رفت شدت میدان الکتریکی در اطراف شبکه‌ی متناوب سیلیکن و گرافن نسبتا زیاد است. البته ساختار طوری طراحی شده است که مولکول‌های کریستال مایع هم میدان الکتریکی نوری لازم برای حساسیت به ضریب شکست متناسب با تنظیم‌پذیری مورد نظر را احساس کنند.



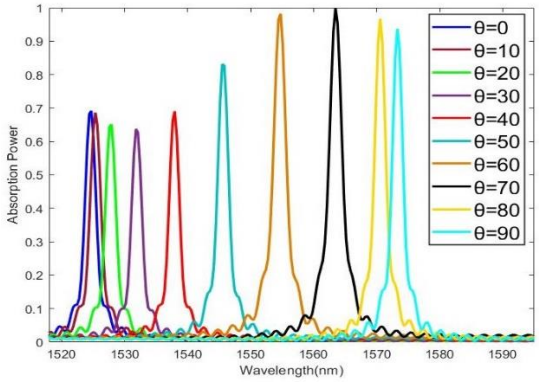

شکل۲ . توزیع میدان الکتریکی در فرکانس تشدید ساختار.

شکل ۳ طیف جذب نوری ساختار در مدهای تشدید فبری-پرو بر حسب جهت‌های مختلف مولکول‌های کریستال مایع متناسب با ولتاژ اعمالی را نشان می‌دهد. این مدهای تشدید فبری-پرو بر حسب $\theta$های متناسب با ولتاژ اعمالی، به صورت مجزا با روش FDTD شبیه سازی شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تنظیم‌پذیری بیش از ۵۰nm با FWHM کم نظیر ۲/۲nm به ثبت رسیده است.



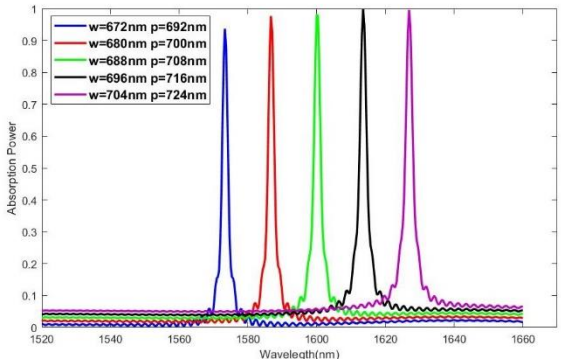
این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04 ]




شکل۳ .نمودار طیف جذب جاذب نوری تنظیم‌پذیر برحسب $\theta$ های متناسب با ولتاژ اعمالی به کریستال مایع.

همانطور که قبلا اشاره شد با تغییر هندسه‌ی ساختار می‌توان طول موج تشدید ساختار را تغییر داد. در شکل ۴ با تغییر w و p می توان جذب ساختار را به طول موج‌های بالاتر انتقال داد.




شکل ۴. نمودار طیف جذب بر حسب w و p های مختلف و $\theta$ ثابت کریستال مایع.

همانطور که در شکل۴ مشاهده می‌شود با افزایش عرض شبکه توری سیلیکونی و طول دوره‌ی تناوب، همزمان با ثابت نگه داشتن گپ توری سیلیکونی به اندازه‌ی ۲۰nm طول موج جذب ساختار به مقادیر بالاتر انتقال می یابد. در واقع با تغییر w و p می‌توانیم طول موج جذب ساختار را به باندهای مختلف مخابراتی انتقال داده و با کمک کریستال مایع تنظیم‌پذیری مورد نظر را اعمال کنیم.

## نتیجه گیری

در این مقاله نشان داده شد که می‌توان از کریستال مایع برای تنظیم‌پذیری ساختارهای جاذب نوری بهره برد. همچنین نشان داده شد که بدون تغییر مکانیکی قسمت‌های مختلف ساختار و تنها با اعمال ولتاژ به دو سر کریستال مایع و تغییر دامنه‌ی آن به تنظیم‌پذیری مورد نظر دست یافت. در این مقاله جاذب نوری تنظیم‌پذیری طراحی شده است که باند C مخابراتی را به طور کامل و بخشی از باند L مخابراتی را هم پوشش می‌دهد.FWHM این جاذب نوری در طیف اشاره شده ۲/۲nm است که آن را برای کاربردهای مخابراتی ایده آل می سازد.

## مرجع‌ها

**[1]** M. Casalino, G. Coppola, R. M. De La Rue, and D. F. Logan,“Stateof-the-art all-silicon sub-bandgap photodetectors and telecom and datacom wavelengths,” Laser Photon. Rev., vol. 10, pp. 895–921, 2016.

**[2]** L. P. Schuler, J. S. Milne, J. M. Dell, and L. Faraone, “MEMS-based microspectrometer technologies for NIR and MIR wavelengths,” J. Phys. D Appl. Phys. 42(13), 133001 (2009).

**[3]** J. Lin, Q. Tong, Y. Lei, Z. Xin, X. Zhang, A. Ji, H. Sang, and C. Xie, “An arrayed liquid crystal Fabry–Perot infrared filter for electrically tunable spectral imaging detection,” IEEE Sens. J. 16(8), 2397–2403 (2016).

**[4]** Yu YL, Cao LY (2012) “ Coupled leaky mode theory for light absorptionin2D,1D,and 0D semiconductor nanostructures”.Opt Express 20(13):13847–13856.

**[5]** RASZEWSKIZ.,KRUSZELNICKINOWINOWSKI E., KĘDZIERSKI J., PERKOWSKI P., PIECEK W., DĄBROWSKI R., MORAWIAK P., OGRODNIK K.,“Electrically tunable liquid crystal filters, Molecular Crystals and Liquid Crystals” **525**(1), 2010 pp. 112–127.

**[6]** Yeh, P.; Gu, C. “Optics of Liquid Crystal Displays”; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 1



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

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04 ]