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

حسگر اپتیکی بر پایه شفافیت القایی پلاسمونی در فراماده گرافنی

عبدالرسول قرائتی[۱]، جمال ایزدشناس جهرمی[۲]

[۱]استاد گروه فیزیک دانشگاه پیام نور، تهران، agaraati@pnu.ac.ir

[۲]دانشجوی ارشد فیزیک دانشگاه پیام نور، تهران، vahidizadshenas@gmail.com

چکیده - در این کار به حل عددی یک ساختار فراماده متشکل از گرافن پرداخته می‌شود که در آن دو میله گرافنی بر روی یک دی‌الکتریک قرارگرفته‌اند. درواقع برهمکنش مخربی که بین دو مد پلاسمونی روشن-تاریک در این ساختار ایجاد می‌شود منجر به ایجاد شفافیت القایی در پاسخ‌های طیفی می‌شود. برای مشاهده پنجره روشن از شکست تقارن در ساختار استفاده شده است. علاوه بر این با تغییر ولتاژ ورودی گرافن یا تغییر در آلایش شیمیایی گرافن می‌توان محدوده این روزنه روشن را کنترل کرد که محدوده مادون‌قرمز دور را پوشش می‌دهد. بنابراین از دو طریق شکست تقارن در ساختار و پتانسیل شیمیایی کنترل محدوده رزونانسی ایجاد می‌شود. ضریب شکست نور در این ساختار برابر با ۳۶۱/۳ است و حساسیت این ساختار برابر با ۲۰um/RIU محاسبه شده است. کاربردهای که از این نوع ساختار ایجاد می‌شود در کلیدهای نوری، کند سازی نور، حسگرهای زیستی است.

کلید واژه- شفافیت القایی پلاسمونی، شفافیت القایی الکترومغناطیسی، حسگر، گرافن، کنترل پذیری

Optical sensor based on plasmon induced transparency in metamaterial graphene

Abdolrasoul Gheraati[1], Jamal Izadshenas Jahromy[2]
[1]Professor of Department of Physics, Tehran, agharaati@pnu.ac.ir
[2]Student of physics, Tehran, vahidizadshenas@gmail.com

Abstract- In this work, considers the numerical solution of a metamaterials structure consisting of graphene in which two graphene bars are on a dielectric. Actually, the destructive interaction occurred in this structure between the two bright-dark plasmonic modes leads to stimulated transparence in spectral responses. In fact, observe induced transparency by symmetry breaking in structure. Furthermore, controls the scope of this clear aperture by changing the graphene input voltage and changes in the chemical doping of graphene covered the far infrared range. So, in two ways, resonance range controls which are that symmetry breaking in structure and chemical potential. Reduce of group velocity is order of 361.3 and sensitivity of this structure calculated as 20 um/RIU. Results show that graphene metamaterials may offer new possibilities for applications in optical switches, light slowing and biosensors.

Keywords: Plasmon Induced Transparency (PIT), Electromagnetically Induced Transparency (EIT), Sensors, Graphene, Tunablity.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-24]

مقدمه

شفافیت القایی الکترومغناطیسی(EIT) یک اثر کوانتومی است که در سیستم‌های اتمی رخ می‌دهد و باعث کاهش جذب در محیط می‌شود. روش‌های متفاوتی برای ایجاد EIT معرفی‌شده است که از سیستم‌های نوسانی کلاسیک استفاده‌شده است همانند: استفاده از تشدیدکننده‌های میکرو و جریان‌های الکتریکی است[۱]. شفافیت القایی پلاسمونی روشی جدید برای ایجاد پدیده شبه EIT است که به‌تازگی توجه زیادی را به خود جلب کرده است و کاربردهای همچون طراحی حسگرها، ذخیره‌سازی اطلاعات، مبدل قطبش، کلیدهای اپتیکی و مدولاتورها دارد. شفافیت القایی پلاسمونی با در کنار هم قرار گرفتن مدهای تاریک روشن پلاسمونی صورت می‌گیرد. درواقع برهمکنش مخربی که از این دو مد تاریک و روشن ایجاد می‌شود پدیده شفافیت القایی پلاسمونی(PIT) را ایجاد می‌کند که باعث کاهش جذب و ایجاد نور کند در نانو ساختارها می‌شود[۲].

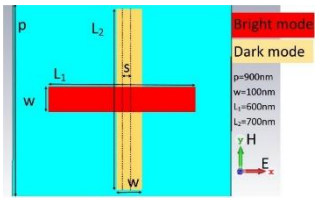
توانایی کنترل محدوده فرکانسی در ساختارهای فرامواد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تابه‌حال ساختارهای زیادی برای روش PIT پیشنهادشده است که در بیشتر این ساختارها از فلزات نجیب همچون طلا و نقره استفاده‌شده است. روش‌های متفاوتی برای ایجاد کنترل‌پذیری فرکانس تشدید وجود دارد که می‌توان به مواد غیرخطی و کریستال‌های مایع اشاره کرد. در کار حاضر ساختاری معرفی می‌شود که از گرافن به‌جای فلزات نجیب استفاده‌شده است. رفتار رسانندگی الکتریکی گرافن در محدوده تراهرتزی همانند فلزات نجیب است. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های گرافن رسانندگی قابل‌کنترل آن است که توسط پتانسیل شیمیایی یا تغییر ولتاژ قابل‌کنترل است. رسانندگی گرافن در غیاب میدان مغناطیسی از طریق فرمول کوبو تخمین زده می‌شود. رسانندگی الکتریکی گرافن شامل دو قسمت درون باندی و میان باندی است که در محدوده تراهرتزی سهم برهمکنش‌های درون باندی غالب است که در زیر رسانندگی الکتریکی گرافن را مشاهده می‌کنیم[۳].

$$\sigma = \frac{j}{\omega + j/\tau}\frac{e^2 2k_B T}{\pi\hbar^2}\ln\left[2\cosh\frac{\mu_c}{2k_B T}\right] \qquad (۱)$$

که در آن τ آهنگ واهلش برای گذارها است، μ_c پتانسیل شیمیایی، T دما برحسب درجه کلوین، ω فرکانس زاویه‌ای است. برای محاسبه تابع دی‌الکتریک گرافن از $\varepsilon = 1 + \frac{i\sigma}{\omega\varepsilon_0 d}$ استفاده می‌کنیم که در آن d ضخامت گرافن استفاده‌شده در ساختار است.

هندسه و ساختار

در این ساختار پیشنهادی از دو میله از جنس گرافن استفاده‌شده است که بر روی یک بستر از جنس شیشه قرار دارد که ضخامت دو میله گرافنی ۱ nm و ضخامت زیر لایه ۱۰۰ nm است که در شکل(۱) مشاهده می‌شود. این ساختار به‌صورت دوره‌ای بوده و نور در راستای z بر آن می‌تابد[۴].



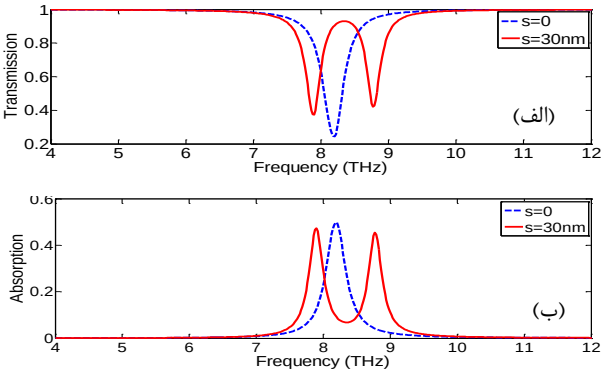
شکل ۱: شماتیک نانوساختار پلاسمونی

همان‌طور که از شکل(۱) مشخص است میله افقی با رنگ قرمز، مد روشن است و میله عمودی با رنگ زرد مد تاریک ساختار است. همان‌طور که قبلاً بحث شد برای تولید PIT اصلی‌ترین نقش را بر هم زدن تقارن در ساختار ایفا می‌کند. در این ساختار برای بر هم زدن تقارن از جابه‌جا کردن میله عمودی به سمت راست استفاده می‌کنیم. به‌این‌ترتیب که میله عمودی را با گام‌های ۵ nm به سمت

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

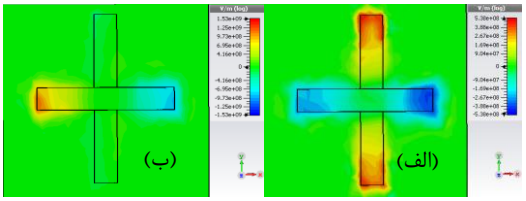
[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-24]

راست حرکت می‌دهیم و اثر بر هم زدن تقارن را در پاسخ‌های طیفی ساختار بررسی می‌کنیم. در ابتدا میله عمودی در مرکز میله افقی قرار دارد که تنها یک تک رزونانس در پاسخ طیفی آن‌ها مشاهده می‌کنیم که نشان از جفت‌شدگی ضعیف بین دو میله گرافنی است اما در مرحله بعد میله عمودی را جابه‌جا می‌کنیم و اثر آن را در پاسخ‌های طیفی بررسی می‌کنیم.



شکل ۲: نمودارهای (الف)عبور (ب)جذب برای دو حالت متقارن و همراه با شکست تقارن در هندسه ساختار

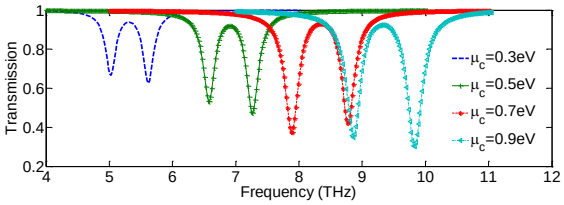
همان‌طور که در شکل(۲) مشاهده می‌کنیم زمانی که میله عمودی در مرکز میله افقی قرار دارد تنها یک تک رزونانس مشاهده می‌شود اما با جابجا کردن میله عمودی یا به عبارتی بر هم زدن تقارن در هندسه ساختار مشاهده می‌شود که پدیده PIT در پاسخ‌های طیفی ظاهر می‌شود. همان‌طور که در شکل(۲) مشاهده می‌شود با شکست تقارن در ساختار جذب به‌شدت کاهش پیدا می‌کند که یکی از ویژگی‌های پدیده EIT است. برای توجیه این پدیده به بررسی توزیع میدانی الکتریکی در این ساختار می‌پردازیم. در ابتدا میله عمودی در مرکز میله افقی قرار دارد که همان‌طوری که در شکل(۳) قسمت (الف) مشاهده می‌کنیم، در ابتدا میله افقی به یک دوقطبی الکتریکی تبدیل‌شده است که دلیل بر وجود یک تک فرکانس در حالت S=0 است. شکل(۳) قسمت (ب) توزیع‌های میدانی را برای حالت عدم تقارن نمایش می‌دهد که دو میله تشکیل یک چهار قطبی الکتریکی داده‌اند. بنابراین برهمکنش مخربی که این دو مد روشن و تاریک ایجاد می‌کنند پدیده PIT را در پاسخ‌های طیفی ایجاد می‌کند که باعث کاهش شدید جذب می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که برهم زدن تقارن در هندسه ساختار سبب تغییر در توزیع‌های میدانی الکتریکی و تولید PIT می‌شود.



شکل ۳: توزیع میدان الکتریکی (الف) در حالت متقارن (ب) در حالت شکست تقارن

کنترل پذیری محدوده تراهرتز

یکی از ویژگی‌های فوق‌العاده گرافن تغییرپذیر بودن رسانندگی الکتریکی گرافن است. در بازه تراهرتزی تغییرات پتانسیل شیمیایی بسیار چشم‌گیر است. درواقع تغییرات پتانسیل شیمیایی به‌وسیله تغییر در ولتاژ ورودی یا تغییر در آلایش‌های شیمیایی امکان‌پذیر است[۵].



شکل ۴: نمودار عبور بر حسب فرکانس با تغییر پتانسیل شیمیایی

در شکل(۴) با تغییر در پتانسیل شیمیایی یک انتقال فرکانسی در محدوده تراهرتزی مشاهده میشود چرا که با تغییر پتانسیل شیمیایی، چگالی حامل‌های بار در گرافن تغییر می‌کند. این کاربرد بسیار مهمی برای گرافن محسوب می‌شود چون با یک ساختار گرافنی می‌توانیم طیف وسیعی از محدوده فرکانسی را پوشش دهیم.

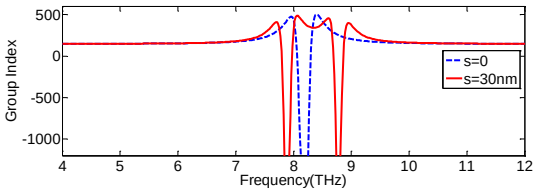
بررسی اثر کاهش سرعت گروه

یکی از ویژگی‌های پدیده EIT کاهش سرعت گروه است[۱]. کاهش سرعت گروه نقش مهمی در ذخیره‌سازی اطلاعات اپتیکی دارد. مثبت و منفی بودن ضریب گروه به

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-24]

معنای کندی و تندی سرعت گروه است[۶]. سرعت گروه از طریق رابطه $V_g = \frac{c}{N_g}$ محاسبه می‌شود که در آن V_g سرعت گروه و c سرعت نور و N_g ضریب گروه است.

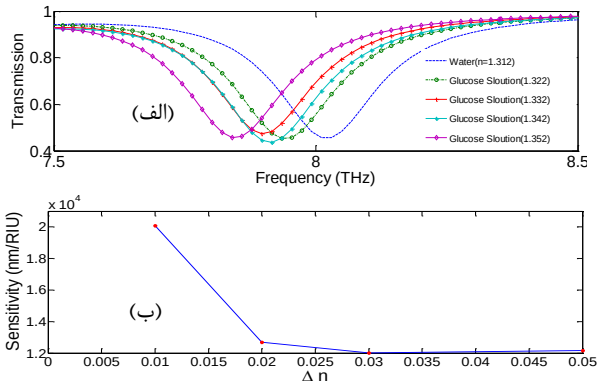


شکل ۵: نمودار ضریب گروه برای حالت متقارن و شکست تقارن

در شکل(۵) در حالتی که ساختار در تقارن کامل است هیچ کاهش سرعت گروهی مشاهده نمی‌شود درصورتی‌که با از بین بردن تقارن در ساختار کاهش سرعت گروه از مرتبه ۳۶۱,۳ مشاهده می‌شود که نسبت به [۲] که سرعت گروه از مرتبه ۱۱۰ کاهش می یابد بسیار قوی‌تر است.

بررسی اثر حسگر اپتیکی

یکی از ویژگی‌های جالب فرامواد حساسیت آن‌ها به ضریب شکست محیط اطراف هست که به آن قابلیت طراحی حس‌گرهای وابسته به ضریب شکست می‌دهد[۷].



شکل۶: نمودار (الف)عبور (ب) حساسیت با تغییر ضریب شکست محیط اطراف

همان‌طور که در شکل(۶) مشاهده می‌شود ساختار را درون آب و گلوکز با ضریب شکست‌های مشخص قرار داده‌ایم و نمودار عبور و حساسیت این نانو ساختار را محاسبه کردیم که حساسیت این نانوساختار برابر با um/RIU ۲۰ است که نسبت به[۷] که مقدار nm/RIU ۹۲۸,۹ محاسبه شده است بسیار بالاتر است.

نتیجه‌گیری

در کار حاضر یک ساختار فرامادی مبتنی بر گرافن معرفی شده است که با برهم زدن تقارن در هندسه ساختار، میزان جذب در فرکانس تشدید را به شدت کاهش داده و مقدار ان به کمتر از یک درصد رسیده است. همچنین با استفاده از قابلیت‌های شگفت انگیز گرافن، محدوده تراهرتزی پوشش داده شده است. در مرحله بعد به بررسی سرعت گروه پرداخته شد که کاهش سرعت گروه از مرتبه ۳۶۱,۳ محاسبه‌شده است. در آخر به بررسی پارامتر حساسیت حس‌گر پرداخته شد که مقدار حساسیت آن برابر با um/RIU ۲۰ محاسبه شد.

مرجع‌ها

[1] Y. Fan, T. Qiao, F. Zhang, Q. Fu, J. Dong, B. Kong, and H. Li; “An electromagnetic modulator based on electrically controllable metamaterial analogue to electromagnetically induced transparency” Scientific reports 7, (2017) 40441.

[2] X. Zhao, C. Yuan, L. Zhu, and J. Yao; “Graphene-based tunable terahertz plasmon-induced transparency metamaterial” Nanoscale 8, No. 33, (2016) 15273-15280.

[3] L. A. Falkovsky; “Optical properties of graphene” In Journal of Physics: Conference Series 129, No. 1, 012004, 2008.

[4] C. Sun, J. Si, Z. Dong, and X. Deng; “Tunable multispectral plasmon induced transparency based on graphene metamaterials” Optics express 24, No. 11, (2016) 11466-11474.

[5] J. Ding, B. Arigong, H. Ren, M. Zhou, J. Shao, M. Lu, Y. Chai, Y. Lin, and H. Zhang; “Tuneable complementary metamaterial structures based on graphene for single and multiple transparency windows” Scientific reports 4, (2014) 6128.

[6] X. Shi, D. Han, Y. Dai, Z. Yu, Y. Sun, H. Chen, X. Liu, and J. Zi; “Plasmonic analog of electromagnetically induced transparency in nanostructure graphene” Optics express 21, No. 23, (2013) 28438-28443.

[7] X. J. He, L. Wang, J. M. Wang, X. H. Tian, J. X. Jiang, and Z. X. Geng; “Electromagnetically induced transparency in planar complementary metamaterial for refractive index sensing applications” Journal of Physics D: Applied Physics 46, No. 36, (2013) 365302.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-24]

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