شفافیت القایی پلاسمونی در فراماده گرافنی با کاربرد حسگر ضریب شکست

مصطفی خالقی[۱و۲] ، مجتبی ثروت خواه[۲و*]

۱- گروه فیزیک، پردیس علوم و تحقیقات فارس، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران
۲- گروه فیزیک، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران

چکیده - در پژوهش حاضر یک ساختار پلاسمونی بر پایه فرامواد معرفی شده است که دو مد پلاسمونی را پشتیبانی می‌کند. با کنار هم قرار دادن این دو مد روشن و تاریک می‌توان جذب را به شدت کاهش داد و در ساختار، سرعت نور را کند نمود. کاهش سرعت گروه در این ساختار از مرتبه ۲۷۸ است. همچنین در فرکانس تشدید با برهم زدن تقارن در ساختار، میزان عبور تا ۹۸،۴۴ درصد می رسد. با جایگزین کردن گرافن به جای طلا و نقره می توان از خاصیت رسانندگی الکتریکی آن استفاده کرد. با تغییر ولتاژ می توان یک انتقال فرکانسی به محدوده تشدید داد که در این کار محدوده ۸ تا ۱۸ تراهرتزی را پوشش داده ایم. با استفاده از خاصیت حسگری این ساختار، برای موادی با ضریب شکست های متفاوت حساسیت ساختار برابر $9.439\ ^{\mu m}/_{RIU}$ محاسبه شده است. در واقع کاربرد چنین ساختاری برای ذخیره سازی اطلاعات و حسگری، فیلترها و سوییچ ها است.

کلید واژه- حسگر، شفافیت القایی پلاسمونی، کاهش سرعت گروه، گرافن.

Plasmon Induced Transparency in graphene metamaterials for refractive index sensing

Mostafa Khaleghi1,2, Mojtaba Servatkhah2,*

1,2- Department of Physics ,Fars Science and Research Branch , Islamic Azad University, Marvdasht , Iran

1,2-Department of Physics, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran

Abstract- In the present study, a *metamaterial-based plasmonic structure has been proposed, which supports two plasmonic modes. By combining these two bright and dark modes, the absorption can be greatly reduced and the speed of light slows down in the structure. The reduction of group velocity of order 278 in the structure. Also, at resonant frequency, the transmission rate reaches 98.44% by breaking the symmetry in the structure. By replacing graphene with gold and silver, its electrical conductivity can be used. A frequency transfer to the resonant range can be done by changing the voltage, so that we have covered a* 8–18 *THz range. Using the sensor property of the structure for materials with different refractive indices, the refractive index sensitivity measured 9.439* $^{\mu m}/_{RIU}$ *. In fact, the application of such a structure is for information storage, sensing, filters and switches.*

Keywords: Sensor, Plasmon Induced Transparency, Slow light, Graphene

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

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

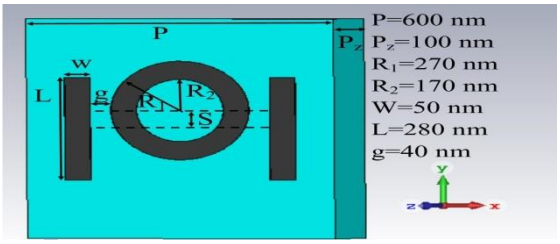
۱- مقدمه

شفافیت القایی الکترومغناطیسی (EIT) که از طریق برهم کنش مخرب، توسط دو باریکه لیزری در سیستم های کوانتومی ایجاد می شود، کاربردهای فراوانی در کندسازی نور و ذخیره سازی اطلاعات دارد[۱]. دانشمندان روش‌های متفاوتی را برای ایجاد EIT استفاده کرده‌اند که از سیستم‌های نوسانی کلاسیک استفاده شده است، همانند: استفاده از تشدیدکننده‌های میکرو، جریان‌های الکتریکی و ... [۲]. از آنجایی که بررسی اثر EIT محدودیت های آزمایشگاهی فراوانی دارد، ما از یک اثر مشابه به نام شفافیت القایی پلاسمونی(PIT) استفاده می کنیم. مدهای پلاسمونی دارای دو حالت روشن و تاریک هستند که بستگی به نوع جفت‌شدگی نور فرودی با المان‌های ساختار دارد. مد روشن به طور مستقیم با نور فرودی برهمکنش می‌کند و میزان پراکندگی زیاد و ضریب کیفیت پایینی دارد. برخلاف مد روشن، مد تاریک با نور فرودی به صورت مستقیم برهم کنش نمی‌کند و دارای ضریب کیفیت بالایی است. با کنار هم قرار دادن این دو مد تاریک و روشن، برهم کنش قوی بین این دو مد صورت می گیرد که مشابه پدیده EIT در سیستم‌های سه ترازی اتمی است. از مهم‌ترین نتایج روش PIT کنترل جذب در محدوده فرکانسی و کاهش سرعت گروه است. استفاده از فراماده تخت یکی از روش های مناسب برای ایجاد شفافیت القایی پلاسمونی است[۳].

گرافن به عنوان یک ماده پلاسمونی جدید در فوتونیک و اپتوالکترونیک که خواص اپتیکی منحصر به فردی دارد در نظر گرفته شده است. گرافن در محدوده مادون قرمز میانی و تراهرتز خواص فوق العاده ای دارد، از جمله رسانندگی گرمایی و رسانندگی الکتریکی قابل کنترل با تغییر ولتاژ. رسانندگی قابل کنترل به وسیله ولتاژ، این امکان را به ما می دهد که شفافیت القایی پلاسمونی را کنترل کنیم[۴]. در واقع با استفاده از فراماد گرافنی برای طراحی شفافیت القایی پلاسمونی دیگر نیاز به طراحی های مجدد برای تغییر فرکانس تشدید نیست. با استفاده از این قابلیت گرافن، یک شفافیت القایی پلاسمونی قابل کنترل ایجاد شده است که کاربردهای کندسازی نوری، سوییچ ها، فیلترها، ذخیره سازی اطلاعات را دارد. رسانندگی گرافن در غیاب میدان مغناطیسی از طریق فرمول کوبو تخمین زده می‌شود[۵]. رسانندگی الکتریکی گرافن شامل دو قسمت درون باندی و میان باندی است که در محدوده تراهرتزی سهم برهم کنش‌های درون باندی غالب است. در نتیجه رسانندگی الکتریکی گرافن از طریق زیر به دست می آید:

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

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 $\varepsilon = 1 + \frac{j\sigma}{\omega\varepsilon_0 d}$ استفاده می‌کنیم که در آن d ضخامت گرافن استفاده‌شده در ساختار است.



شکل ۱: شماتیک فراماده گرافنی

۲- نتایج و مباحث

شکل (۱) شماتیک نانو ساختار فراماده ای را نشان می دهد [6-7] که در اثر اعمال نور فرودی بر ساختار، حلقه گرافنی نقش مد روشن و دو میله موازی نقش مد تاریک را ایفا می کنند. در این نانو ساختار برای ایجاد شفافیت القایی پلاسمونی از شکست تقارن استفاده می کنیم که پارامتر شکست تقارن در ساختار S است که با گام های ۱۰ نانومتری افزایش می یابد و نتایج حالت کاملا متقارن(S=0) و شکست تقارن (S=50 nm) نمایش داده شده است.

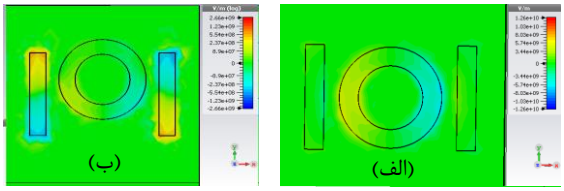
زمانی که ساختار در حالت کاملا متقارن(S=0) قرار دارد تنها یک تشدید در پاسخ های اپتیکی رخ می دهد که مقدار عبوری برابر با ۱۲,۱۳ درصد و جذبی برابر با ۴۵,۲۷ درصد در فرکانس تشدید ۱۲,۰۸ تراهرتز دارد. و در ساختار تنها یک دو قطبی الکتریکی در حلقه ایجاد شده است و نشان دهنده مد روشن بودن حلقه گرافنی است که به صورت مستقیم با نور فرودی برهمکنش کرده است که

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

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

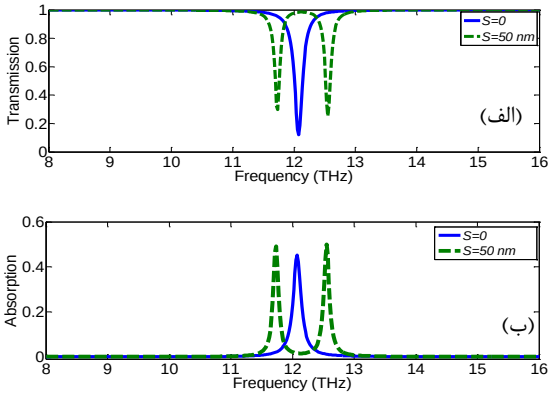
در شکل (۲-الف) نشان داده شده است.

حال با شکست تقارن در ساختار، شفافیت القایی پلاسمونی ایجاد خواهد شد که علت آن تحریک مد تاریک است که در آن مد تاریک به صورت غیر مستقیم با نور فرودی برهمکنش می کند و باعث ایجاد یک چهارقطبی الکتریکی در دو میله موازی می شود که در شکل(۲- ب) نمایش داده شده است.



شکل ۲: نمودار توزیع میدان الکتریکی در
حالت (۲-الف) کاملا متقارن
و حالت (۲-ب) شکست تقارن

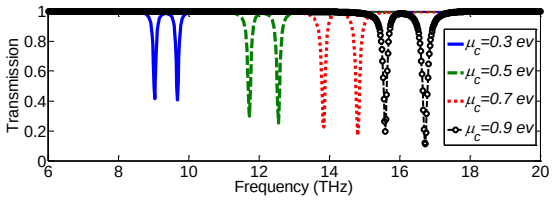
همان طور که از پاسخ های اپتیکی در شکل (۳) مشخص است با شکست تقارن در ساختار، مقدار عبور به ۹۸,۴۴ درصد و مقدار جذب به ۰,۱۵ درصد می رسد، که یکی از پیامدهای شفافیت القایی پلاسمونی کاهش شدید جذب در فرکانس تشدید است.



شکل ۳: نمودار عبور (شکل۳-الف) و جذب (شکل۳-ب) برای حالت کاملا متقارن و شکست تقارن

۲-۱- بررسی کنترل پذیری محدوده فرکانسی

یکی از ویژگی‌های فوق‌العاده گرافن تغییرپذیر بودن رسانندگی الکتریکی گرافن است. رسانندگی گرافن در بازه تراهرتزی به چهار پارامتر دما، فرکانس زاویه‌ای، زمان واهلش حامل‌های بار و پتانسیل شیمیایی وابسته 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[۸]. در شکل(۴) نحوه تغییر در پاسخ‌های طیفی با تغییر در پتانسیل شیمیایی مشاهده می‌شود.

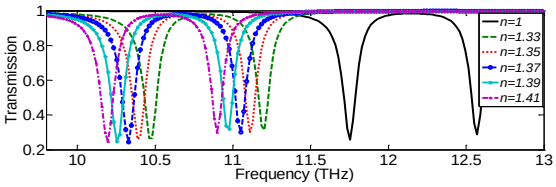


شکل ۴: نمودار عبور با تغییر پتانسیل شیمیایی

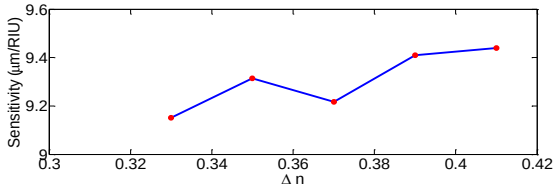
همان‌طور که در شکل(۴) مشاهده می‌شود با تغییر در پتانسیل شیمیایی می‌توان یک انتقال فرکانسی در محدوده تراهرتزی داشته باشیم. علت این انتقال فرکانسی این است که با تغییر پتانسیل شیمیایی، چگالی حامل‌های بار در گرافن تغییر می‌کند. این کاربرد بسیار مهمی برای گرافن محسوب می‌شود، چرا که ما با یک ساختار گرافنی می‌توانیم طیف وسیعی از محدوده فرکانسی را پوشش دهیم، بدون این که نیازی به طراحی مجدد ساختار داشته باشیم.

۲-۲- بررسی حسگر ضریب شکست

یکی از ویژگی‌های جالب فرامواد حساسیت آن‌ها به محیط اطراف هست که به آن قابلیت طراحی سنسورهای وابسته به ضریب شکست می‌دهد[۹]. بدین‌صورت که ابتدا حس‌گر در محیط خلأ وجود داشته و در مراحل بعد حس‌گر را درون گلوکز با خلوص مختلف بررسی کرده‌ایم و با استفاده از خلوص متفاوت، انتقال فرکانسی در محدوده تشدید مشاهده شده است که در شکل (۵) نمایش داده‌شده است.



شکل ۵: نمودار عبور با تغییر ضریب شکست محیط اطراف



شکل ۶: نمودار حساسیت با ضریب شکست

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

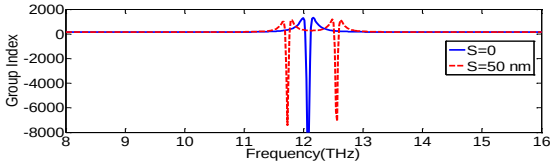
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

به عنوان مثال برای ضریب شکست n=1 مقدار فرکانس رزونانس در 12.5 THz است و برای n=1.33 مقدار فرکانس رزونانس در 10.84 THz اتفاق می‌افتد و برای n=1.35 مقدار فرکانس رزونانس در 10.75 THz است و برای n=1.37 مقدار فرکانس رزونانس برابر با 10.76 THz است و برای n=1.39 فرکانس رزونانس برابر با10.61 THz و برای n=1.41 مقدار فرکانس رزونانس برابر با 10.54 THz است، که نشان می‌دهد با افزایش ضریب شکست مقدار فرکانس رزونانس کاهش می‌یابد، که این میزان انتقال فرکانسی را با اختلاف ضریب شکست‌ها در شکل(۵) نمایش داده شده است.

حساسیت این حسگر برای خلوص گلوکز مختلف اندازه گیری شده است که نمودار حساسیت آن در شکل(۶) نمایش داده شده است. حساسیت برای این حسگر مقدار $\mu m/RIU$ 9.439 اندازه گیری شده است.

۳-۲- کاهش سرعت گروه

یکی از ویژگی‌های پدیده EIT کاهش سرعت گروه است. ما این کاهش سرعت گروه را در پدیده PIT نیز مورد بررسی قرار داده‌ایم. کاهش سرعت گروه نقش مهمی در ذخیره‌سازی اطلاعات اپتیکی دارد. در واقع مثبت و منفی بودن ضریب گروه به معنای کندی و تندی سرعت گروه است[۱۰]. 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 ۷: نمودار ضریب گروه در دو حالت کاملا متقارن و شکست تقارن

همان‌طور که در شکل(۷) مشاهده می‌شود، ضریب گروه در دو حالت متقارن و نامتقارن مورد بررسی قرارگرفته است. برای حالتی که ساختار در تقارن کامل است، هیچ کاهش سرعت گروهی مشاهده نمی‌شود، درصورتی‌که با از بین بردن تقارن در ساختار ، سرعت گروه از مرتبه ۲۷۸ کاهش پیدا می کند.

۳- نتیجه‌گیری

در کار حاضر یک ساختار فرامادی مبتنی بر گرافن را معرفی کردیم، که با برهم زدن تقارن در هندسه ساختار میزان عبور در فرکانس تشدید را تا ۹۸,۴۴ درصد افزایش داده‌ایم. هم چنین با استفاده از قابلیت گرافن در رسانندگی الکتریکی، یک انتقال فرکانسی را در محدوده فرکانسی ۸ تا ۱۸ تراهرتز ایجاد کرده‌ایم. در مرحله بعد ساختار را در مواد مختلف قرار داده و حساسیت ساختار را بررسی کردیم که حساسیتی برابر با $\mu m/RIU$ 9.439 اندازه گیری شد. در مرحله آخر به محاسبه سرعت گروه در این ساختار پرداختیم که کاهش سرعت گروه از مرتبه ۲۷۸ محاسبه شده است.

مراجع

[1] Marangos, J. P. "Electromagnetically induced transparency." Journal of Modern Optics. Vol. 45, No. 3, pp. 471-503, 1998.

[2] Garrido Alzar, C. L., Martinez, M. A. G., & Nussenzveig, P. "Classical analog of electromagnetically induced transparency." American Journal of Physics. Vol. 70. No. 1, pp. 37-41, 2002.

[3] Zhang, S., Genov, D. A., Wang, Y., Liu, M., & Zhang, X. "Plasmon-induced transparency in metamaterials." Physical Review Letters. Vol. 101. No. 4, pp. 047401, 2008.

[4] Bao, Q., & Loh, K. P. "Graphene photonics, plasmonics, and broadband optoelectronic devices." ACS nano. Vol. 6. No. 5, pp. 3677-3694, 2012.

[5] Falkovsky, L. A. "Optical properties of graphene." Journal of Physics: Conference Series. Vol. 129. No. 1. IOP Publishing, 2008.

[6] Smith, D. R., Vier, D. C., Koschny, T., & Soukoulis, C. M. (2005). Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials. *Physical review E*, 71(3), 036617.

[7] Liu, N., Langguth, L., Weiss, T., Kästel, J., Fleischhauer, M., Pfau, T., & Giessen, H. Plasmonic analogue of electromagnetically induced transparency at the Drude damping limit. *Nature materials*, Vol. 8. No. 9, 758-762, 2009.

[8] Wang, F., Zhang, Y., Tian, C., Girit, C., Zettl, A., Crommie, M., & Shen, Y. R. "Gate-variable optical transitions in graphene." Science. Vol. 320. No. 5873, pp. 206-209, 2008.

[9] Han, S., Cong, L., Lin, H., Xiao, B., Yang, H., & Singh, R. "Tunable electromagnetically induced transparency in coupled three-dimensional split-ring-resonator metamaterials." Scientific reports. Vol. 6, 2016.

[10] Virally, S. "A Review of Slow Light Physics and Its Applications.", 2008.

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

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