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

# مطالعه امکان تحریک حالات تام اپتیکی در ساختارهای لایه‌ای یک بعدی حاوی لایه ناهمسانگرد فرامادہ هایپربولیک گرافن پایه

**غزاله کورش نیا[۱]، امیر مدنی[۱] و سیمین شیرین[۱]**

**[۱]گروه مهندسی اپتیک و لیزر، دانشگاه بناب، بناب، آذربایجان شرقی**

g.kuroshnia@gmail.com(G.K.); a-madani@bonabu.ac.ir(A.M.); siminshirin2000@gmail.com

**چکیده –در این مقاله امکان تحریک حالات تام اپتیکی در ساختارهای لایه‌ای یک بعدی حاوی لایه ناهمسانگرد فرامادہ هایپربولیک گرافن پایه بررسی شده است.لایه ناهمسانگرد فرامادہ هایپربولیک گرافن پایه درفرکانس تراهرتز از تئوری محیط موثر به صورت محیط همگن با ضریب دی‌الکتریک موثر در نظر گرفته می‌شود.پژوهش با استفاده از روش ماتریس انتقال انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند میزان تراگسیل ساختار در ناحیه طیفی حالات تام اپتیکی به ترتیب با افزایش میزان پتانسیل شیمیایی گرافن و ضخامت لایه‌ی فرامادہ هایپربولیک گرافن پایه کاهش و افزایش می‌یابد.**

کلید واژه- بلور فوتونی یک بعدی، حالت های تام اپتیکی، گرافن، محیط موثر.

# Study of the stimulation of Optical Tamm State in one-dimensional layered structure containing an anisotropic graphene-based hyperbolic metamaterial

Ghazaleh kuroshnia[1],Amir Madani[1], Simin Shirin[1]

[1]Department of Laser and Optical Engineering, University of Bonab, Bonab

g.kuroshnia@gmail.com(G.K.); a-madani@bonabu.ac.ir(A.M.); siminshirin2000@gmail.com

Abstract- in this paper the possibility of the excitation of Optical Tamm States have been investigated in a one-dimension photonic crystal containing graphene-based hyperbolic metamaterial. The anisotropic graphene-based hyperbolic metamaterial can be supposed as a homogeneous medium using effective theory in THz region. The transfer matrix method has been used in the research and the results show that the transmission of the structure in the frequency region of optical Tamm States decreases by the increase of the chemical potential of graphene layer and increases by the increases of the thickness of the hyperbolic metamaterial.

Keywords: One dimensional photonic crystal, Optical Tamm State, Graphene, effective permittivity.



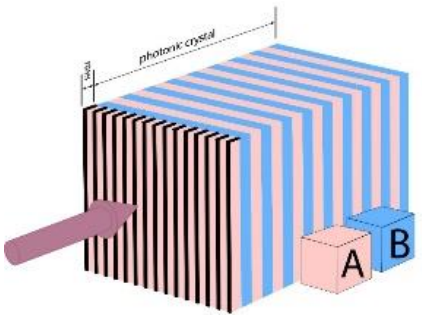
این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

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

## مقدمه

امواج سطحی نوعی امواج الکترومغناطیسی است که در مرز مشترک بین دو محیط متناوب تشکیل می شود. حالات تام اپتیکی[1]نوع خاصی از حالات الکترومغناطیسی جایگزیده هستند که با تابش عمود به نمونه تحریک میشوند. دامنه حالات تام اپتیکی با حرکت از مرز مشترک به طرف کناره‌ها به صفر میل پیدا می کند.به همین جهت کاربردهای بسیاری در زمینه اپتیک غیرخطی، حسگرها و سویچ‌های اپتیکی[2]و... دارند. در فعالیت‌های آزمایشگاهی این حالات سطحی به صورت یک قله در باند گاف فوتونی ظهور میابند[3]. امکان تحریک حالات تام اپتیکی در مرز مشترک دو بلور فوتونی با باند گاف مشترک یا در مرز یک بلور فوتونی و یک ماده با $\varepsilon < 0$وجود دارد. ماده با$\varepsilon <$ 0می‌تواند انواعی از نانوکامپوزیت‌های دارای فلزات یا تک لایه‌های گرافن باشد.از سوی دیگر فراموا‌د هایپربولیک نیز نوع جدیدی از مواد نوظهور هستند که از ساختارهای لایه‌ای شامل ترکیب دی‌الکتریک-فلز و اخیرا دی‌الکتریک-گرافن طراحی و ساخته می‌شوند. در نواحی طول موجی بلند می‌توان از تقریب محیط موثر برای مطالعه این محیط‌ها استفاده کرد.دراین حالت کل ساختار بعنوان یک ساختار همگن ناهمسانگرد دیده می‌شود که دارای تانسور گذردهی الکتریکی قطری می‌باشد. در فراموا‌د هایپربولیک، عناصر قطر اصلی این تانسور مختلف‌العلامه هستند و این امر منجر به منحنی پاشندگی هایپربولیک می‌شود که کاربردهای جالب توجهی دارد.در این مقاله قصد داریم به بررسی امکان تحریک حالات تام اپتیکی در ساختارهای لایه‌ای یک بعدی حاوی لایه ناهمسانگرد فراماده هایپربولیک گرافن پایه بپردازیم.

## مدل و محاسبات تئوری




شکل ۱: ساختار بلور فوتونی یک بعدی و لایه فراماده هایپربولیک گرافن پایه جهت تحریک حالات تام اپتیکی

ساختار مورد بررسی همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است از یک بلور فوتونی یک بعدی حاوی فراماده هایپربولیک گرافن پایه[4] تشکیل شده است که در این ساختار بلور فوتونی از لایه‌های دی‌الکتریک A و B با آرایش تکرار شونده $(AB)^N$ که N نشان دهنده تکرار لایه‌ها است ساخته شده است که دارای ضرایب گذردهی الکتریکی $\varepsilon_A = 5$ و $\varepsilon_B = 1$ و ضخامت‌های $d_A = 10\mu m$ و $d_B = 17\mu m$می‌باشد و لایه فراماده هایپربولیک گرافن پایه نیز با ضخامت d=10$\mu m$ از لایه‌های دی‌الکتریک و گرافن با گذردهی‌های $\varepsilon_d = 3$و $\varepsilon_g = 1 + i\left(\frac{\sigma_g \eta_0}{k_0 t_g}\right)$ ضخامت‌های $t_d = 0.5\mu m$ و $t_g = 0.34nm$در نظر گرفته شده است. در اینجا $\eta_0 = 377\Omega$ امپدانس هوا، $t_g$ ضخامت موثر گرافن، $k_0$ بردار موج خلاء با سرعت نور c است. $\sigma_g$ نیز رسانندگی سطحی لایه‌های گرافن است که بنابر فرمول کوبو [5] دارای دو بخش درون باندی و برون باندی به صورت زیر است.

$$\sigma_{g(\omega)} = \sigma_{g(\omega)}{}^{intra} + \sigma_{g(\omega)}{}^{inter} \qquad (۱)$$

$$\sigma_{g(\omega)}{}^{intra} = \frac{ie^2 k_B T}{\hbar\pi(\hbar\omega + i\Gamma_1)}\left[\frac{\mu_c}{k_B T} + 2\,ln\left(e^{-\frac{\mu_c}{k_B T}} + 1\right)\right] \qquad (۲)$$

$$\sigma_{g(\omega)}{}^{inter} = \frac{ie^2}{4\pi\hbar} ln\left[\frac{2|\mu_c| - (\hbar\omega + i\tau_2)}{2|\mu_c| + (\hbar\omega + i\tau_2)}\right] \qquad (۳)$$

که در آن e بار الکترون، $K_B$ ثابت بولتزمن، $\mu_c = 0.7ev$ پتانسیل شیمیایی لایه‌های گرافن، $\hbar$ ضریب ثابت پلانک،



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

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

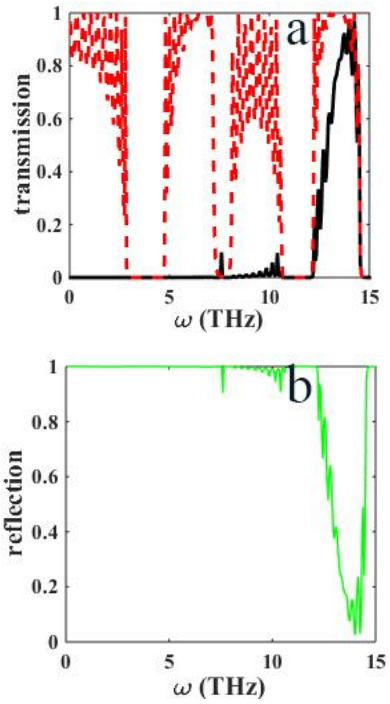
T=300°k دمای در نظر گرفته شده، $\tau_1$ و $\tau_2$ به ترتیب نرخ پراکندگی تراگسیل درون باند و برون باندی، $\omega$ فرکانس زاویه‌ای است. ضریب گذردهی الکتریکی موثر محیط از تئوری محیط موثر به شکل زیر است.

$$\varepsilon^{eff} = \begin{pmatrix} \varepsilon_\perp & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_\perp & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_\parallel \end{pmatrix} \quad (۴)$$

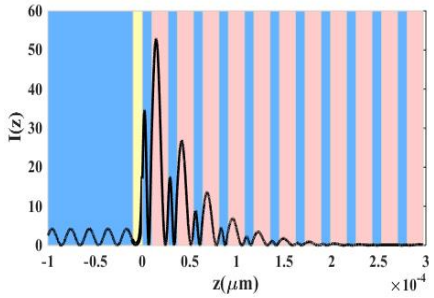
که $\varepsilon_\parallel = \varepsilon_d$ و $\varepsilon_\perp = \varepsilon_d + i\frac{\sigma_g}{t_g \omega \varepsilon_0}$ در اینجا جهات موازی و عمود با محور اپتیکی به ترتیب با نمادهای $\perp$ و $\parallel$ مشخص شده است.

## نتایج و بحث

محدوده فرکانسی مورد مطالعه و محاسبات عددی صورت گرفته در این مقاله در ناحیه 0-15THz است که در این ناحیه جذب گرافن ناچیز بوده و می‌توان از اتلاف آن صرف نظر کرد. در ابتدا جهت بررسی وجود حالات تام اپتیکی در مرز بین بلور فوتونی و فراماده هایپربولیک گرافن پایه، تراگسیل (شکل 2a)، بازتابندگی (شکل 2b) برای تابش عمود نور به ساختار محاسبه شده است. همانطور که از شکل 2a قابل مشاهده است تراگسیل برای دو حالت بلور فوتونی حاوی لایه فراماده هایپربولیک (خطوط مشکی) و بلور فوتونی بدون لایه فراموا هایپربولیک(خط چین قرمز) محاسبه شده است، برای بلور فوتونی بدون لایه فراماده هایپربولیک در محدوده طول موجی 7-8 THz یک گاف فوتونی که ناشی از بازتاب براگ ساختار است، وجود دارد،(خط چین قرمز شکل 2a) درحالی که در بلور فوتونی حاوی لایه فراموا هایپربولیک گرافن پایه ناحیه گاف وسیع‌تر می‌شود و قله‌های تراگسیلی در داخل گاف فوتونی در ناحیه فرکانسی 7-8THz قابل مشاهده است(خطوط مشکی شکل 2a) که برخی از این قله‌ها نشانگر وجود حالات تام اپتیکی است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در فرکانس 7.6THz یک حالت تام اپتیکی وجود دارد. برای تایید این موضوع از نمودار پروفایل شدت استفاده خواهد شد. قبل از این نمودار منحنی بازتابندگی ساختار در شکل 2b رسم شده است که تایید کننده وجود گاف و قله های تراگسیل در منحنی 2a می‌باشد.




شکل ۲: طیف (a) تراگسیل موج با قطبش TM در یک بلور فوتونی بدون لایه فراماده هایپربولیک گرافن پایه (منحنی خط چین) و در حضور لایه فراماده هایپربولیک(خط پررنگ)به صورت تابعی از فرکانس. (b) بازتابندگی موج با قطبش TMدر یک بلور فوتونی حاوی فراماده هایپربولیک گرافن پایه




شکل۳: توزیع شدت بر حسب مکان برای ساختار بلور فوتونی فراماده هایپربولیک گرافن پایه

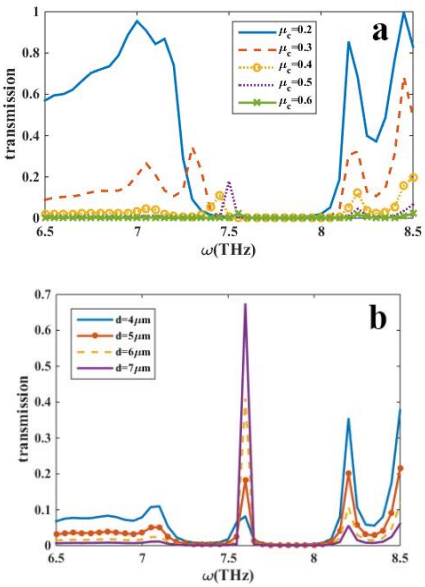
در شکل۳توزیع شدت میدان الکتریکی برای حالت فرکانس 7.6THz رسم شده است که به طور واضح بیانگر میرایی در مرز بین فراماده هایپربولیک گرافن پایه و بلور



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

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

فوتونی می‌باشد و این تاییدی بر وجود حالت تام اپتیکی در فرکانس ذکر شده است.




شکل ۴: تراگسیل ساختار بلور فوتونی-فراماده هایپربولیک گرافن پایه در ناحیه طیف حالت تام اپتیکی بر حسب (a)مقادیر مختلف پتانسیل شیمیایی لایه‌های گرافن (b)ضخامت‌های مختلف لایه فراماده هایپربولیک گرافن پایه

باتوجه به وجود لایه‌های گرافن در ساختار و وابستگی خواص اپتیکی گرافن به پتانسیل شیمیایی، در شکل 4a تاثیر پتانسیل شیمیایی را برای حالات تام اپتیکی بررسی کردیم. نمودارها نشان می‌دهد که با افزایش پتانسیل شیمیایی گرافن فرکانس حالات تام اپتیکی به سمت فرکانس‌های بزرگ‌تر شیفت پیدا می‌کند و همچنین میرایی تراگسیل آنها کاهش پیدا می‌کند. همچنین در شکل 4b تاثیر ضخامت لایه فراماده هایپربولیک بر تراگسیل ساختار بررسی شده است که نشان می‌دهد با افزایش ضخامت لایه میزان تراگسیل در ناحیه طیفی حالت تام اپتیکی ساختار افزایش می‌یابد.

## نتیجه‌گیری

در این مقاله امکان تحریک حالات تام اپتیکی در ساختارهای لایه‌ای یک بعدی حاوی لایه ناهمسانگرد فراماده هایپربولیک گرافن پایه بررسی شد. لایه‌ی ابتدایی ساختار لایه‌ی ناهمسانگرد فراماده هایپربولیک گرافن است که با استفاده از تئوری محیط موثر به صورت محیط همگن با ضریب دی‌الکتریک موثر در نظر گرفته می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که در این ساختار نیز همانند ساختار بلور فوتونی-گرافن [6] با اضافه کردن لایه‌ی فراماده هایپربولیک گرافن پایه به بلور فوتونی، حالات تام اپتیکی در ساختار مشاهده می‌شود علاوه بر این مشاهده شد که تراگسیل در نواحی طیفی حالات تام اپتیکی به ضخامت لایه فراماده هایپربولیک گرافن پایه و ویژگی‌های اپتیکی لایه ابتدایی بلور فوتونی همانند پتانسیل شیمیایی تک لایه‌های گرافن و فاکتور فیلینگ نانوذرات نقره وابسته می‌باشد.

## مرجع‌ها

**[1]** P. Vinogradov, A. V. Dorofeenko, A. M. Merzlikin and A. A. Lisyansky, “Surface states in photonic crystals”,Phys. Ups., Vol. 53, No. 3, pp. 243-256, 2010.

**[2]** W. L. Zhang, S. F. Yu, “Bistable switching using an optical Tamm cavity whith a Kerr medium”, Opt. Commun., Vol. 238, No. 12, pp. 2622-2626, 2010.

**[3]** M. E. Sasin, R. P. Seisyan, M. A. Kalitteevski, S. Brand, R. A. Abram, J. M. Chamberlain, A. Y. Egorov, A. P. Vasil’ev, V. S. Mikhrin, A. V. Kavokin, “Tamm plasmonpolaritons: Slow and spatially compact light”, Appl. Phsy. Lett., Vol. 92, No. 25,pp. 251112, 2008.

**[4]** C. LV, W. Li, X. Jian, J. Cao, “Far-field super-resolution imaging whith a planar hyperbolic metamaterial lens”, EPL, Vol. 105, No. 2, pp. 28003, 2014.

**[5]** Y. Li, J. Zhang, S. Qu, J. Wang, Y. Pang, Z. Xu, A. Zhang, “Broadband unidirectional cloaks based on flat metasurface focusing lenses”, J. phys. D. Appl. Phys., Vol. 48, No. 33, pp. 335101, 2015.

**[6]** R.G. Bikbaev,S.Ya. Vetrov,I.V. Timofeeev, “The Optical Tamm States at the interface between a photonic crystal and nanoporous silver”, J.Opt., Vol. 19, No. 1, pp. 015104, 2016.



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

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