بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۴-۱۲ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

تأثیر جهت گیری محور اپتیکی بر روی پلاریتون‌های سطحی در بره‌ای از متامواد هایپربولیک گرافن-پایه

امید رامک نژاد[۱]، امیر مدنی[۱]، صمد روشن انتظار[۲]، رضا عبدی قلعه[۱]

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

[۲] دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز، آذربایجان شرقی، ایران

چکیده - در این مقاله به مطالعه پلاریتون‌های سطحی در مرز بین یک بره پاشنده از جنس متامواد هایپربولیک گرافن-پایه با هوا پرداخته شده است. متامواد مورد بررسی، یک ساختار لایه ای یک بعدی متشکل از لایه‌های دی الکتریک-گرافن در نظر گرفته شده است که خواص پاشندگی آن در گستره خاصی از ناحیه *فرکانسی THz* بصورت هایپربولیک می‌باشد. این خاصیت امکان تحریک امواج سطحی با *قطبش TM* را در این ساختار فراهم می‌کند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که پاشندگی و فرکانس پلاریتون‌های سطحی ایجاد شده وابسته به پتانسیل شیمیایی لایه‌های گرافن و زاویه جهت گیری محور اپتیکی متامواد است. تحریک پلاریتون‌های سطحی در ساختار، بوسیله رسم نمودار *ATR* تحقیق شده است. امواج سطحی کاربردهای زیادی در زمینه‌های اپتیک غیرخطی، حسگرها و مطالعه سطوح دارند.

کلید واژه- پلاریتون‌های سطحی، محور اپتیکی، متامواد هایپربولیک، پتانسیل شیمیایی، گرافن.

Influence of orientation of the optical axis on the surface polaritons of a graphene-based hyperbolic metamaterial slab

Omid Ramaknezhad[1], Amir Madani[1], Samad Roshan Entezar[2], Reza Abdi Ghaleh[1]

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

[2] Faculty of Physics, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract- In this paper we have studied the surface polaritons (SPs) at the interface of a slab made of hyperbolic metamaterial and air. The investigated metamaterial is a one-dimensional multilayer structure made of graphene and dielectric layers. In a certain range of THz frequencies, the dispersion properties of the medium is hyperbolic. Therefore, the excitation of TM-polarized SPs is possible in the structure. The results show that the dispersion and frequency of SPs depend on the chemical potential of the graphene sheets and angle of orientation of the optical axis. The excitation of SPs has verified by plotting the ATR curves for the structure. SPs have many applications in nonlinear optics, sensors and surface studies.

Keywords: Surface polaritons , Optical axis, Hyperbolic metamarerials, Chemical potential, Graphene.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

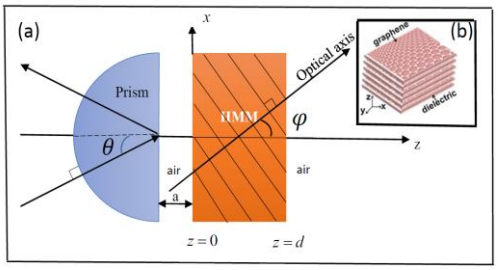
۱- مقدمه

امواج سطحی یا پلاریتون‌های سطحی نوعی از امواج الکترومغناطیس هستند که در مرز مشترک بین دو محیط متفاوت تشکیل می‌شوند. می‌توان نشان داد که چنین امواجی با قطبش TM، در فصل مشترک دو محیط با ضرایب دی الکتریک مختلف‌العلامه مثل هوا و فلزات در فرکانس‌های پایین‌تر از فرکانس پلاسما ایجاد می‌شوند. دامنه امواج سطحی با حرکت از مرز مشترک بطرف کناره‌ها بصورت نمایی افت پیدا کرده و سریعاً صفر می‌شود. لذا بیش‌ترین دامنه میدان را در فصل مشترک خواهیم داشت. این امواج که در مورد فلزات بیشتر با نام پلاسمون پلاریتون‌های سطحی شناخته می‌شوند، کاربردهای زیادی در زمینه های اپتیک غیرخطی، مطالعه دقیق سطوح، مدولاتورهای اپتیکی و حسگرها دارند[۱]. در دهه اخیر، با اختراع متاماواد، مطالعاتی هم در زمینه امکان تحریک امواج سطحی در آنها انجام شده است. متاماواد، مواد مصنوعی مهندسی شده با اجزای ساختاری کوچکتر از طول موج هستند که بخاطر خواص منحصربفردشان در زمینه‌های مختلف اپتیک و مهندسی مورد توجه قرار گرفته اند [۲]. پدیده امواج سطحی در حضور متاماواد چپگرد بلافاصله پس از تولید متاماواد، در سال ۲۰۰۰ توسط روپین مورد مطالعه قرار گرفت [۳]. در ادامه گروه‌های دیگری به بررسی این موضوع در بلورهای فوتونی حاوی متاماواد پرداختند [۴]. متاماواد هایپربولیک نوع دیگری از مواد نوظهور هستند که در چند سال اخیر مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌اند [۵]. این مواد عمدتاً از ساختارهای لایه ای شامل ترکیب دی الکتریک- فلز، دی الکتریک- متاماواد و اخیراً دی الکتریک- گرافن طراحی و ساخته می‌شوند. در نواحی طول موجی بلند و جایی که طول موج بسیار بزرگتر از ثابت شبکه ساختار است می‌توان از تقریب محیط موثر برای مطالعه این محیطها استفاده کرد. در این حالت کل ساختار بعنوان یک ساختار همگن ناهمسانگرد دیده می‌شود که دارای تانسور گذردهی الکتریکی قطری می‌باشد. در متاماواد هایپربولیک، عناصر قطر اصلی این تانسور مختلف‌العلامه می‌باشند و این امر منجر به منحنی پاشندگی هایپربولیک(به جای منحنی پاشندگی بیضوی در محیط‌های معمولی) می‌شود که کاربردهای جالب توجهی دارد. از آن جمله می توان به پدیده‌هایی مثل هایپرلنز، نامرئی سازی و بازتابندگی صفر تمام سویه و ... اشاره کرد [۶]. استفاده از تک لایه‌های گرافن در ساختارهای متاماواد هایپربولیک مزایایی را نسبت به فلزات فراهم می‌کند. گرافن بعنوان شبکه ای با ضخامت یک اتم از اتم‌های کربن، قابلیت جایگزینی لایه‌های نازک فلزی را دارد. تحرک پذیری بالای الکترونی، انعطاف پذیری، استقامت بالا و پایداری محیطی خوب، اتلاف کم در نواحی فرکانسی THz و قابلیت تنظیم خواص اپتیکی و الکترونیکی از خواص قابل توجه گرافن می‌باشند که امکان استفاده از آن را در ادوات فوتونیکی و متاماواد هایپربولیک را فراهم می‌آورند [۷].

در این مقاله سعی شده است که دلیل امکان ایجاد موج سطحی با قطبش TM، در مرز یک بره از متاماواد هایپربولیک با هوا و نیز تاثیر جهت گیری محور اپتیکی این بره بر این امواج، نشان داده شود. مطالعه بر روی این ساختار با دو روش رسم منحنی پاشندگی امواج و رسم منحنی ATR برای ساختار انجام گرفته و امکان کنترل فرکانسی این امواج با استفاده از خواص کنترلی گرافن و زاویه قرار گیری محور اپتیکی بره مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مدل و محاسبات تئوری

ساختار مورد بررسی، در شکل۱ نشان داده شده است که به ترتیب از سمت چپ شامل یک منشور نیمه استوانه‌ای با ضریب شکست $n_p = 2$ ، یک لایه هوا با ضخامت $a = 10\mu m$،یک بره از متاماواد هایپربولیک حاوی لایه‌های گرافن با ضخامت $d = 4\mu m$ و محیط آخر هم هوا است. درتقریب محیط موثر این بره به شکل یک محیط ناهمسانگرد در نظر گرفته می‌شود که محور اپتیکی آن عمود بر لایه‌های گرافن است. نحوه‌ی استقرار و برش لایه‌های گرافن و دی‌الکتریک بگونه‌ای است که محور اپتیکی بره به اندازه زاویهφ نسبت به محور z چرخیده شده است.



شکل۱: در قسمت(a) طرحی شماتیک از ساختار مورد مطالعه و در قسمت(b) اجزای تشکیل دهنده متاماواد هایپربولیک (HMM) حاوی لایه‌های گرافن و دی الکتریک نمایش داده شده است.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

لازم بذکراست که ضخامت هر لایه دی‌الکتریک $t_d = 50nm$ و هر لایه گرافن $t_g = 0.5nm$ در نظر گرفته شده است. فرض می‌کنیم که محور اپتیکی بره در صفحه x-y قرار دارد و با محورz زاویهφ می‌سازد با توجه به اینکه در ناحیه فرکانسیTHz، طول موج نورتابشی در مقایسه با ضخامت لایه‌ها بزرگ است، می‌توان از تئوری محیط موثر برای مطالعه انتشار امواج در این محیط استفاده کرد. در این شرایط تانسور گذردهی الکتریکی متامواد به شکل زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\bar{\varepsilon} = \begin{pmatrix} p & 0 & f \\ 0 & \varepsilon_{\square} & 0 \\ f & 0 & w \end{pmatrix} \qquad \begin{aligned} p &= \varepsilon_{\square}\cos^2\varphi + \varepsilon_{\perp}\sin^2\varphi \\ w &= \varepsilon_{\square}\sin^2\varphi + \varepsilon_{\perp}\cos^2\varphi \\ f &= (\varepsilon_{\perp} - \varepsilon_{\square})\sin\varphi\cos\varphi \end{aligned} \qquad (۱)$$

هنگامیکه محور اپتیکی در امتداد محور z قرار گیرد(یعنیφ=0)، $\varepsilon_{\perp}$ و $\varepsilon_{\square}$ عناصر قطری تانسور گذرهی الکتریکی خواهند بود که بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\varepsilon_{\parallel} = \frac{t_g\varepsilon_g + t_d\varepsilon_d}{t_g + t_d},\ \varepsilon_{\perp} = \frac{\varepsilon_g\varepsilon_d(t_g + t_d)}{t_g\varepsilon_d + t_d\varepsilon_g} \qquad (۲)$$

که $\varepsilon_d = 2.25$ گذردهی لایه دی‌الکتریک و $\varepsilon_g = 1 + i(\sigma_g\eta_0/k_0t_g)$ ضریب گذردهی موثر گرافن است که در آن σ_g رسانندگی سطحی گرافن بوده و در ناحیه فرکانسی THz با تقریب خوبی از رابطه (۳) بدست می آید.

(۳)

در اینجا ω فرکانس زاویه ای نور تابشی، e بار الکترون، $\hbar$ ثابت کاهش یافته پلانک ، $\tau = 1ps$ زمان واهلش الکترون و μ پتانسیل شیمیایی گرافن است که خود تابعی از چگالی حاملین بار است. همچنین $\eta_0 = 377\Omega$ و k_0 عدد موج خلاء می‌باشد. در نواحی مختلف مربوط به ساختار شکل ۱، میدان های الکترومغناطیسی عبارت اند از:

$$\overrightarrow{H_1^y} = \hat{j}\,Ae^{k_z z}e^{i(k_x x-\omega t)} \qquad z<0 \qquad (۴)$$

$$\overrightarrow{E_1^x} = \hat{i}\frac{-ik_z}{\omega\varepsilon_0\varepsilon_a}(Ae^{k_z z}e^{i(k_x x-\omega t)}) \qquad (۵)$$

$$\overrightarrow{H_2^y} = \hat{j}\,(Be^{i(\alpha_2-\alpha_1)z} + Ce^{-i(\alpha_2+\alpha_1)z})e^{i(k_x x-\omega t)} \qquad 0<z<d$$

$$\overrightarrow{E_2^x} = \frac{w\alpha_2}{\omega\varepsilon_0\varepsilon_{\perp}\varepsilon_{\square}}(Be^{i(\alpha_2-\alpha_1)z} - Ce^{-i(\alpha_2+\alpha_1)z})e^{i(k_x x-\omega t)}$$

$$\overrightarrow{H_3^y} = \hat{j}\,De^{-k_z z}e^{i(k_x x-\omega t)} \qquad z>d$$

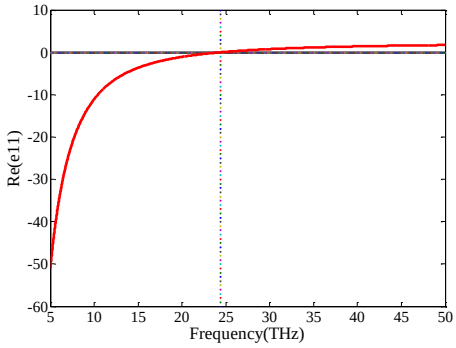
$$\overrightarrow{E_3^x} = \hat{i}\frac{ik_z}{\omega\varepsilon_0\varepsilon_a}(De^{-k_z z}e^{i(k_x x-\omega t)})$$

در روابط اخیر $k_z = (k_x^{\,2} - \varepsilon_a(\omega^2/c^2))^{1/2}$ مولفه انتشاری بردار موج در هوا، $k_x = (n_p\omega/c)\sin\theta$ مولفه مماسی بردار موج، $\alpha_1 = (f/w)k_x$ و $\alpha_2 = (\omega/c)(\varepsilon_{\square}\varepsilon_{\perp}(w-\sin^2\theta)/w^2)$

ε_a ضریب گذردهی هوا می‌باشند. شرایط مرزی مستلزم این است که مولفه‌های مماسی $\vec{E}$ و $\vec{H}$ در $z=0$ و $z=d$ پیوسته باشند. این شرایط منجر به تشکیل یک دستگاه ۴ معادله‌ای با ۴ مجهول برای ضرایبA، B، C و D می‌شود که با حل عددی آن، روابط پاشندگی برای پلاسمون‌های سطحی، محاسبه و رسم می‌شوند.

۳- نتایج و بحث

در شکل ۲ قسمت حقیقی $\varepsilon_{\square}$ برحسب فرکانس رسم شده است. مشاهده می‌شود که قسمت حقیقی $\varepsilon_{\square}$ وابستگی شدید فرکانسی دارد، بطوریکه در نواحی فرکانسی خاصی، منفی بوده و بعد از یک فرکانس بحرانی تغییر علامت می-دهد. با توجه به مثبت بودن $\varepsilon_{\perp}$ در تمامی فرکانس‌ها، می توان گفت که ساختار در نواحی فرکانسی کوچکتر از فرکانس بحرانی، پاشندگی هایپربولیک دارد. فرکانس بحرانی وابسته به پتانسیل شیمیایی گرافن بوده و برای μ=0.2eV برابر 24.4THz می‌باشد.

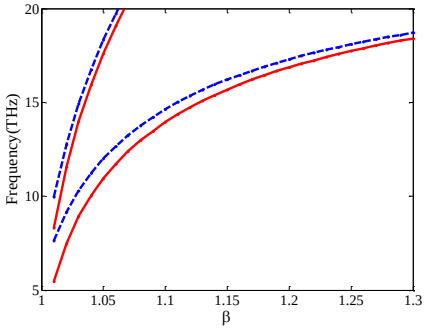


شکل۲: تغییرات قسمت حقیقی $\varepsilon_{\square}$ را برحسب فرکانس برای μ=0.2eV نشان می دهد.

در شکل۳، نمودار پاشندگی امواج سطحی با قطبش TM حاصله از حل عددی روابط پاشندگی برای ساختار متامواد هایپربولیک توصیف شده در قسمت قبل، رسم شده است. در این شکل محور افقی نشانگر مولفه مماسی نرمالیزه شده بردار انتشار($\beta = n_p\sin(\theta)$) است و محور قائم، فرکانس می باشد.

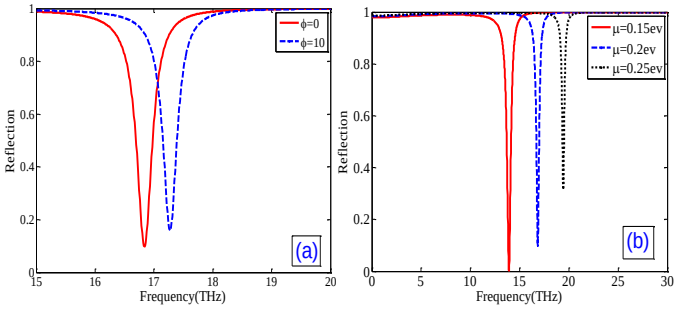
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]



شکل۳: منحنی‌های پاشندگی برای امواج سطحی با قطبش TM. منحنی-های خط‌پیوسته و نقطه‌چین به ترتیب به ازای $\varphi = 0^0$ و $\varphi = 10^0$ - برایμ=0.2eV، رسم شده‌اند.

از شکل۳ پیداست که فرکانس تحریک پلاریتون‌های سطحی به ازای یک زاویه تابش فرودی و پتانسیل شیمیایی معلوم، کاملاً وابسته به زاویه قرارگیری محور اپتیکی بره می‌باشد و با افزایش این زاویه، به سمت فرکانس‌های بالاتر شیفت پیدا می‌کند. علاوه بر این منحنی پاشندگی دارای دو قسمت مجزا است که قسمت بالایی آن فقط محدود بهβ های کوچک است و با افزایشβ، شرایط ایجاد مد سطحی از بین می‌رود. در حالیکه قسمت پایین منحنی برای β های بزرگ نیز جواب دارد. برای بررسی دقیق‌تر امواج سطحی تحریک شده، نمودار ATR مربوط به ساختار را با شبیه سازی رسم کرده‌ایم. روش ATR یا بازتابش کلی کاهش یافته، چیدمانی است که در شکل۱ نشان داده است و در واقع روشی است که برای تحقیق وجود امواج سطحی بکار می‌رود. در شکل۴، قسمت(a) با استفاده از این روش، منحنی بازتابش ساختار، برای پتانسیل شیمیایی ثابت μ=0.2eV برحسب فرکانس به ازای زوایای قرار گیری محور اپتیکی φ=0 و φ=10تحت زاویه تابش فرودی $\theta = 36.8^o$ رسم شده است که بترتیب منجر به فرکانس‌های تحریک در f=16.8THz و f=17.3THz می‌شود و در قسمت (b) همین نمودار برای زاویه محور اپتیکی ثابتφ=0 بترتیب به ازای پتانسیل‌های شیمیاییμ=0.15eV، μ=0.2eV وμ=0.25eV تحت زاویه تابش فرودی $\theta = 36.8^o$ رسم شده است که فرکانس‌های تحریک موج سطحی بترتیب f=16.8THz، f=13.9THz و f=19.4THz هستند. زوایای تابش انتخابی همگی بزرگتر از زاویه حد، ($\theta_c = 30^o$) می‌باشند، لذا بازتاب کلی رخ می‌دهد. در فرکانس‌هایی که امواج سطحی تحریک می‌شوند میزان بازتاب به شدت افت کرده و انرژی به موج سطحی منتقل می‌شود که بر روی مرز حرکت می‌کند. مشاهده می‌شود که چنین فرکانسی که در شکل با یک مینیمم مشخص شده است، با فرکانس‌های بدست آمده از نمودار پاشندگی به ازای زوایه تابش ذکر شده مطابقت دارند.



شکل۴: نمودارATR: قسمت (a) که شامل منحنی‌های خط‌پیوسته و خط‌چین بترتیب برای φ=0 وφ=10 تحت زاویه تابش $\theta = 36.8^o$برای پتانسیل شیمیایی ثابت μ=0.2eV. قسمت (b) که شامل منحنی‌های خط پیوسته ، خط‌چین و نقطه‌چین بترتیب برای پتانسیل‌های شیمیایی μ=0.25eV وμ=0.2eV،μ=0.15eV برای زاویه جهت گیری محور اپتیکی φ=0 و تحت زاویه تابش $\theta = 36.8^o$ می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله به تأثیر زاویه قرارگیری محور اپتیکی و پاشندگی پلاریتون‌های سطحی در ساختارهای متامواد هایپربولیک تشکیل شده از ساختارهای لایه‌ای دی الکتریک-گرافن پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که در مرز چنین ساختارهایی با هوا، پلاریتون‌های سطحی با قطبش TM در ناحیه فرکانسی THz امکان تحریک دارند. با توجه به پارامترهای کنترلی ساختار، از قبیل پتانسیل شیمیایی گرافن و نیز تغییر زاویه جهت گیری محور اپتیکی، امکان کنترل فرکانس امواج سطحی در این ساختارها وجود دارد.

مراجع

[1] P. Yeh, “Optical waves in layered media”, J. Wiley, 2005.
[2] D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser and S. Schultz, “Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity”; Phys. Rev. Lett, 84 4184, 2000.
[3] R. Ruppin, “Surface polaritons of a left-handed medium”, Phys. Lett., A 277, 61, 2000.
[4] I. V. Shadrivov, A.A. Sukhorukov, Y. S. Kivshar, A. A. Zharov, A. D. Boardman and P. Egan, “Nonlinear surface waves in left-handed materials”, Phys. Rev, 69, 016617, 2004.
[5] A. Poddubny, I. Iorsh, P. Belov and Y. Kivshar; “Hyperbolic metamaterials”; Nat. Photonics, 7, 958, 2013.
[6] A. Madani, S. Zhong, H. Tajalli, S. Roshan Entezar, A. Namdar and Y. Ma; “Tunable metamaterials made of graphene-liquid crystal multilayers”; PIER 143, 545, 2013.
[7] A. Geim; “Graphene: Status and prospects”; Science, 324, 15, 2009.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]