بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

طراحی y-branch بر پایه فراماده هذلولی تنظیم پذیر با گرافن

مازیار شعاعی[۱]، محمد کاظم مروج فرشی[۱*]، لیلا یوسفی[۲]

[۱] تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

[۲] تهران، دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

*farshi_k@modares.ac.ir

چکیده – در این مقاله با استفاده از فراماده هذلولی تنظیم پذیر بر پایه گرافن، مقسم پرتو حساس به قطبش با اثر *walk off* زیاد طراحی کرده‌ایم. این مقسم، پرتوهای با قطبش *TE* را بدون شکست عبور می‌دهد در حالی که پرتوهای با قطبش *TM* را با زاویه θ از خود عبور می‌دهد. با بهره گیری از قابلیت تنظیم پذیری گرافن توسط تغییرات پتانسیل شیمیایی، می‌توان شدت اثر *walk off* را تغییر داد. همچنین با استفاده از این خاصیت موفق به طراحی یک *y-branch* شده‌ایم . نور ورودی به این *y-branch* با توجه به پتانسیل شیمیایی گرافن به یکی از شاخه‌های خروجی منتقل می‌شود.

کلید واژه- فراماده هذلولی، مقسم پرتو حساس به قطبش ، y-branch، مواد ناهمسانگرد.

Designing a y-branch using Graphene based Hyperbolic Metamaterial

Maziar Shoaei[۱], Mohammad Kazem Moravvej-Farshi[۱]*, and Leila Yousefi[۲]

[۱]Faculty of Electrical and Computer Engineering, Tarbiat Modares University, P. O. Box ۱۴۱۱۵-۱۹۴, Tehran ۱۴۱۱۷۱۳۱۱۶, Iran

[۲]Electrical and Computer Engineering Department, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract- In this paper, we designed a polarization beam splitter using tunable hyperbolic metamaterial based on graphene which has large walk off effect. TE polarized beam pass throw this PBS with no refraction, while TM polarized beam pass with a refraction angle θ which is adjustable by graphene chemical potential. By aim of this property, we also proposed a y-branch. The incident beam exits form one of the y-branch outputs by varying the chemical potential of graphene

Keywords: Hyperbolic Metamaterial, Polarization Beam Splitter, Y-Branch, Anisotropic Materials.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]

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

۱- مقدمه

گروه جدیدی از فراماد که امروزه توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند، فراماد هذلولی نام دارند. این مواد دارای ویژگی‌های منحصر به فردی می‌باشند که در طبیعت یافت نمی‌شود. از جمله آن‌ها می‌توان از شکست منفی بدون داشتن ضریب شکست منفی [۱]، انعکاس صفر برای تمام زوایا [۲] و صفر کردن همزمان انتقال و انعکاس [۳] نام برد. این رفتارهای منحصر به فرد از خاصیت ناهمسانگردی این مواد نشات می‌گیرند.

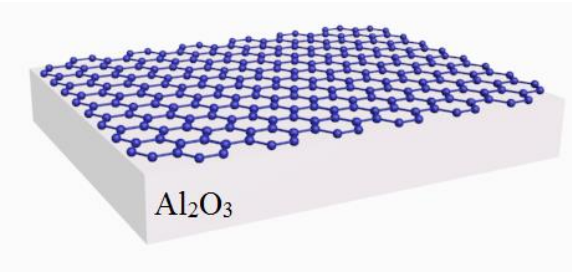
همانطور که از نام این فراماد مشخص است، حلقه‌های هم‌فرکانس این ساختارها هذلولی شکل‌اند. تانسور دی الکتریک در این مواد به صورت زیر است:[۴]

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_z \end{pmatrix} \qquad (۱)$$

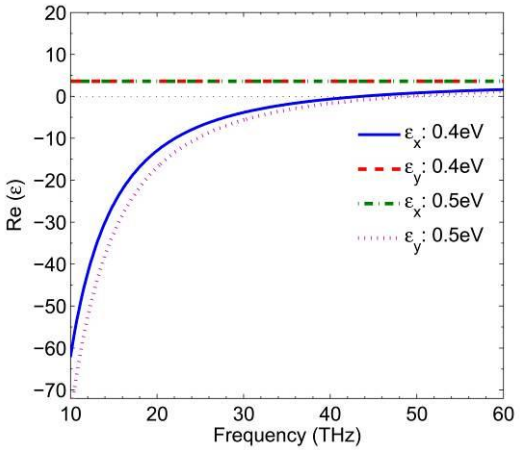
که در آن $\varepsilon_x \cdot \varepsilon_y < 0$ است و $\varepsilon_x = \varepsilon_z$.

مقسم‌های پرتو حساس به قطبش مختلفی بر پایه کریستال‌های ناهمسانگرد ارائه شده‌اند. مقسم‌های پرتو حساس به قطبش عموماً از بازده کم و اثر walk-off پایین رنج می‌برند. که این امر ناشی از ناهمسانگردی ضعیف مواد ناهمسانگرد که عموماً کریستال‌های طبیعی هستند، می‌باشد. [۵-۸] اخیرا مطالعات زیادی بر روی ناهمسانگردی مواد طبیعی صورت گرفت تا بتوان بازده کم و شدت پایین اثر walk-off در مقسم‌های پرتو حساس به قطبش را برطرف کنند، تا اینکه مرجع [۹] تئوری استفاده از مواد با ناهمسانگردی مشابه فراماده هذلولی را ارائه داد. در مرجع [۹] هیچگونه ساختاری برای دستیابی به این ناهمسانگردی ارائه نشده است.

در این مقاله با استفاده از فراماده هذلولی یک مقسم پرتو حساس به قطبش با اثر walk-off زیاد ارائه می‌دهیم. سپس با استفاده از این خاصیت یک ساختار y-branch طراحی می‌کنیم. در این ساختار با توجه به بایاس اعمالی به گرافن، پرتو ورودی به y-branch می تواند از هر یک از پورت‌های خروجی y-branch خارج شود. از این y-branch می‌توان برای طراحی گیت‌های منطقی نوری استفاده کرد.



شکل ۱: سلول واحد ساختار پیشنهادی



شکل ۲: قسمت حقیقی مؤلفه های عمود و موازی تانسور ضرایب دی الکتریک.

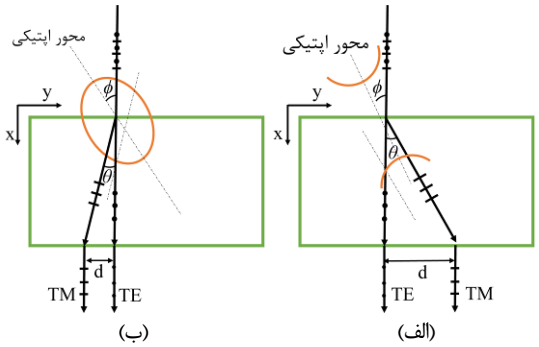
۲- ساختار پیشنهادی و نتایج شبیه سازی

یک سلول واحد از ساختاری که ما برای فراماده هذلولی ارائه داده‌ایم در شکل ۱ آمده است. این ساختار در راستای محور y به طور متناوب تکرار شده است. هر سلول واحد متشکل از ۲ لایه می‌باشد. یک لایه گرافن و لایه دی الکتریک از جنس Al_2O_3. ضرایب دی الکتریک در راستای مختلف توسط رابطه زیر بدست می آید[۴]:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_{\parallel} = \frac{\varepsilon_d d_d + \varepsilon_m d_d}{d_m + d_d}, \varepsilon_y = \varepsilon_{\perp} = \left(\frac{\varepsilon_m^{-1} d_m + \varepsilon_d^{-1} d_d}{d_m + d_d} \right)^{-1} \qquad (۲)$$

در رابطه فوق ε_d، ε_g، d_d و d_g به ترتیب ضریب دی الکتریک و ضخامت Al_2O_3 و گرافن می‌باشند. مقدار حقیقی ضرایب دی الکتریک محاسبه شده در راستای محور x و y برای این ساختار به ازای دو پتانسیل شیمیایی ۰,۴ eV و ۰,۵ eV در شکل ۲ آمده است. در محاسبات مقدار ε_d برابر با ۳,۵ و ضخامت دی الکتریک ۲۰ nm در نظر گرفته شده است. همچنین برای محاسبه ε_g از مدل درود بهره گرفته‌ایم. ضریب دی الکتریک مؤثر این ساختار با توجه به علامت قسمت حقیقی آن به دو ناحیه تقسیم می‌شود: برای مثال به ازای پتانسیل شیمیایی ۰,۴ eV در ناحیه اول، $\varepsilon_x, \varepsilon_y > 0$ است که شامل

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]



شکل ۳: نحوه شکست پرتو با قطبش TE و TM در محیط ناهمسانگرد الف) هذلولی و ب) بیضوی

فرکانس‌های کوچکتر از ۴۳,۷ THz می‌باشد و در ناحیه دوم $\varepsilon_x<0$ و $\varepsilon_y>0$ می‌باشد که شامل فرکانس‌های بزرگتر از ۴۳,۷ THz است.

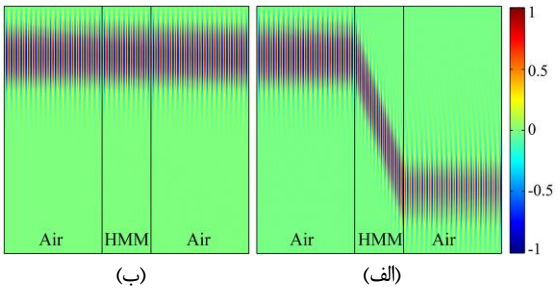
در ناحیه اول که در آن سطوح هم‌فرکانس بیضوی است پرتو با قطبش TM با شکست مثبت از ساختار عبور می‌کند. این حالت در بسیاری از کریستال‌های ناهمسانگرد موجود در طبیعت رخ می‌دهد اما در آن‌ها شدت اثر walk-off عموماً کم است. در ناحیه دوم پرتو ورودی با قطبش TM با شکست منفی از ساختار عبور می‌کند. این حالت در طبیعت موجود نیست. در این حالت سطوح هم‌فرکانس هذلولی است. توجه کنید که در هر دو ناحیه پرتو با قطبش TE بدون هیچ شکستی از ساختار عبور می‌کند.

شکل ۳ نحوه شکست را در این دو ناحیه نشان می‌دهد. محور اپتیکی دارای زاویه ϕ با خط عمود بر فصل مشترک هوا و فراماده است. پرتو TM عبوری با زاویه θ از ساختار عبور می‌کند. مقدار این زاویه از رابطه زیر محاسبه می‌شود[۹]:

$$\tan\theta=\frac{(f-1)\cos\phi\sin\phi}{\cos^2\phi+f\sin^2\phi} \qquad (۳)$$

در رابطه فوق $f=\varepsilon_y/\varepsilon_x$ می‌باشد. طبق محاسبات انجام شده به ازای ϕ=۱۰ و در فرکانس ۴۴ THz مقدار θ برابر با ۶۸,۷۱۷۳ درجه است.

برای صحت عملکرد این مقسم پرتو حساس به قطبش، ما از روش المان محدود بهره گرفتیم. شکل ۴ نتایج حاصل از شبیه سازی این مقسم پرتو حساس به قطبش برای موج گوسی TM و TE نشان می‌دهد. همانطور که از شکل مشخص است موج TE بدون هیچ شکستی از ساختار



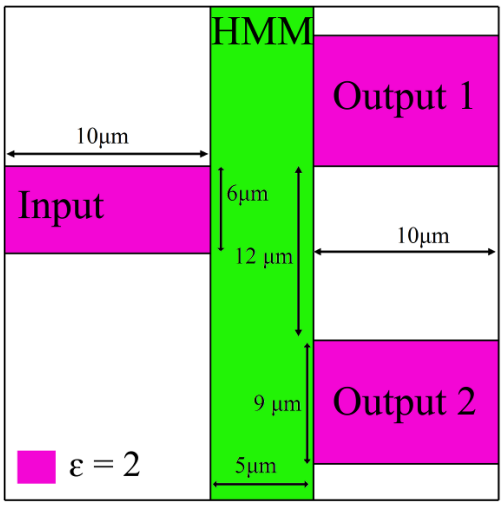
شکل ۴: نحوه عملکرد مقسم پرتو حساس به قطبش در برابر پرتو با قطبش الف) TM و ب) TE

عبور می‌کند اما موج TM با زاویه ۶۸,۷۱ درجه در ساختار می‌شکند. با توجه به اینکه طول این مقسم پرتو حساس به قطبش برابر با ۱۰μm در نظر گرفته شده است لذا مقدار walk-off برابر با ۱۲,۸۳μm خواهد بود.

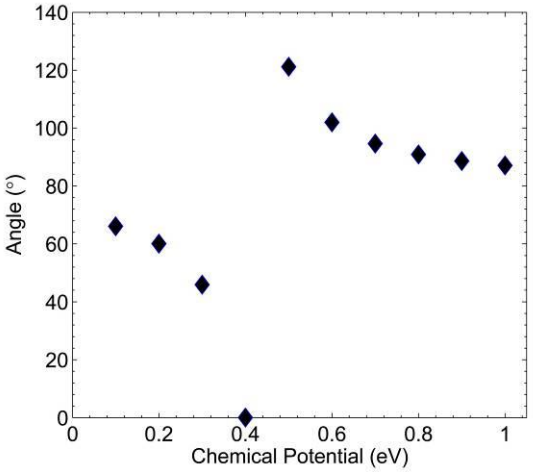
اکنون با استفاده از این نتایج به طراحی یک y-branch می‌پردازیم که با تغییر بایاس خارجی گرافن بتوانیم پرتو ورودی را به یکی از دو شاخه خروجی هدایت کنیم. ساختاری که ما برای مقسم پرتو حساس به قطبش در نظر گرفته ایم به صورت شکل ۵ می‌باشد. مقادیر ضریب دی الکتریک و ابعاد هر ماده در شکل مشخص شده است. مقدار ضریب دی الکتریک برای شاخه‌ها به گونه‌ای انتخاب شده است که علاوه بر محصور شدگی بالا، بهترین تطبیق امپدانس را با فراماده هذلولی داشته باشد تا مقدار انتقال و بازده بیشترین مقدار ممکن را داشته باشد. ابعاد خروجی ها و ضخامت باریکه فراماده‌ای به گونه‌ای انتخاب شده است که ساختار پیشنهادی دارای بیشترین مقدار انتقال و بیشترین اختلاف مکانی بین دو خروجی باشد. برای دستیابی به ابعاد بهینه چندین شبیه سازی انجام شده است که نتایج آن‌ها حاکی از آن است که حالت بهینه ساختار برای ابعاد ذکر شده در شکل، نتیجه می‌شود.

هدف ما این است که بین دو خروجی بیشترین فاصله ممکن وجود داشته باشد. برای حالت اول که پرتو از خروجی دو خارج می‌شود، مقدار پتانسیل شیمیایی گرافن برابر با ۰,۴ eV در نظر گرفته شده است. برای دستیابی به بیشترین فاصله بین دو خروجی پتانسیل حالت دوم را از ۰,۱ eV الی ۱ eV تغییر داده‌ایم و اختلاف زاویه بین این دو حالت را محاسبه کرده‌ایم. شکل ۶ اختلاف زاویه بین این دو حالت را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشخص است، بیشترین اختلاف برای پتانسیل ۰,۵ eV

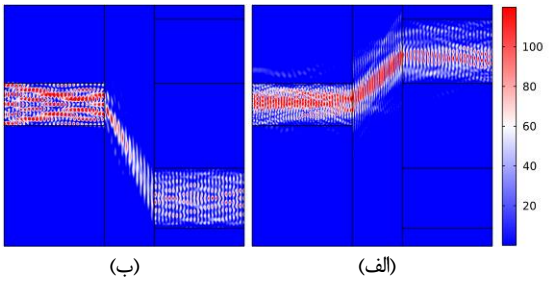
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]



شکل ۵: ساختار پیشنهادی برای y-branch



شکل ۶: اختلاف بین دو زاویه شکست پرتو TM بر حسب پتانسیل‌های شیمیایی مختلف نسبت به پتانسیل شیمیایی ۰٫٤ eV



شکل ۷: نحوه عملکرد y-branch به ازای پتانسیل شیمیایی الف) ۰٫۰۵eV و ب) ۰٫٤ eV

اتفاق می‌آفتد. این اختلاف برابر با ۱۲۱٫۲ درجه است.

با توجه به شکل ۲، در فرکانس ۴۴ THz و پتانسیل ۰٫۴ eV مقدار ضرایب دی الکتریک برابر با $Re(\varepsilon_x)$=۰٫۱۱٤۸ و $Re(\varepsilon_y)$=۳٫٤۸۹۸ است که با توجه به رابطه (۳) زاویه شکست برابر با ۶۹٫۷۱۷۳ می شود. همچنین برای پتانسیل الکتریکی ۰٫۵ eV مقدار ضرایب دی الکتریک برابر با $Re(\varepsilon_x)$= –۰٫۷۱۶۲ و $Re(\varepsilon_y)$=۳٫۵۸۹٤ است.

در این حالت سطوح هم‌فرکانسی به فرم هذلولی می‌باشد و در نتیجه آن پرتو به صورت منفی در ساختار می‌شکند.

شکل ۷ نتایج حاصل از شبیه سازی به روش المان محدود را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است برای پتانسیل شیمیایی ۰٫۴ eV پرتو ورودی از خروجی دو خارج می‌شود در این حالت مقدار ضریب انتقال برابر با ۶۰٪ است. به ازای پتانسیل ۰٫۵ eV پرتو ورودی از خروجی اول خارج می شود مقدار ضریب انتقال در این صورت برابر با ۵۷٪ است.

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله ما با استفاده از فراماده هذلولی یک مقسم پرتو حساس به قطبش طراحی کرده‌ایم که قابلیت تنظیم پذیری دارد. با تغییر پتانسیل شیمیایی گرافن می‌توان شدت اثر walk-off را تنظیم کرد. همچنین y-branch ارائه داده‌ایم که با تغییر بایاس گرافن پرتو ورودی به هر یک از شاخه‌های خروجی هدایت می‌شود. ساختار ارائه شده دارای مقدار انتقال نسبتا خوبی است. از این ساختار می‌توان برای طراحی گیت‌های منطقی استفاده کرد.

مراجع

[۱] Smith D. R., Kolinko P., Schurig D., *Negative refraction in indefinite media*, **JOSA B** ۲۱ (۲۰۰٤) ۱۰۳۲-۱۰٤۳.

[۲] Li X., Liang Z., Liu X., Jiang X., Zi J., *All-angle zero reflection at metamaterial surfaces*, **Appl. Phys. Lett.** ۹۳ (۲۰۰۸) ۱۷۱۱۱۱.

[۳] Yang J., Hu X., Li X., Liu Z., Jiang X., Zi J., *Cancellation of reflection and transmission at metamaterial surfaces*, **Opt. let.** ۳۵ (۲۰۱۰) ۱٦-۱۸.

[٤] Cortes C., Newman W., Molesky S., Jacob Z., *Quantum nanophotonics using hyperbolic metamaterials*, **J. Opt.** ۱٤ (۲۰۱۲) ۰٦۳۰۰۱.

[۵] Huang H., Fan Y., Wu B.-I., Kong J. A., *Tunable TE/TM wave splitter using a gyrotropic slab*, **PROG ELECTROMAGN RES.** ۸۵ (۲۰۰۸) ۳٦۷-۳۸۰.

[٦] Dai D., Bowers J. E., *Novel ultra-short and ultra-broadband polarization beam splitter based on a bent directional coupler*, **Opt. express.** ۱۹ (۲۰۱۱) ۱۸٦۱٤-۱۸٦۲۰.

[۷] Li L., Dobrowolski J., High-performance thin-film polarizing beam splitter operating at angles greater than the critical angle, **Appl. Opt.** ۳۹ (۲۰۰۰) ۲۷۵٤-۲۷۷۱.

[۸] Ghirardi F., Brandon J., Carre M., Bruno A., Menigaux L., Carenco A., *Polarization splitter based on modal birefringence in InP/InGaAsP optical waveguides*, **IEEE Photon. Technol. Lett.** ۵ (۱۹۹۳) ۱۰٤۷-۱۰٤۹.

[۹] Sun J., Liu L., Dong G., Zhou J., *Efficient polarization beam splitter based on an indefinite medium*, **J ELECTROMAGNET WAVE**. ۲٦ (۲۰۱۲) ۱٤۲۳-۱٤۳۱.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]