



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<sup>۱</sup>، محمد کاظم مروج فرشی<sup>۱\*</sup>، لیلا یوسفی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

<sup>۲</sup> 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 کرده ایم. این مقسم، پرتوهای با قطبش *TE* را بدون شکست عبور می دهد در حالی که پرتوهای با قطبش *TM* را با زاویه  $\theta$  از خود عبور می دهد. با بهره گیری از قابلیت تنظیم پذیری گرافن توسط تغییرات پتانسیل شیمیایی، می توان شدت اثر *walk off* را تغییر داد. همچنین با استفاده از این خاصیت موفق به طراحی یک *y-branch* شده ایم. نور ورودی به این *y-branch* با توجه به پتانسیل شیمیایی گرافن به یکی از شاخه های خروجی منتقل می شود.

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

## Designing a y-branch using Graphene based Hyperbolic Metamaterial

Maziar Shoaee<sup>1</sup>, Mohammad Kazem Moravvej-Farshi<sup>1\*</sup>, and Leila Yousefi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Electrical and Computer Engineering, Tarbiat Modares University, P. O. Box ۱۴۱۱۵-۱۹۴, Tehran ۱۴۱۱۷۱۳۱۱۶, Iran

<sup>2</sup> 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  $\theta$  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.

## ۱- مقدمه

گروه جدیدی از فرامواد که امروزه توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند، فرامواد 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 نشأت می‌گیرند.

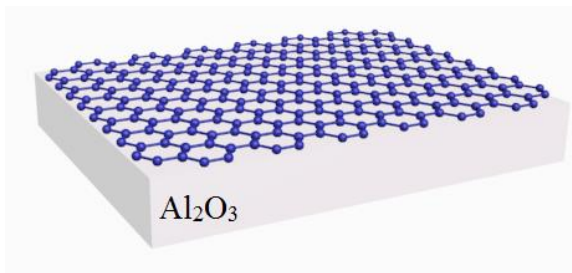
همانطور که از نام این فرامواد مشخص است، حلقه‌های هم‌فرکانس این ساختارها هذلولی شکل‌اند. تانسور دی الکتریک در این مواد به صورت زیر است: [۴]

$$\epsilon_{\text{eff}} = \begin{pmatrix} \epsilon_x & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_z \end{pmatrix} \quad (1)$$

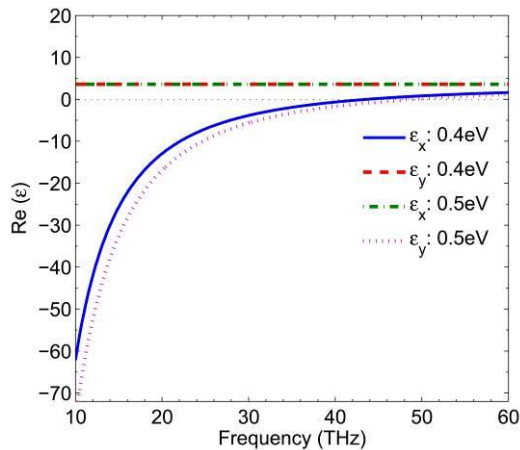
که در آن  $\epsilon_x < \epsilon_y$  است و  $\epsilon_x = \epsilon_z$ .

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] اخیراً 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 می‌تواند 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



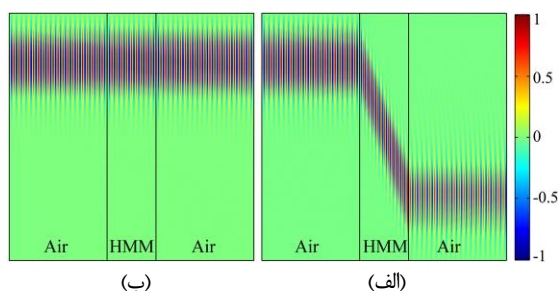
شکل ۲: قسمت حقیقی مؤلفه‌های عمود و موازی تانسور ضرایب دی الکتریک.

## 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  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . ضرایب دی الکتریک در راستای مختلف توسط رابطه زیر بدست می‌آید [۴]:

$$\epsilon_x = \epsilon_{\parallel} = \frac{\epsilon_d d_d + \epsilon_m d_d}{d_m + d_d}, \quad \epsilon_y = \epsilon_{\perp} = \left( \frac{\epsilon_m^{-1} d_m + \epsilon_d^{-1} d_d}{d_m + d_d} \right)^{-1} \quad (2)$$

در رابطه فوق  $\epsilon_d$ ،  $\epsilon_m$  و  $d_d$  و  $d_g$  به ترتیب ضریب دی الکتریک و ضخامت  $\text{Al}_2\text{O}_3$  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  $\epsilon_d$  برابر با ۳٫۵ و ضخامت دی الکتریک ۲۰ nm در نظر گرفته شده است. همچنین برای محاسبه  $\epsilon_g$  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،  $\epsilon_x \epsilon_y > 0$  است که شامل

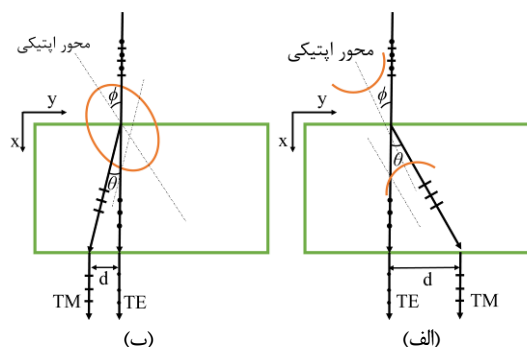


شکل ۴: نحوه عملکرد مقسم پرتو حساس به قطبش در برابر پرتو با قطبش TE (الف) و TM (ب)

عبور می‌کند اما موج TM با زاویه  $۶۸,۷۱^\circ$  درجه در ساختار می‌شکند. با توجه به اینکه طول این مقسم پرتو حساس به قطبش برابر با  $۱۰\mu\text{m}$  در نظر گرفته شده است لذا مقدار walk-off برابر با  $۱۲,۸۳\mu\text{m}$  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 خروجی‌ها 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  $۰,۴\text{ eV}$  در نظر گرفته شده است. برای دستیابی به بیشترین فاصله بین دو خروجی پتانسیل حالت دوم را از  $۰,۱\text{ eV}$  الی  $۱\text{ eV}$  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  $۰,۵\text{ eV}$



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

فرکانس‌های کوچکتر از  $۴۳,۷\text{ THz}$  می‌باشد و در ناحیه دوم  $\epsilon_x < 0$  و  $\epsilon_y > 0$  می‌باشد که شامل فرکانس‌های بزرگتر از  $۴۳,۷\text{ THz}$  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  $\phi$  با خط عمود بر فصل مشترک هوا و فراماده است. پرتو TM عبوری با زاویه  $\theta$  از ساختار عبور می‌کند. مقدار این زاویه از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۹]:

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

در رابطه فوق  $f = \epsilon_y / \epsilon_x$  می‌باشد. طبق محاسبات انجام شده به ازای  $\phi = ۱۰^\circ$  و در فرکانس  $۴۴\text{ THz}$  مقدار  $\theta$  برابر با  $۶۸,۷۱۷۳^\circ$  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

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

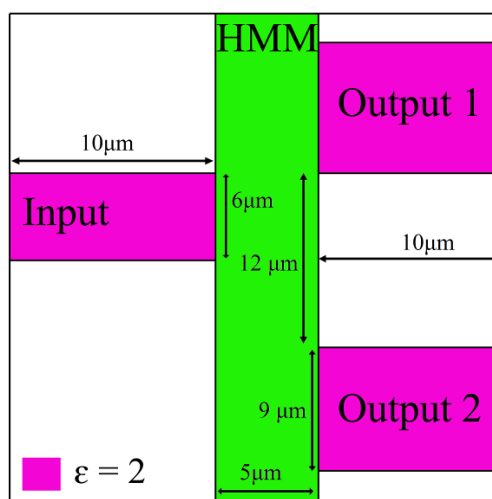
شکل ۷ نتایج حاصل از شبیه سازی به روش المان محدود را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است برای پتانسیل شیمیایی  $0.4 \text{ eV}$  پرتو ورودی از خروجی دو خارج می‌شود در این حالت مقدار ضریب انتقال برابر با  $60\%$  است. به ازای پتانسیل  $0.5 \text{ eV}$  پرتو ورودی از خروجی اول خارج می‌شود مقدار ضریب انتقال در این صورت برابر با  $57\%$  است.

### ۳- نتیجه گیری

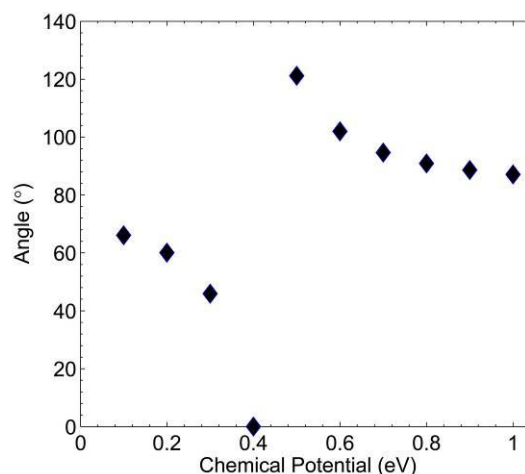
در این مقاله ما با استفاده از فراماده هذلولی یک مقسم پرتو حساس به قطبش طراحی کرده‌ایم که قابلیت تنظیم پذیری دارد. با تغییر پتانسیل شیمیایی گرافن می‌توان شدت اثر walk-off را تنظیم کرد. همچنین y-branch ارائه داده‌ایم که با تغییر بایاس گرافن پرتو ورودی به هر یک از شاخه‌های خروجی هدایت می‌شود. ساختار ارائه شده دارای مقدار انتقال نسبتاً 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 (۲۰۰۴) ۱۰۳۲-۱۰۴۳.
- [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. Lett.** ۳۵ (۲۰۱۰) ۱۶-۱۸.
- [۴] Cortes C., Newman W., Molesky S., Jacob Z., *Quantum nanophotonics using hyperbolic metamaterials*, **J. Opt.** ۱۴ (۲۰۱۲) ۰۶۳۰۰۱.
- [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) ۳۶۷-۳۸۰.
- [۶] Dai D., Bowers J. E., *Novel ultra-short and ultra-broadband polarization beam splitter based on a bent directional coupler*, **Opt. express.** ۱۹ (۲۰۱۱) ۱۸۶۱۴-۱۸۶۲۰.
- [۷] Li L., Dobrowolski J., *High-performance thin-film polarizing beam splitter operating at angles greater than the critical angle*, **Appl. Opt.** ۳۹ (۲۰۰۰) ۲۷۵۴-۲۷۷۱.
- [۸] Ghirardi F., Brandon J., Carre M., Bruno A., Menigaux L., Careno A., *Polarization splitter based on modal birefringence in InP/InGaAsP optical waveguides*, **IEEE Photon. Technol. Lett.** ۵ (۱۹۹۳) ۱۰۴۷-۱۰۴۹.
- [۹] Sun J., Liu L., Dong G., Zhou J., *Efficient polarization beam splitter based on an indefinite medium*, **J ELECTROMAGNET WAVE.** ۲۶ (۲۰۱۲) ۱۴۲۳-۱۴۳۱.

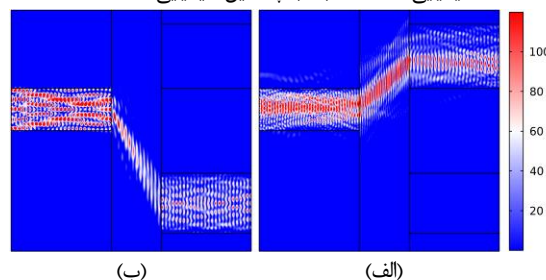


شکل ۵: ساختار پیشنهادی برای y-branch



شکل ۶: اختلاف بین دو زاویه شکست پرتو TM بر حسب پتانسیل‌های

شیمیایی مختلف نسبت به پتانسیل شیمیایی  $0.4 \text{ eV}$



شکل ۷: نحوه عملکرد y-branch به ازای پتانسیل شیمیایی (الف)  $0.4 \text{ eV}$  و (ب)  $0.5 \text{ eV}$

اتفاق می‌آفتد. این اختلاف برابر با  $121.2^\circ$  درجه است.

با توجه به شکل ۲، در فرکانس  $44 \text{ THz}$  و پتانسیل  $0.4 \text{ eV}$  مقدار ضرایب دی الکتریک برابر با  $\text{Re}(\epsilon_x) = 0.1148$  و  $\text{Re}(\epsilon_y) = 3.4898$  است که با توجه به رابطه (۳) زاویه شکست برابر با  $69.7173^\circ$  می‌شود. همچنین برای پتانسیل الکتریکی  $0.5 \text{ eV}$  مقدار ضرایب دی الکتریک برابر با  $\text{Re}(\epsilon_x) = -0.7162$  و  $\text{Re}(\epsilon_y) = 3.0894$  است.