

Radar Vol. 10, No. 2, Autumn & Winter 2022, Serial No. 27



ISSN: 2345-4024, E-ISSN: 2345-4032

Highly efficient tunable broadband terahertz polarizers based on graphene metasurface

E. Mazraeh fard¹, A.A. Ghanbari²

²Associate Professor, University of Shiraz, Shiraz, Iran

(Received:2022 /10/16, Revised: 2022/12/23, Accepted: 2023/01/02, Published: 2023/01/21)

DOR: https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1401.10.2.1.2

Abstract

Ultrathin tunable broadband terahertz transmission mode linear-to-circular polarizers are proposed and numerically validated. Each structure consists one or two stack of a dielectric substrate with slotted graphene. Both polarizers yield tunable broadband conversion with large transmission coefficients in terahertz frequency range. Compared to the previous polarizers, the proposed structure with one stack exhibits a 29% larger fractional bandwidth and 49% larger transmittance. The polarizer with two stack features a 77% larger fractional bandwidth and 13% larger transmittance, compared to the previous polarizers, with excellent axial ratio. The tuning frequency range for the proposed one- and two-stack structures is (2.9 to 5.1) and (2.2 to 5.3) THz, respectively. The tuning is achieved by varying the graphene Fermi energy (chemical potential) from 0.2 to 1 eV, by the application of a DC bias voltage. In addition, in the previous structures, the graphene layer is discrete, so in order to control the structures by applying an external voltage, it is necessary to connect all the graphene patches with thin metal wires, which in practice can be very complicated and difficult. While in the presented structures, the graphene layer is continuous and we will not have these problems. Moreover, the polarization conversion performance is well maintained under oblique incidence condition, over a wide range of incident angles up to 60°. The size of the square-shaped unit cell and the thickness are less than λ 0/10, much smaller than the free-space wavelength of the incident waves, λ 0. Also, to facilitate the analysis and interpretation of the results, an interesting equivalent circuit for the structure is provided. With the above features, the present work offers a further step in developing controllable polarization converters with potential applications in imaging, sensing, and communications.

Keywords: : Equivalent Circuit, Tunable Broadband Terahertz Polarizers, Graphene metasurfaces, Conversion of Linear to Circular Polarization.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

Authors



*Corresponding Author Email: alighanbari@shirazu.ac.ir



«راوار»



سال دهم، شماره ۲، فصل پاییز و زمستان ۱۴۰۱؛ ص ۱۰۱-۹۱

علمی - پژوهشی

قطبش گرهای تراهرتز پهن باند قابلتنظیم با راندمان بالا مبتنی بر فرا سطوح گرافنی

عیسی مزرعه فرد '، عباس علی قنبری*^۲ 回

۱- دکتری، ۲- دانشیار، دانشگاه شیراز، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۴، بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۰۲، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۲، انتشار: ۱۴۰۱/۱۱/۱

DOR: https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1401.10.2.1.2

6	•	ر ایط و ضوابط مجوز (Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.	* این مقاله یک مقاله با دسترسی آز اد است که تحت شر
	BY	💿 نویسندگان	ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

چکیدہ

در مقاله حاضر دو قطبشگر تراهرتز پهنباند قابل تنظیم فوق العاده نازک با راندمان بالا مبتنی بر فراسطوح گرافنی که در حالت انتقال، قطبش خطی را به دایروی تبدیل می کنند ارائه شده است. هر ساختار شامل یک یا دو پشته از بستر دی الکتریک با لایه گرافنی شکافدار می باشـد. هر دو قطبشگر پهنای باند قابل تنظیم وسیعی با ضریب انتقال بزرگ در محدوده فرکانس تراهرتز را ارائه می دهند. در مقایسه با قطبشگرهای قبلی، ساختار پیشنهادی با یک پشته، از نظر پهنای باند کسری ۲۹ درصد و از نظر ضریب انتقال ۴۹ درصد بیشتر است. قطبشگر دو پشته، از نظر پهنای باند کسری ۷۷ درصد و از نظر ضریب انتقال ۱۳ درصد در مقایسه با قطبشگرهای قبلی بیشتر و دارای نسبت محوری خیلی خوبی می باشد. محدوده فرکانس قابل تنظیم برای ساختارهای با یک و دو پشته پیشنهادی به ترتیب (۹/۲ تـا ۵/۱) و (۲/۲ تـا ۳/۵) تراهرتـز است. آید. علاوه بر این، در ساختارهای قبلی از لایه گرافنی گسسته استفاده شده است، بنابراین برای کنترل ساختار با اس CD به دست می لازم است تمامی پچ های گرافن را با سیم های فلزی نازک به هم وصل کنیم، ایـن کـار در عصل می تواند بسیار پیچیـده و دشوار باس. در حالیکه در ساختارهای ارائه شده در این مقاله، لایه گرافن از ۲/۰ به ۱ الکترون ولت، با اعمال ولتاژ بایاس CD به دست می قابلیت تنظیم پذیری با تغییر سطح انرژی فرمی (پتانسیل شیمیایی) گرافن از ۲/۰ به ۱ الکترون ولت، با اعمال ولتاژ بایاس CC به می در حالیکه در ساختارهای ارائه شده در این مقاله، لایه گرافن پیوسته استه بنابراین برای کنترل ساختار با اعمال ولتاژ بایاس خـارجی، در حالیکه در ساختارهای ارائه شده در این مقاله، لایه گرافن پیوسته است و این مشکلات را نخواهیم داشت. افزون بر این، عمل تبدیل قطبش در تابش مایل، در طیف وسیعی از زوایای برخورد تا ۶۰ درجه به خوبی حفظ میشود. ابعاد سول واحد و ضار این، عمل تبدیل قطبش در تابش مایل، در طیف وسیعی از زوایای برخورد تا ۶۰ درجه به خوبی حفظ میشود. ابتاد والول واحد و ضامت آن کمتر از 10/ م⁰ است، در تابش مایل، در طیف وسیعی از زوایای برخورد تا ۶۰ درجه به خوبی حفظ میشود. ابعاد ولول واحد و محامت آن کمتر از 10/ م⁰ است، سر تابش مایل، در طیف وسیعی آز زوادی م¹ می می در می همچنین جهت تسهیل در تحلیل و تفسیر نتایج، مدار معـادل سـاختار ارائه شـده

كليدواژهها: مدار معادل، قطبش گرهای پهن باند قابل تنظيم تراهر تز، فرا سطوح گرافنی، تبديل قطبش خطی به دايروی

۱– مقدمه

تا به امروز، انواع مختلفی از مبدل های قطبش الکترومغناطیسی بر اساس فرامواد و فراسطوح گزارش شده است [۱–۱۱]. اجرای عملی یک قطبشگر می تواند یک کار چالش برانگیز باشد زیرا باند فرکانسی مورد علاقه ممکن است تغییر کند و این کار مستلزم این است که ساختار

* رايانامه نويسنده مسئول: alighanbari@shirazu.ac.ir

مجدداً بازسازی شود. با این حال، گرافن به دلیل ویژگیهای جذاب مانند انعطاف پذیری، برهمکنش قوی با نور در فرکانسهای THz و رسانایی سطحی قابل تنظیم (با اعمال ولتاژ خارجی) در بسیاری از دستگاههای قابل تنظیم استفاده شده است [۱۲–۱۷]. با توجه به ویژگی های فوق، اخیراً قطبشگرهای قابل تنظیم مختلفی معرفی شده اند [۸۸– ۹۹]. بیشتر این قطبشگرها در پهنای باند باریک و با راندمان انتقال کم کار می کنند. به عنوان مثال، H. Cheng و همکاران، مبدلهای قطبش قابل تنظیم، بر اساس فراسطحهای گرافن با سلولهای واحد متقاطع شکل، طراحی کردند، اما پهنای باند آن ها محدود بود[۴۰]. و

همكاران يك فراسطح گرافن قطبشگر پهن باند با سلول واحد متشكل از یک پچ گرافنی مستطیلی شکل [۳۰] طراحی کردند. اما، ضریب انتقال آن کم است. علاوه بر این، در ساختارهای قبلی لایه گرافن گسسته است (پچهای گرافنی جزیره جزیره هستند)، بنابراین برای کنترل ساختار با اعمال ولتاژ خارجی، لازم است تمام پچ های گرافن را با سیم های فلزی باریکی مانند [۴۵-۴۹] به هم وصل شوند. این کار در عمل می تواند بسيار پيچيده و دشوار باشد. بنابراين، ارائه قطبشگر پهن باند قابل تنظيم با ضريب انتقال بالا و با لايه گرافن پيوسته يک کار چالش برانگيز است. در این مقاله قطبشگرهایی پهن باند با ضریب انتقال بالا و با یک لایه گرافنی پیوسته ارائه داده ایم. با توجه به اینکه در این ساختارها لایه گرافنی پیوسته میباشد (پچهای گرافنی جزیره جزیره نیستند)، با این كار توانستيم مشكلات فوق را بر طرف كنيم. علاوه بر اين جهت تسهيل در تحلیل و تفسیر نتایج، مدار معادل جالبی برای ساختار ارائه کردیم. در کار حاضر، دو قطبشگر پهن باند قابل تنظیم مبتنی بر گرافن پیشنهاد کردیم. هر قطبشگر شامل یک یا دو پشته از بستر دی الکتریک با لایه گرافن شکافدار است. به صورت عددی نشان دادیم که قطبشگر های پیشنهادی در فرکانس های تراهرتز، پهنای باند قابل تنظیم وسیعی با ضرایب انتقال بزرگ ارائه می دهند. در مقایسه با قطشگرهای قبلی، ساختار یک پشته پیشنهادی، ۲۹ درصد افزایش پهنای باند کسری و ۴۹ درصد افزایش ضریب انتقال را به ارمغان آورده است و ساختار دو پشته پیشنهادی، ۷۷ درصد افزایش پهنای باند کسری و ۱۳ درصد افزایش ضریب انتقال را بدست داده است و ضریب نسبت محوری^۱ (AR) هر دو ساختار بسیار خوب می باشد. AR به عنوان نسبت بزرگی محورهای اصلي و فرعى بيضي قطبش امواج انتقالي يا بازتابي تعريف مي شود. AR همیشه یک عدد حقیقی مثبت است که اغلب در مقیاس لگاریتمی برحسب دسی بل (dB) بیان می شود. برای قطبشگر خطی به دایره ای، دستیابی به AR کوچک در محدوده فرکانسی وسیع مورد علاقه است. محدوده فرکانسی که در آن AR کمتر از ۳ دسی بل است به عنوان پهنای باند قطبشگر در نظر گرفته می شود. بازه فرکانسی و قطبش را می توان با تغییر سطح انرژی فرمی (پتانسیل شیمیایی) گرافن، با استفاده از ولتاژ بایاس DC متغیر، به صورت پویا تنظیم کرد. بازه فرکانسی عملیاتی که نسبت محوری آن کمتر از ۳ دسی بل است، برای ساختارهای یک و دو پشته پیشنهادی به ترتیب (۲/۹ تا ۵/۱) و (۲/۲ تا ۵/۳) تراهرتز است. در هر دو مورد، عملکرد در باندفرکانسی وسیعی تا زاویه برخورد ۶۰ درجه به خوبی حفظ می شود. در بخش ۲ مبدل های ییشنهادی و ویژگی های اساسی آنها معرفی می شوند. در بخش ۳، بحث

¹ Axial Ratio

دقیقی از نتایج شبیه سازی و مقایسه با قطبشگرهای قبلی ارائه و در نهایت، نتیجه گیری در بخش ۴ ارائه شده است.

۲- ساختار و شبیه سازی عددی

شکل ۱ فراسطح پیشنهادی که از آرایه پچهای گرافنی شکافدار روی یک بستر دی الکتریک تشکیل شده است را نشان میدهد.



شکل (۱). (الف) سلول واحد، (ب) فراسطح تشکیل شده از آرایه پچ گرافنی رسانایی سطحی گرافن مجموع عبارت های درون باند و برون باند است. در ناحیه فرکانس پایین تراهرتز، عبارت درون باند نادیده گرفته می شود و رسانایی برون باند به عنوان عبارت Drude مدل می شود [۵۰]:

$$\sigma = \frac{-je^2 E_F}{\pi\hbar(\omega - j2\Gamma)} \tag{1}$$

که E_F سطح انرژی فرمی گرافن، $\Gamma = ev_F^2/\mu E_F$ نرخ پراکندگی الکترون، $V_F \approx c/300$ سرعت فرمی، $V_F \approx c/300$ تحرک اندازه گیری شده [۳۰]، $v_F \approx c/300$ سرعت نور در فضای آزاد و e بار الکترون است. زمان آرامش $\Gamma = 1$ ، مرعت نور در فضای آزاد و e بار الکترون سازی، پارامترهای ساختار با توجه به شکل ((الف) به ایت صورت $L_y = 6.5\mu m$, $L_x = 1\mu m$, $D = 7.6\mu m$, $u_x = 0.5\mu m$, $L_x = 1\mu m$ $V_y = 0.5\mu m$, $L_x = 1\mu m$, $D = 7.6\mu m$, $e_x = 2.25$, $h = 1\mu m$ m_x شبیه سازی، با استفاده از نرمافزاری تجاری CST انتخاب می شوند، x مر آن، منبع تحریک یک موج تخت با قطبش خطی در جهت xمی شود: u_x می شود:

$$T_{ij} = \left| \frac{E_j^{Trans}}{E_i^{Inc}} \right|, (i.j = x.y)$$
(Y)

که در آن E_i^{Inc} میدان الکتریکی امواج تابشی درجهت x یا y و E_i^{Inc} مولفه x یا y میدان الکتریکی امواج انتقالی است [۳۰]. فاز

² Fermi Energy Level

³ Mobility

به این صورت تعریف می شوند:

$$\phi_{ij} = \arg\left(\frac{E_j^{Trans}}{E_i^{Inc}}\right) \tag{(7)}$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ساختار تک پشته



شکل (۲). (الف) ضرایب انتقال و (ب) اختلاف فاز برای امواج تابشی مودی در جهت x و y برای ساختار پیشنهادی یک پشته با $D = 7.6 \mu m$. $E_F = 0.95 eV$. $\varepsilon_r = 2.25$. $h = 1 \mu m$. $L_y = 6.5 \mu m$. $L_x = 1 \mu m$

به دلیل عدم برابری طول و عرض شکاف پچ گرافنی، نمودارهای ضرایب انتقال متفاوتی برای قطبش های x و y مشاهده می شود. جهت تحلیل بیشتر میتوانیم همانند روشی که در [۵۴] ارائه کرده ایم، مدار معادل را به دست آوریم. واضح است که با برخورد عمودی موج صفحه ای به سطح، امپدانس کل ساختار ارائه شده Z_{in} ، برابر با موازی شده امپدانس لایه گرافنی متناوب z_s و امپدانس لایه دی الکتریک Z_d مطابق شکل ۳ می باشد ($Z_d | Z_s = Z_s$). امپدانس

ورودی لایه دی الکتریک Z_d برای دو حالت TE و TM یکسان است و رودی لایه دی الکتریک Z_d برای دو حالت TE و TE ی قابل محاسبه است. از TE می می توان نشان داد که رفتار نمودار Z_s در دو حالت TE و TM، مشابه نمودار ضریب انتقال می باشد. یعنی از بین امپدانس های Z_d فقط امپدانس Z_s اثر مهم و کلیدی بر رفتار نمودار ضریب انتقال دارد. بنابرین جهت سهولت و سادگی امر فقط Z_s را در دو حالت TE و TE مورد بررسی قرار می دهیم.



شکل (۳). مدار معادل ساختار ارائه شده

برای مود TE، میدان تابشی مطابق شکل 4 در جهت x می باشد. بنابرین می توان خطوط عمودی A و B (با اندیس های I و 7) را مطابق شکل 4 به عنوان 4 گره مدار معادل در نظر گرفت. در مطابق شکل 4 با توجه به جهت میدان تابشی می توان سطح پچ گرافنی را به چند قسمت تقسیم و شماره گذاری کرد. هر کدام از این نواحی معادل با مدار LR با مقاومت (R) و سلف (L) می باشد. از طرفی امپدانس شکاف داخل پچ گرافنی معادل با یک خازن (C_{slot}) و یک سلف (L_{slot}) موازی شده است [46]. به این ترتیب مدار معادل آرایه سطحی گرافنی در حالت TT مطابق شکل 4 خواهد بود.

برای مود TM، میدان تابشی مطابق شکل ۶ در جهت y میباشد؛ بنابراین میتوان خطوط افقی A و B (با اندیسهای ۱ و ۲) را مطابق شکل ۷ بهعنوان ۴ گره مدار معادل در نظر گرفت. در این حالت نیز میتوان همانند روش قبل مدار معادل آرایه سطحی گرافنی مود TM را مطابق شکل ۷ به دست آورد.



شکل (۷). مدار معادل آرایه سطحی گرافنی در حالت TE.

حال با داشتن مدارهای معادل آرایه سطحی گرافنی در حالت TE وTM می توان نتایج شکل ۲ را اینگونه تفسیر کرد: با توجه به اینکه مطابق شکل ۸(الف)، در حالت TE (وقتی که مولفه تابشی میدان فقط در جهت x باشد)، عرض شکاف بسیار بیشتر از طول آن است بنابراین در این حالت مقدار خازن C_{slot} قابل توجه بوده و مدار دارای خاصیت القایی- خازنی خواهد بود و مطابق شکل ۲(الف) در فرکانس خاصی رزونانس خواهد کرد. در حالیکه مطابق شکل ۸(ب)، در حالت (وقتی که مولفه تابشی میدان فقط در جهت y باشد)، عرض TM شکاف بسیار کمتر از طول آن است، بنابراین در این حالت، مقدار ظرفیت خازن C_{slot} نسبت به حالت TE ناچیز است و می توان گفت در حالت TM مدار فقط دارای خاصیت القایی بوده و مطابق شکل ۲(الف) رزونانس نخواهد کرد. در واقع در حالت TM خاصیت القایی غالب است. همانطور که در شکل ۲(الف) مشاهده می شود، در فركانس f_0^{TE} فقط مود TM (مولفهv) از ساختار عبور مى كند. بنابراین در این فرکانس انتظار قطبش خطی را داریم. در مرحله بعد، نسبت محوری موج انتقالی برای ساختار یک پشته پیشنهادی را محاسبه می کنیم. فرمول کلی برای محاسبه AR [۵۱]:

$$AR = \sqrt{\frac{E_x^2 + E_y^2 + \sqrt{E_x^4 + E_y^4 + 2E_x^2 E_y^2 \cos\left(2\left(\phi_x - \phi_y\right)\right)}}{E_x^2 + E_y^2 - \sqrt{E_x^4 + E_y^4 + 2E_x^2 E_y^2 \cos\left(2\left(\phi_x - \phi_y\right)\right)}}}$$
(*)

که E_x و E_y دامنه مولفه های میدان الکتریکی هستند و ϕ_x و ϕ_x و E_x فازهای این مولفه ها هستند. در کار حاضر، مانند [۳۰]، موج تابشی به صورت زیر انتخاب شده است:

$$\begin{vmatrix} E_i^{Inc} \end{vmatrix} = E_{0i} \\ \phi_i^{Inc} = \phi_{0i} \end{aligned} \tag{(a)}$$

که در $E_{0i} = E_{0i}$ مقادیر داده شده است. برای به دست آوردن نسبت محوری موج انتقالی، دامنه و فاز مولفه های موج انتقالی به صورت زیر بدست می آید:



شکل (۴). لایه گرافنی در معرض میدان الکتریکی در حالت TM.



شکل (۵). مدار معادل آرایه سطحی گرافنی در حالت TM.



شکل (۶). لایه گرافنی در معرض میدان الکتریکی حالت TE.

$$\begin{vmatrix} E_i^{Trans} \end{vmatrix} = T_{ii} \begin{vmatrix} E_i^{Inc} \end{vmatrix}$$

$$\phi_i^{Trans} = \phi_{ii} + \phi_i^{Inc}$$
(7)

با قراردادن (۵) در (۶) و (۶) در (۴)، AR به صورت زیر بدست می آید:

$$AR = \sqrt{\frac{T_{xx}^2 + T_{yy}^2 + \sqrt{T_{xx}^4 + T_{yy}^4 + 2T_{xx}^2 T_{yy}^2 \cos(2\Delta\phi)}}{T_{xx}^2 + T_{yy}^2 - \sqrt{T_{xx}^4 + T_{yy}^4 + 2T_{xx}^2 T_{yy}^2 \cos(2\Delta\phi)}}}$$
(Y)

.
$$\Delta \phi = \phi_{xx} - \phi_{yy}$$
 که



TE شکل (۸). توزیع میدان الکتریکی روی آرایه در حالت (الف) تحریک TE (مولفه *x*)، (ب) تحریک TM (مولفه *x*).

با درج دامنه و فاز ضرایب انتقال شکل ۲ در (۷)، نسبت محوری موج انتقالی، مطابق شکل ۹ به دست می آید. همانطور که در ایـن شـکل مشاهده می شود، در فرکانس f_0^{TE} ، قطبش خطی اسـت، در حالیکـه در محدوده f_0 ، چون نسبت محوری کمتـر از ۳dB است، قطـبش دایره ای خواهد بود. جدول ۱ تغییرات فرکانس مرکزی، f_0 ، ضریب ناتقال، (Y, = x, y) در f_0 ، اختلاف فاز، $\phi \Delta$ ، پهنـای بانـد، f_Δ پهنای باند کسری (FBW)، نسبت محـوری، AR، و نسـبت محـوری متوسط در پهنای باند BW (AAR) برحسب W را نشان می دهـد. طبق این جدول، پهنای باند و ضریب انتقال ساختار تک پشته نسبت به [۳۰] به ترتیب ۲۹ درصد (از ۱۷ بـه ۲۲ درصـد) و ۴۹ درصـد (از ۵۵ به ۸۲ درصد) افـزایش مـی یابـد، امـا نسـبت محـوری متوسـط معر (AAR)، ۶۶ درصد (از BBN) تا (۲۵طله) افزایش می یابد. این نشـان

باند AAR، ۳dB، تبادل وجود دارد.

عملکرد قطبشگر به کمک سطح انرژی فرمی گرافن E_F ، به راحتی قابل تنظیم است. سطح انرژی فرمی را می توان با ایجاد ناخالصی یا V_B و E_F با اعمال ولتاژ بایاس، V_B ، تغییر داد [۳۰, ۵۲]. رابطه بین در [۴۵-۴۸, ۵۲-۵۴] آمده است. نسبت محوری برای مقادیر مختلف ۱۰ الکترون ولت، محاسبه و نتایج در شکل ۱۰ */6 ، */6 ، */7نشان داده شده است. مشاهده می شود که با تغییر $E_{\scriptscriptstyle F}$ ، می توان به طور موثر f_0 و محدوده فرکانسی که در آن نسبت محوری کمتـر از ۳ دسی بل است، را تغییر دهیم. جدول ۲ تغییرات محدوده فرکانس عملیاتی و پهنای باند مربوطه را بر حسب سطح انرژی فرمی گرافن نشان می دهد. طبق این شکل و جدول۲، با کاهش سطح انرژی فرمی E_F فرکانس مرکزی کاهش مییابد، اما نسبت محوری افزایش E_F می یابد. محدوده فرکانسی را که در آن نسبت محوری کمتر از ۳ .5.2THz، تا $E_F = 0.4eV$ ، برای $E_F = 0.4eV$ ، تا $E_F = 0.4eV$ برای $E_F = 1eV$ ، به عنوان پهنای باند عملیاتی کلی تنظیم پذیر در نظر می گیریم. پهنای باند کسری، مربوط به محدوده فرکانس فوق، 2.8THz تا 2.8THz، ۶۰ درصد است.

به منظور اعمال ولتاژ بایاس الکترواستاتیک به پچهای گرافن، نوارهای فلزی باریک (یا الکترودهای شفاف) را میتوان در زیر بستر ۳۰. ۵۳]، به عنوان صفحه زمین DC قرار دهیم. یک سر ولتاژ بایاس *V_B* به لایه گرافن و سر دیگر به صفحه زمین DC متصل است.



 $D = 7.6 \mu m$ ، $D = 7.6 \mu m$ ، نسبت محوری ساختار پیشنهادی یک پشته با . $E_F = 0.95 eV$ ، $\varepsilon_r = 2.25$ ، $h = 1 \mu m$ ، $L_y = 6.5 \mu m$ ، $L_x = 1 \mu m$

جدول (۱). فرکانس مرکزی، *f* ، انتقال در *f* ، اختلاف فاز در *f* ، پهنای باند، Δf ، پهنای باند کسری (FBW) و نسبت محوری متوسط (AAR) بر روی پهنای باند برای ساختار تک پشته پیشنهادی

لايه	AAR	FBW	Δf	$\Delta \phi$	T	f ₀	ساختار
گرافن	[dB]	(%)	[THz]	[dg.]	(%)	[THz]	



شکل (۱۱). (الف) دامنه ضرایب انتقال میدان تابشی درجهت x e (y) e (y) اختلاف فاز، تحت تابش مایل، برای زوایای تابش ۲۰ تا ۶۰ درجه، با گام ، $L_y = 6.5 \mu m$ ، $L_x = 1 \mu m$ ، $D = 7.6 \mu m$ ، $E_F = 0.95 eV$ ، $\varepsilon_r = 2.25$ ، $h = 1 \mu m$



 ϵ شكل (۱۲). نسبت محورى تحت تابش مايل، براى زواياى تابش \cdot تا $L_x = 1$. $L_x = 1$ ، $D = 7.6 \mu m$ ، $L_x = 6.5 \mu m$ ، $L_x = 1 \mu m$ ، $D = 7.6 \mu m$ ، $E_F = 0.95 eV$ ، $\varepsilon_r = 2.25$ ، $h = 1 \mu m$

۲-۲- ساختار دو پشته

به منظور کاهش نسبت محوری، همانطور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است از ساختار دو پشته استفاده کردیم. نتایج در شکل ۱۴، شده است از ساختار دو پشته استفاده کردیم. نتایج در شکل ۱۴، شکل ۱۵ و جدول ۳ نشان داده شده است. همچنین نتایج [۳۰] برای مقایسه اضافه شده است. در جدول ۳، فرکانس مرکزی f_0 , انتقال در f_0 ، اختلاف فاز در f_0 ، پهنای باند، میانگین نسبت محوری در پهنای باند و نوع لایه گرافنی نشان داده شده است. محوری در پهنای باند و نوع لایه گرافنی نشان داده شده است. مرکزی ما n متقال در f_0 ، اختلاف فاز در f_0 ، پهنای باند، میانگین نسبت محوری در پهنای باند و نوع لایه گرافنی نشان داده شده است. محوری در پهنای باند و نوع لایه گرافنی نشان داده شده است. محوری در پهنای باند و نوع لایه گرافنی می باند (داده شده است. با مقایسه محوری در پهنای باند و دو پشته، مشاهده می شود که با افزایش حمد یابد (از ۸۲ به ۶۲ درصد)، اما $\phi \Delta$ و پهنای باند افزایش می یابد و میانگین نسبت

گسسته	۱/۵	۱۷	•/٨	٩٣	۵۵	۴/۷۵	[٣٠]
پيوسته	۲/۵	٢٢	١	۶۵	۸۲	۴/۶۵	پیشنهادی (تک پشته)
-	+99	+79	-	-	+۴٩	-	مقایسه (٪)



شکل (۱۰). نسبت محوری ساختار یک پشته پیشنهادی محاسبه شده برای مقادیر مختلف سطح انرژی فرمی، ۲/۴، ۰/۶، ۱/۰ و ۱ الکترون ولت.

جدول (۲). فرکانس مرکزی، _۵6 ، پهنای باند، ۵<u>۲</u>۰ ، پهنای باند کسری (FBW) و نسبت محوری (AR) در مقادیر مختلف سطح انرژی فرمی، ۲۰/۴، ۰/۰۶، ۸/۰ و ۱ الکترون ولت برای ساختار یک پشته.

AAR [dB]	FBW (%)	Δf [THz]	f_0 [THz]	E_F [eV]	رديف
<3	٣٩	$\Delta/T-T/F=1/\lambda$	4180	۱/۰	١
<3	۲۸	4/8-4/4=1/1	۴/۳۰	• /٨	٢
<3	77	۴/•-۳/۲=•/۸	٣/٧٠	۰/۶	٣
<3	١٣	٣/٢-٢/٨=٠/۴	۳/۰۵	۰/۴	۴

یکی دیگر از ویژگی های جالب قطبشگر پیشنهادی، عملکرد آن در تابش مایل است. ضریب انتقال و اختلاف فاز در زوایای برخورد مایل از ۲۰ تا ۶۰ درجه در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می شود، ضریب انتقال و اختلاف فاز زمانیکه زاویه برخورد از ۲ تا ۶۰ درجه تغییر می کند، تفاوت چندانی ندارند. شکل ۲۱ نشان می دهد که در زاویه برخورد ۶۰ درجه، نسبت محوری حول فرکانس *SHI* کمتر از ۳ دسی بل و قطبش دایروی است. همانطور که در این شکل مشاهده می شود، نسبت محوری در محدوده فرکانسی وسیعی حول *H*.65*TH* زمانی که زاویه برخورد از ۰ تا ۶۰ درجه تغییر می کند، تغییر زیادی نمی کند. این نشان می دهد که حتی در زوایای تابش بزرگ، تبدیل قطبش خطی به دایروی به خوبی انجام می شود و قطبشگر عملکرد خوبی دارد.

محوری (AAR) در پهنای باند، ۵۰ درصد (از طD۸۲ به ۱/۲۵۵B) کاهش می یابد. با توجه به شکل ۱۴، شکل ۱۵ و جدول ۳، پهنای باند و ضریب انتقال ساختار دو پشته نسبت به [۳۰] به ترتیب ، ۷۷ درصد (از ۱۷ به ۳۰ درصد) و ۱۳ درصد (از ۵۵ به ۶۲ درصد) افزایش یافته است و نسبت محوری متوسط (AAR)۱۷درصد (از ۱/۵dB) به طام۲/۱) کاهش می یابد.



شکل (۱۳). شماتیکی از سلول واحد فراسطح تشکیل شده از آرایه پچ گرافنی (ساختار دو پشته).



شکل (۱۴). (الف) دامنه ضرایب انتقال، برای امواج تخت عمودی با قطبش خطی در جهت x و y (ب) اختلاف فاز برای ساختار دو پشته پیشنهادی (نوع $\varepsilon_r = 2.25$ ، $h = 1 \mu m$ ، $L_y = 6.5 \mu m$ ، $L_x = 1 \mu m$ ، $D = 7.6 \mu m$ ، Y و مقایسه آنها با ساختار تک پشته پیشنهادی (نوع ۱).

یکی دیگر از ویژگیهای جالب قطبش گر پیشـنهادی، عملکـرد آن در تابش مایل است. شکل ۱۶ نسبت محوری ساختار دوپشته پیشنهادی

را در زوایای برخورد مایل از ۲ تا ۶۰ درجه نشان میدهد. همانطور که از شکل مشاهده می شود زمانی که زاویه برخورد از ۲ تا ۶۰ درجه تغییر می کند، نسبت محوری در محدوده فرکانسی وسیعی اطراف 4.65THz تغییرات زیادی نخواهد داشت. این امر نشان می دهد که حتی در زوایای تابش بزرگ، عمل تبدیل قطبش به خوبی انجام می شود.



شکل (۱۵). نسبت محوری برای ساختار دوپشته پیشنهادی (نوع ۲) با ، $\varepsilon_r = 2.25$ ، $h = 1 \mu m$ ، $L_y = 6.5 \mu m$ ، $L_x = 1 \mu m$ ، $D = 7.6 \mu m$ (نوع ۱) ومقایسه آنها باساختار تک پشته پیشنهادی (نوع ۱) و[۳۰].

جدول (۳). فرکانس مرکزی، *f*₀ ، انتقال در *f*₀ ، اختلاف فاز در *f*₀ ، پهنای باند، Δf ، پهنای باند کسری (FBW) و نسبت محوری متوسط (AAR) بر روی پهنای باند برای ساختار تک پشته.

لايه گرافن	AAR [dB]	FBW (%)	Δf [THz]	Δφ [dg.]	T (%)	f_0 [THz]	ساختار
گسسته	/۵· ١	۱۷	• /٨	٩٣	۵۵	۴/۷۵	[٣٠]
پيوسته	/۵۰ ۲	77	۱/۰	۶۵	۸۲	۴/۶۵	پیشنهادی (تک پشته)
پيوسته	/۲۵ ۱	۳.	۱/۴	٩٠	87	۴/۶۵	پیشنهادی (دوپشته)
-	۱۷ -	ΥΥ +	-	-	۱۳ +	-	مقايسه (٪)

محدوده فرکانسی که در آن نسبت محوری کمتر از ۳ دسی بل است، با تغییر سطح انرژی فرمی، مطابق شکل ۱۷، قابل تنظیم و کنترل است. برای پنج مقدار متفاوت F_{F} ، ۲/۲، ۴/۲، ۶/۲، ۸/۲ و ۱ الکترون ولت، تبدیل قطبش خطی به دایره ای در پنج فرکانس متفاوت رخ می دهد. مطابق شکل ۱۷، با کاهش سطح انرژی فرمی، فرکانس مرکزی کاهش می یابد، اما نسبت محوری افزایش می یابد. جدول ۴ تغییر فرکانس مرکزی، f_0 ، محدوده فرکانسی که در آن نسبت محوری کمتر از ۳ دسی بل است، Δf ، پهنای باند کسری BW و نسبت محوری برای مقادیر F_F نشان می دهد. طبق این جدول، با افزایش سطح انرژی فرمی، فرکانس کاری به سمت فرکانس های بالا

شیفت پیدا می کند. پهنای بانید ۳dB از 2.1THz ، برای $E_F = 0.2eV$ تغییر می کند. $E_F = 0.2eV$ تغییر می کند. محزی از 2.2THz تغییر می کند. $E_F = 0.2eV$ محزی از $E_F = 0.2eV$ ، برای $E_F = 0.2eV$ ، برای $E_F = 1eV$ ، برای 4.65THz تغییر می کند. حداکثر پهنای باند کسری ۳۰ درصد برای $E_F = 1eV$ است که پهنای باند کسری آن قابل تنظیم (2.1THz تا 2.1THz) است که پهنای باند کسری آن ۸۷ درصد می باشد.



۶۰ ت ، شکل (۱۶). نسبت محوری تابش مایل، برای زوایای تابش تابش $L_y = 6.5 \mu m$ ، $L_x = 1 \mu m$ ، $D = 7.6 \mu m$ برای ساختار دو پشته با . $E_F = 0.95 eV$ ، $\varepsilon_r = 2.25$ ، $h = 1 \mu m$



شکل (۱۷). نسبت محوری ساختار دو پشته محاسبه شده برای مقادیر مختلف سطح انرژی فرمی، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۸/۰ و ۱ الکترون ولت.

جدول (۴). فرکانس مرکزی، *f*₀، پهنای باند A/، ۲dB، پهنای باند کسری (FBW) و نسبت محوری (AR) در مقادیر مختلف سطح انرژی فرمی، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۰، ۸/۰ و ۱ الکترون ولت برای ساختار دو پشته.

AAR [dB]	FBW (%)	Δf [THz]	f_0 [<i>THz</i>]	E_F [eV]	رديف
<3	٣٩	۵/۲-۳/۴=۱/۸	4/80	١/•	١
<3	۲۸	F/S-T/F=1/T	۴/۳۰	• /٨	٢
<3	٢٢	۴/۰-۳/۲=۰/۸	٣/٧٠	• /۶	٣

<3	١٣	۳/۲-۲/۸=۰/۴	۳/۰۵	٠/۴	۴
<3	٩	۲/۳-۲/۱=۰/۲	۲/۲۰	۰/۲	۵

مقایسه دو قطبشگر ارائه شده با قطبش گرهای کارهای قبلی در جدول ۵ آمده است. ضریب انتقال و پهنای باند قطبش گرهای ارائه شده نسبت به قطبش گرهای قبلی بهصورت چشمگیری بهبودیافته است. در همین حال، ساختارهای پیشنهادی دارای هندسه ساده هستند. علاوه بر این، عمل تبدیل قطبش در تابش مایل نیز به خوبی صورت می گیرد. افزون بر این در ساختارهای قبلی لایه گرافن گسسته است، بنابراین برای کنترل ساختارها با اعمال ولتاژ خارجی، لازم است تمام پچهای گرافن را با نوارهای فلزی باریک به هم وصل کنیم که این کار در عمل میتواند بسیار پیچیده و دشوار باشد. درحالی که در ساختارهای ارائه شده لایه گرافن پیوسته است و این مشکلات را نخواهیم داشت. علاوه بر این جهت تسهیل در تحلیل و تفسیر نتایج، مدار معادل جالبی برای ساختار ارائه کردیم.

جدول (۵). مقایسه ساختار های پیشنهادی با مبدل های قطبش حالت انتقال کارهای قبلی، با در نظر گرفتن فرکانس مرکزی، f_0 ، انتقال در f_0 ، پهنای باند کسری (FBW)، قبلی، با در نظر (AR)، پیچیدگی ساختار، وابستگی به زاویه برخورد (θ) و نوع لایه گرافن.

لايه گرافن	وابستگی به θ	ساختار	AAR [dB]	FBW (%)	T (%)	f ₀ [THz]	مرجع
گسسته	×	پیچیدہ	<٣	۱/۵	٣٠	۳۷/۹	[4.]
گسسته	×	پیچیدہ	<٣	۶	۶.	۷	[۵۵]
گسسته	×	پیچیدہ	<٣	77	84	۲/۹	[41]
گسسته	×	پیچیدہ	<٣	۳۷	۶.	١/٢	[47]
گسسته	✓	سادہ	<٣	۱۷	۵۵	۴/۷۵	[٣٠]
گسسته	~	سادہ	/۳۰ ۲	۳۷	٨٨	۴/۰۵	[۴۹] تکلایه
گسسته	~	سادہ	/r. 1	4.	69	۴/۷۵	[۴۹] دولايه
پيوسته	~	سادہ	/۵۰ ۲	٢٢	٨٢	4/80	پیشنهادی (تک پشته)
پيوسته	✓	سادہ	/۲۵ ۱	۳.	87	۴/۶۵	پیشنهادی (دوپشته)

۴- نتیجه گیری

در این مقاله دو قطبشگر تراهرتز پهن باند قابل تنظیم فوق العاده نازک با راندمان بالا مبتنی بر فراسطوح گرافنی که در حالت انتقال wave plate," Laser & Photonics Reviews, vol. 8, no. 4, pp. 626-632, 2014. https://doi.org/10.1002/lpor.201300205

- [3] S. Bhattacharyya, S. Ghosh, and K. V. Srivastava, "A wideband cross polarization conversion using metasurface," Radio Science, vol. 52, no. 11, pp. 1395-1404, 2017. https://doi.org/10.1002/2017RS006396
- [4] Z. Li et al., "Chiral metamaterials with negative refractive index based on four "U" split ring resonators," Applied Physics Letters, vol. 97, no. 8, p. 081901, 2010. https://doi.org/10.1063/1.3457448
- [5] X. Huang, D. Yang, and H. Yang, "Multiple-band reflective polarization converter using U-shaped metamaterial," Journal of Applied Physics, vol. 115, no. 10, p. 103505, 2014. https://doi.org/10.1063/1.4868076
- [6] N. Kanda, K. Konishi, and M. Kuwata-Gonokami, "Terahertz wave polarization rotation with double layered metal grating of complimentary chiral patterns," Optics express, vol. 15, no. 18, pp. 11117-11125, 2007. https://doi.org/10.1364/OE.15.011117
- [7] X.-x. Zheng, Z.-y. Xiao, and X.-y. Ling, "Broadband and efficient reflective polarization converter based on a threedimensional metamaterial," Optical and Quantum Electronics, vol. 48, no. 10, p. 461, 2016. https://doi.org/10.1007/s11082-016-0733-5
- [8] M. I. Shalaev, J. Sun, A. Tsukernik, A. Pandey, K. Nikolskiy, and N. M. Litchinitser, "High-efficiency all-dielectric metasurfaces for ultracompact beam manipulation in transmission mode," Nano letters, vol. 15, no. 9, pp. 6261-6266, 2015. https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b02926
- [9] S. Zhang et al., "Photoinduced handedness switching in terahertz chiral metamolecules," Nature communications, vol. 3, no. 1, pp. 1-7, 2012. https://doi.org/10.1038/ncomms1908
- [10] Y. Yu, F. Xiao, I. D. Rukhlenko, and W. Zhu, "High-efficiency ultra-thin polarization converter based on planar anisotropic transmissive metasurface," AEU-International Journal of Electronics and Communications, vol. 118, p. 153141, 2020. https://doi.org/10.1016/j.aeue.2020.153141
- [11] S. Sarkar and B. Gupta, "Multiband ultrathin chiral metasurface for polarization conversion, symmetric and asymmetric transmission," AEU-International Journal of Electronics and Communications, vol. 142, p. 154009, 2021. https://doi.org/10.1016/j.aeue.2021.154009
- [12] A. Farmani, M. Miri, and M. H. Sheikhi, "Analytical modeling of highly tunable giant lateral shift in total reflection of light beams from a graphene containing structure," Optics Communications, vol. 391, pp. 68-76, 2017. https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.01.018
- [13] D. L. Sounas and C. Caloz, "Electromagnetic nonreciprocity and gyrotropy of graphene," Applied Physics Letters, vol. 98, no. 2, p. 021911, 2011. https://doi.org/10.1063/1.3543633
- [14] D. L. Sounas and C. Caloz, "Gyrotropy and nonreciprocity of graphene for microwave applications," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 60, no. 4, pp. 901-914, 2012. 10.1109/TMTT.2011.2182205
- [15] J. Ding et al., "Mid-infrared tunable dual-frequency cross polarization converters using graphene-based L-shaped nanoslot array," Plasmonics, vol. 10, no. 2, pp. 351-356, 2015. https://doi.org/10.1007/s11468-014-9816-y
- [16] Y. Zhao and A. Alù, "Manipulating light polarization with ultrathin plasmonic metasurfaces," Physical Review B, vol. 84, no. 20, p. 205428, 2011. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.84.205428
- [17] Z. Hamzavi-Zarghani, A. Yahaghi, and L. Matekovits, "Electrically tunable mantle cloaking utilizing graphene metasurface for oblique incidence," AEU-International Journal

قطبش خطی را به دایروی تبدیل می کنند ارائه کردیم. قطبشگرها دارای یک یا دو زیرلایه دی الکتریک با یچ های گرافنے شکاف دار (ساختار های یک پشته و دو پشته) می باشند. در مقایسه با قطبشگرهای قبلی، ساختار پیشنهادی با یک پشته، از نظر پهنای باند کسری ۲۹ درصد و از نظر ضریب انتقال ۴۹ درصد بیشتر است. قطبشگر دو پشته، ، از نظر پهنای باند کسری ۷۷ درصد و از نظر ضریب انتقال ۱۳ درصد در مقایسه با قطبشگرهای قبلی بیشتر و دارای نسبت محوری خیلی خوبی می باشد. هر دو ساختار به صورت دینامیکی از طریق سطح انرژی فرمی گرافن، با اعمال یک ولتاژ بایاس DC تنظیم وکنترل می شوند. محدوده فرکانس عملیاتی قابل تنظیم که در آن نسبت محوری کمتر از ۳ دسی بل است، برای قطبشگر تک یشته 2.8THz تا 5.2THz و برای ساختار دو یشته 2.1THz تا 5.3THz است که با تغییر سطح انرژی فرمی از 0.2eV تا leV به دست می آید. یهنای باند کسری، مربوط به محدوده فرکانسی یادشده، برای ساختارهای یک پشته و دو پشته به ترتیب ۶۰ درصد و ۸۷ درصد است. با افزایش سطح انرژی فرمی، فرکانس کاری به سمت فرکانس های بالا شیفت پیدا می کند، همچنین پهنای باند نیز افزایش می یابد. عملکرد تبدیل قطبش در تابش مایل برای طیف وسیعی از زوایای برخورد از ۰ تا ۶۰ درجه به خوبی حفظ می شود، که نشان دهنده عملکرد قوی قطبشگرهای ارائه شده در تابش مایل است. اندازه سلول واحد و ضخامت آن کمتر از $\lambda_0/10$ است، که بسیار کوچکتر از طول موج فضای آزاد امواج تابشی، λ_0 ، می باشد. علاوه بر این در ساختارهای کارهای قبلی لایه گرافن گسسته است، بنابراین برای کنترل آن ها با اعمال ولتاژ بایاس خارجی، لازم است تمام پچ های گرافن را با نوارهای فلزی باریک به هم وصل کنیم که این کار در عمل بسیار پیچیده و دشوار باشد. در حالیکه در ساختارهای ارائه شده لایه گرافن پیوسته است و این مشكلات را نخواهيم داشت. افزون بر اين جهت تسهيل در تحليل و تفسير نتايج، مدار معادل جالبي براي ساختار ارائه كرديم. با توجه به ویژگی های یادشده، ساختارهای ارائه شده می توانند گام مفید وموثری در توسعه مبدلهای قطبش قابل کنترل با کاربردهای بالقوه در تصویربرداری، سنجش و ارتباطات بردارند.

۵- مراجع

- N. K. Grady et al., "Terahertz metamaterials for linear polarization conversion and anomalous refraction," Science, vol. 340, no. 6138, pp. 1304-1307, 2013. DOI: 10.1126/science.1235399
- [2] L. Cong, N. Xu, J. Gu, R. Singh, J. Han, and W. Zhang, "Highly flexible broadband terahertz metamaterial quarter-

metasurface," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 63, no. 5, pp. 2191-2202, 2015. 10.1109/TAP.2015.2407412

- [33] H. Cheng et al., "Refraction: Dynamically Tunable Broadband Infrared Anomalous Refraction Based on Graphene Metasurfaces (Advanced Optical Materials 12/2015)," Advanced Optical Materials, vol. 3, no. 12, pp. 1743-1743, 2015. https://doi.org/10.1002/adom.201570077
- [34] S. Quader, J. Zhang, M. R. Akram, and W. Zhu, "Graphenebased high-efficiency broadband tunable linear-to-circular polarization converter for terahertz waves," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 26, no. 5, pp. 1-8, 2020. 10.1109/JSTQE.2020.2969566
- [35] M. Sajjad, X. Kong, S. Liu, A. Ahmed, S. U. Rahman, and Q. Wang, "Graphene-based THz tunable ultra-wideband polarization converter," Physics Letters A, vol. 384, no. 23, p. 126567, 2020. https://doi.org/10.1016/j.physleta.2020.126567
- [36] R. Zhang, B. You, S. Wang, K. Han, X. Shen, and W. Wang, "Broadband and switchable terahertz polarization converter based on graphene metasurfaces," Optics Express, vol. 29, no. 16, pp. 24804-24815, 2021. https://doi.org/10.1364/OE.432601
- [37] J. Huang, T. Fu, H. Li, Z. Shou, and X. Gao, "A reconfigurable terahertz polarization converter based on metal–graphene hybrid metasurface," Chinese Optics Letters, vol. 18, no. 1, p. 013102, 2020. https://doi.org/10.1364/COL.18.013102
- [38] M. Masyukov, A. Vozianova, A. Grebenchukov, K. Gubaidullina, A. Zaitsev, and M. Khodzitsky, "Optically tunable terahertz chiral metasurface based on multi-layered graphene," Scientific reports, vol. 10, no. 1, pp. 1-10, 2020. https://doi.org/10.1038/s41598-020-60097-0
- [39] B. Bakhtiari and H. Oraizi, "Tunable Terahertz Polarization Converter Based on Graphene Metasurfaces," in 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2020: IEEE, pp. 1-4. https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.12.036
- [40] H. Cheng, S. Chen, P. Yu, J. Li, L. Deng, and J. Tian, "Midinfrared tunable optical polarization converter composed of asymmetric graphene nanocrosses," Optics letters, vol. 38, no. 9, pp. 1567-1569, 2013. https://doi.org/10.1364/OL.38.001567
- [41] H.-F. Zhang, L. Zeng, G.-B. Liu, and T. Huang, "Tunable linear-to-circular polarization converter using the graphene transmissive metasurface," IEEE Access, vol. 7, pp. 158634-158642, 2019. 10.1109/ACCESS.2019.2950847
- [42] X. Zhang, H. Ye, Y. Zhao, and H. Zhang, "Linear-to-Circular Polarization Converter with Adjustable Bandwidth Realized by the Graphene Transmissive Metasurface," Plasmonics, pp. 1-11, 2022. https://doi.org/10.1007/s11468-022-01598-8
- [43] M. Barkabian, N. Dalvand, H. Zandi, and N. Granpayeh, "Terahertz linear to circular polarization converter based on reflective metasurface," Scientia Iranica, 2021. 10.24200/SCI.2021.56700.4865
- [44] X. Qi, J. Zou, C. Li, J. Zhang, C. Guo, and Z. Zhu, "Graphenebased electrically controlled terahertz polarization switching between a quarter-wave plate and half-wave plate," Optics Express, vol. 28, no. 26, pp. 39430-39442, 2020. https://doi.org/10.1364/OE.412002
- [45] M. Huang, Y. Cheng, Z. Cheng, H. Chen, X. Mao, and R. Gong, "Based on graphene tunable dual-band terahertz metamaterial absorber with wide-angle," Optics Communications, vol. 415, pp. 194-201, 2018. https://doi.org/10.1016/j.optcom.2018.01.051
- [46] A. OTTOMANIELLO, "Giant Faraday rotation in a hybrid graphene-split ring resonators metasurface with magneto-

of Electronics and Communications, vol. 116, p. 153080, 2020. https://doi.org/10.1016/j.aeue.2020.153080

- [18] Z. Hamzavi-Zarghani, A. Yahaghi, L. Matekovits, and I. Peter, "Tunable polarization converter based on graphene metasurfaces," in 2018 IEEE Radio and Antenna Days of the Indian Ocean (RADIO), 2018: IEEE, pp. 1-2. 10.23919/RADIO.2018.8572341
- [19] J. Zhu, S. Li, L. Deng, C. Zhang, Y. Yang, and H. Zhu, "Broadband tunable terahertz polarization converter based on a sinusoidally-slotted graphene metamaterial," Optical Materials Express, vol. 8, no. 5, pp. 1164-1173, 2018. https://doi.org/10.1364/OME.8.001164
- [20] S. Luo, B. Li, A. Yu, J. Gao, X. Wang, and D. Zuo, "Broadband tunable terahertz polarization converter based on graphene metamaterial," Optics Communications, vol. 413, pp. 184-189, 2018. https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.12.036
- [21] M. Chen, W. Sun, J. Cai, L. Chang, and X. Xiao, "Frequencytunable mid-infrared cross polarization converters based on graphene metasurface," Plasmonics, vol. 12, no. 3, pp. 699-705, 2017. https://doi.org/10.1007/s11468-016-0316-0
- [22] X. Yu, X. Gao, W. Qiao, L. Wen, and W. Yang, "Broadband tunable polarization converter realized by graphene-based metamaterial," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 28, no. 21, pp. 2399-2402, 2016. 10.1109/LPT.2016.2596843
- [23] M. Chen, X. Xiao, L. Chang, C. Wang, and D. Zhao, "Highefficiency and multi-frequency polarization converters based on graphene metasurface with twisting double L-shaped unit structure array," Optics Communications, vol. 394, pp. 50-55, 2017. https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.03.008
- [24] V. S. Yadav, S. K. Ghosh, S. Bhattacharyya, and S. Das, "Graphene-based metasurface for a tunable broadband terahertz cross-polarization converter over a wide angle of incidence," Applied optics, vol. 57, no. 29, pp. 8720-8726, 2018. https://doi.org/10.1364/AO.57.008720
- [25] L. Zeng, T. Huang, G.-B. Liu, and H.-F. Zhang, "A tunable ultra-broadband linear-to-circular polarization converter containing the graphene," Optics Communications, vol. 436, pp. 7-13, 2019. https://doi.org/10.1016/j.optcom.2018.11.079
- [26] J. Li et al., "Optical polarization encoding using grapheneloaded plasmonic metasurfaces," Advanced Optical Materials, vol. 4, no. 1, pp. 91-98, 2016. https://doi.org/10.1002/adom.201500398
- [27] Y. Zhang, Y. Feng, B. Zhu, J. Zhao, and T. Jiang, "Switchable quarter-wave plate with graphene based metamaterial for broadband terahertz wave manipulation," Optics express, vol. 23, no. 21, pp. 27230-27239, 2015. https://doi.org/10.1364/OE.23.027230
- [28] J. Peng, Z. Zhu, J. Zhang, X. Yuan, and S. Qin, "Tunable terahertz half-wave plate based on hybridization effect in coupled graphene nanodisks," Applied Physics Express, vol. 9, no. 5, p. 055102, 2016. 10.7567/APEX.9.055102
- [29] C. Yang et al., "Wideband tunable mid-infrared cross polarization converter using rectangle-shape perforated graphene," Optics express, vol. 24, no. 15, pp. 16913-16922, 2016. https://doi.org/10.1364/OE.24.016913
- [30] T. Guo and C. Argyropoulos, "Broadband polarizers based on graphene metasurfaces," Optics letters, vol. 41, no. 23, pp. 5592-5595, 2016. https://doi.org/10.1364/OL.41.005592
- [31] H. Cheng et al., "Dynamically tunable broadband mid-infrared cross polarization converter based on graphene metamaterial," Applied Physics Letters, vol. 103, no. 22, p. 223102, 2013. https://doi.org/10.1063/1.4833757
- [32] A. Forouzmand and A. B. Yakovlev, "Electromagnetic cloaking of a finite conducting wedge with a nanostructured graphene

electric tunability," 2016. https://etd.adm.unipi.it/t/etd-09262016-094442

- [47] S. Barzegar-Parizi and A. Ebrahimi, "Ultrathin, polarizationinsensitive multi-band absorbers based on graphene metasurface with THz sensing application," JOSA B, vol. 37, no. 8, pp. 2372-2381, 2020. https://doi.org/10.1364/JOSAB.396266
- [48] I. Mazraeh-Fard and A. Alighanbari, "Equivalent circuit model for the analysis and design of graphene-based tunable terahertz polarizing metasurfaces," Applied Optics, vol. 61, no. 19, pp. 5760-5768, 2022. https://doi.org/10.1364/AO.460622
- [49] I. Mazraeh-Fard and A. Alighanbari, "Highly efficient tunable broadband terahertz polarizers based on a graphene metasurface," Optics Continuum, vol. 1, no. 12, pp. 2607-2620, 2022. https://doi.org/10.1364/OPTCON.472314
- [50] P.-Y. Chen, C. Argyropoulos, and A. Alu, "Terahertz antenna phase shifters using integrally-gated graphene transmissionlines," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 61, no. 4, pp. 1528-1537, 2012. 10.1109/TAP.2012.2220327
- [51] C. Balanis, "Antenna theory: analysis and design (4-th ed.). John Wiley & Sons, Inc," 2016.
- [52] B. Wu et al., "Experimental demonstration of a transparent graphene millimetre wave absorber with 28% fractional bandwidth at 140 GHz," Scientific reports, vol. 4, no. 1, pp. 1-7, 2014. https://doi.org/10.1038/srep04130
- [53] A. Dolatabady and N. Granpayeh, "Manipulation of the Faraday rotation by graphene metasurfaces," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 469, pp. 231-235, 2019. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.08.033
- [54] I. Mazraeh-Fard and A. Alighanbari, "Equivalent circuit model for a graphene-based high efficiency tunable broadband terahertz polarizer," Applied Optics, vol. 62, no. 9, pp. 2256-2265, 2023. https://doi.org/10.1364/AO.483938
- [55] S. K. Ghosh, S. Bhattacharyya, and S. Das, "Graphene-based metasurface for wideband linear to circular polarization conversion," in 2020 URSI Regional Conference on Radio Science (URSI-RCRS), 2020: IEEE, pp. 1-4. 10.23919/URSIRCRS49211.2020.9113624