

## کوپلرهای گرافنی پلاسمونی برای کاربردهای جاذب راداری

محمد باقر حیدری<sup>۱\*</sup>، علی عبدالهی<sup>۲</sup>

۱. استادیار، گروه مهندسی برق-مخابرات، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

۲. استادیار، گروه مهندسی برق-کنترل، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

تاریخ دریافت:

۵ آبان ماه ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش:

۱۱ آذر ماه ۱۴۰۳

### چکیده

در سال های اخیر، پلاسمونیک گرافن یکی از موضوعات داغ در علوم تراهرتز و نانوالکترونیک در میان دانشمندان جهان بوده است. رسانایی گرافن را می توان از طریق بایاس الکترواستاتیک، دوپینگ شیمیایی و بایاس مغناطیسی تنظیم کرد که می تواند مدولاسیون دینامیکی و کنترل فعال روی پلاریتون های پلاسمون سطحی برای طراحی و ساخت ادوات جدید در ناحیه مادون قرمز میانی، مانند پلاریزه کننده ها، موجبرها، فیلترها و حسگرها ایجاد کند. این مقاله، انواع نانو کوپلرهای گرافنی را مطالعه می کند که می توان آن ها را در حالت کلی، به چهار دسته تقسیم کرد: کوپلرهای جهتی، کوپلرهای ناهم پاسخ، کوپلرهای مسطح و کوپلرهای مبتنی بر نانو نوار. دسته اول، یعنی کوپلرهای جهتی، یک افزاره پایه در مدار فوتونیک است که در آن انرژی پلاریتون های پلاسمون سطحی، بین دو موجبر مجاور توزیع می شود. یک کوپلر ناهم پاسخ، از لایه های گرافن با بایاس های الکتریکی و مغناطیسی تشکیل شده است. کوپلر مسطح، ساده ترین ساختار در بین تمام این کوپلرها است که در آن، دو لایه گرافن، توسط یک دی الکتریک از هم جدا شده اند. دسته چهارم، مشابه کوپلر دی الکتریک است، با این تفاوت که صفحات های گرافن در این ادوات، دارای عرض محدود هستند. برای همه این دسته بندی های ذکر شده، ابتدا ساختار هر یک را معرفی کرده و سپس کاربردهای بالقوه آنها را جهت استفاده در جاذب های راداری بررسی می کنیم.

واژه های کلیدی: گرافن، پلاسمون، کوپلر، بایاس الکتریکی.

## Plasmonic Graphene Couplers for Radar Absorber Applications

Mohammad Bagher Heydari<sup>\*1</sup>, Ali Abdollahi<sup>2</sup>

1. Assistant Prof. Faculty of Technical and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

2. Assistant Prof. Faculty of Technical and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

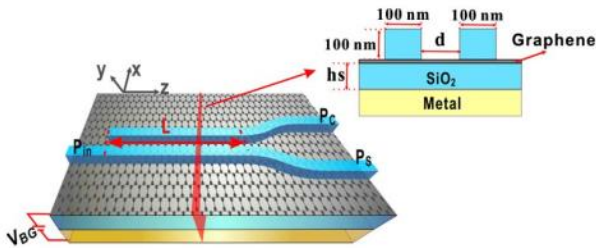
### Abstract

In recent years, graphene plasmonics has been one of the most promising debated topics among scientists in the THz and nanoelectronic sciences. The conductivity of graphene can be tuned via electrostatic bias, chemical doping, and magnetostatic bias, which can generate dynamic modulation and active control over Surface Plasmon Polaritons (SPPs) to design and fabricate innovative devices in the mid-infrared region, such as polarizers, waveguides, filters, and sensors. This paper briefly reviews of graphene-based nano-couplers, which can be divided into four categories: directional couplers, non-reciprocal couplers, planar couplers, and nano-ribbon couplers. The first category, i.e. directional coupler, is a basis device in a photonic circuit, in which the energy of SPPs is coupled between two adjacent waveguides. A non-reciprocal coupler consists of graphene layers with electric and magnetic biases. The planar coupler is the simplest structure among all these couplers, constituting two graphene layers separated by a dielectric. The fourth category is similar to the dielectric coupler, however, graphene sheets in these structures have a finite width. For all of these mentioned categories, we will introduce the configuration and investigate their potential applications in absorber radar systems.

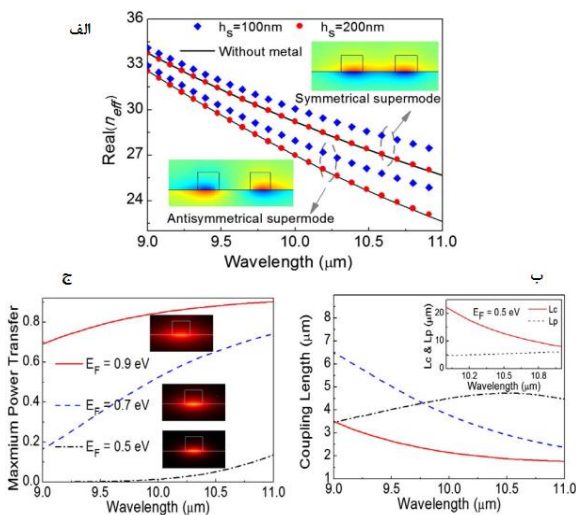
**Key words:** Graphene, Plasmon, Coupler, Electric bias.

## ۱- مقدمه

برای اهداف اندازه گیری نمونه برداری می کند. کوپلر جهتی بر مبنای موجبر پلاسمونیک گرافنی، در مقاله [۲۷] که شکل آن در زیر مشاهده می شود، معرفی شده است. دو موجبر پلاسمونیک گرافنی، با فاصله  $d$  از هم جدا شده و ناحیه تزویج به طول  $L$ ، توسط دو خم موجبری  $S$  شکل، به موجبر اولیه متصل می شوند.



شکل ۱- کوپلر جهتی بر پایه دو موجبر پلاسمونیک گرافنی که با فاصله  $d$  از هم جدا شده و ناحیه تزویج به طول  $L$ ، توسط دو خم موجبری  $S$  شکل، به موجبر اولیه متصل شده است [۲۷]



شکل ۲- (الف) قسمت حقیقی ضریب شکست موثر (ب) طول تزویج و (ج) ماکزیمم توان انتقالی بر حسب فرکانس برای موجبر شکل (۱) [۲۷]

ساختار در طول موج ۱۰.۵ میکرومتر در نرم افزار کامسول شبیه سازی شده و ضریب شکست موثر و حداکثر توان کوپلر شده بر حسب طول موج، رسم می شود [۲۷]. در این کوپلر، با تغییر سطح فرمی گرافن، ماکزیمم توان از موجبر اولیه به موجبر کناری و نیز طول تزویج، می تواند تغییر یابد. یکی از کاربردهای کوپلر جهتی، در طراحی جدا کننده بیم می باشد که در مقاله [۲۸] این طراحی صورت گرفته است. در این مقاله، یک جدا کننده بیم با استفاده از کوپلر جهتی متشکل از موجبر سیلیکونی که در داخلش، لایه های گرافنی، قرار داده شده اند، معرفی و بحث می شود [۲۸]. با طراحی دقیق، از یک شاخه کوپلر مود TE و از سمت دیگرش، مود TM خارج می شود که جزئیات آن در مقاله [۲۸] آمده است.

در مقاله [۲۹] یک کوپلر گرافنی که در آن، موج ورودی تابشی، باعث تحریک مودهای پلاسمونی در ساختار می شود، بررسی شده است. در

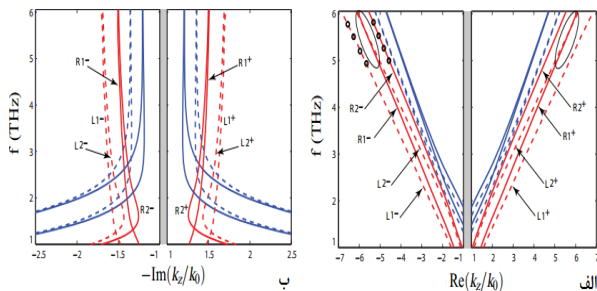
کربن، ماده اولیه حیات بر روی این سیاره و اساس همه ساختارهای ارگانیک است. به دلیل خاصیت انعطاف پذیری کربن، تعداد نامحدودی از ساختارهای مختلف و متنوع به همراه خواص فیزیکی و شیمیایی جالب از آنها وجود دارد [۱-۶]. در میان دگرشکل های کربن، گرافن، ماده ای است که در آن تنها یکی از این لایه های گرافیت وجود دارد و به عبارتی چهارمین الکترون پیوندی کربن، به عنوان الکترون آزاد باقی مانده است. گرافین یک ساختار دو بعدی از اتم های کربن است که به صورت یک شبکه کریستالی لانه زنبوری به یکدیگر متصل شده اند [۷]. این ماده دارای ثابت شبکه به اندازه ۰.۳۴۵ نانومتر بوده و هم چنین دارای قطری به اندازه قطر یک اتم کربن ۰.۱۲۵ نانومتر است [۸]. البته در بررسی های انجام شده، مشخص گردیده است که این ماده تا ضخامت ۱۰ لایه همچنان خواص خود را حفظ می کند. در بسیاری از مقالات ارائه شده در این زمینه، نیز ضخامت آن را برابر ۱ نانومتر که تقریباً ۶ لایه می شود، در نظر می گیرند. البته لازم به ذکر است تکنولوژی ساخت گرافین محدودیتی برای ساخت یک لایه از این ماده ندارد [۹]. گرافین یک ماده با قابلیت انعطاف زیاد است؛ با این وجود از لحاظ مکانیکی نیز دارای استحکام بسیار زیادی است، به طوری که استحکام آن تا ۱۰۰ برابر بیشتر از یک نوار استیل با همان ضخامت است. گرافین به علت داشتن خواص فوق العاده در رسانندگی الکتریکی و رسانندگی گرمایی، چگالی بالا و تحرک پذیری حامل های بار، رسانندگی اپتیکی و خواص مکانیکی به ماده ای منحصر به فرد تبدیل شده است [۸-۱۰]. به واسطه این خواص فوق العاده، گرافین، به عنوان کاندیدای بسیار مناسب برای جایگزینی سیلیکن در نسل بعدی قطعه های فوتونیک [۱۱-۱۸] و الکترونیک [۱۹-۲۶] در نظر گرفته شده و از این رو توجه کم سابقه ای را در تحقیقات بنیادی و کاربردی به خود جلب کرده است. گرافن به دلیل دارا بودن رسانایی قابل تنظیم رسانایی گرافن با میدان الکتریکی و مغناطیسی و توانایی انتشار امواج پلاسمونی بر روی آن، توجه محققین مخابرات را به خود جلب کرده است. در میان این ساختارها، کوپلرهای گرافنی، ساختارهای قابل توجهی می باشند که همزمان با آغاز تحقیقات در حوزه گرافن، بر روی آن ها مطالعه و تحقیق شده است. این مقاله در نظر دارد تا به مرور و بررسی کوتاهی از مقالات منتشر شده کوپلر گرافنی، بپردازد. نانو کوپلرهای گرافنی را در حالت کلی، می توان به چهار دسته تقسیم کرد: کوپلرهای جهتی، کوپلرهای ناهم پاسخ، کوپلرهای مسطح و کوپلرهای مبتنی بر نانو نوار. برای این دسته بندی های ذکر شده، ابتدا ساختار هریک از کوپلرها را معرفی کرده و سپس کاربردهای بالقوه آنها را در فرکانس های تراهرتز بررسی می کنیم.

## ۲- کوپلرهای گرافنی

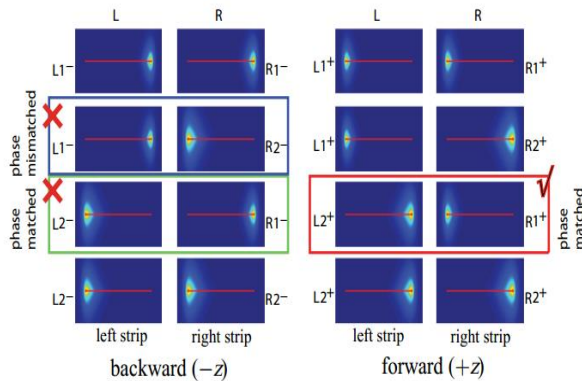
در مقاله های [۲۷-۲۹]، کوپلرهای جهتی<sup>۱</sup> گرافنی، معرفی و مطالعه می شوند. کوپلر جهت دار دستگاهی است که مقدار کمی از توان را

<sup>1</sup> Directional Coupler

شکل (۶) نمودار پاشندگی را برای مدهای حجمی و لبه ای پلاسماون های مغناطیسی را برای دو نوار مجزا (هنوز کوپل نشده اند) نشان می دهد. خطوط قرمز مربوط به مدهای لبه ای و خطوط آبی مربوط به مدهای حجمی می باشند [۳۱]. در این نمودار، چگالی حامل ها برای نوار سمت راست (خط های کامل) برابر  $n_s = 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  و چگالی حامل ها برای نوار سمت چپ (خط چین)  $n_s = 8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  می باشد. هر دو نوار دارای عرض  $w = 100 \mu\text{m}$  بوده و در معرض میدان مغناطیسی یکسان  $B_0 = 1 \text{ T}$  قرار گرفته اند. از نمودار شکل (۶-الف) دیده می شود که سرعت فاز مود  $R1^+$  نوار راست و مود  $L2^+$  نوار چپ، تطبیق دارد. لذا در انتشار پلاسماون در جهت  $+z$ ، مود  $R1^+$  در لبه چپ نوار راست و مود  $L2^+$  در لبه راست نوار چپ، وجود داشته و چنانچه دو نوار، بهم بسیار نزدیک باشند، بدلیل تطابق فازی، کوپل می شوند. در شکل (۷) ترکیب های مختلفی از مدهای لبه ای نشان داده شده است [۳۰]. برای انتشار مودی در جهت  $-z$ ، وضعیت متفاوت است. برای این حالت، مطابق شکل (۶) و (۷)، مدهای با تطابق فازی،  $R1^-$  و  $L2^-$  می باشند که با توجه به شکل (۷)، این دو مود در دو لبه متفاوت نوارها بوده و از هم دور می باشند و نمی توانند کوپل شوند. دو مود  $R2^-$  و  $L1^-$ ، در دو لبه کناری مجاور بوده ولی بدلیل عدم تطابق فازی، نمی توانند بهم کوپل شوند. لذا ساختار (۵) به صورت کوپلر ناهم پاسخ عمل می کند [۳۰].

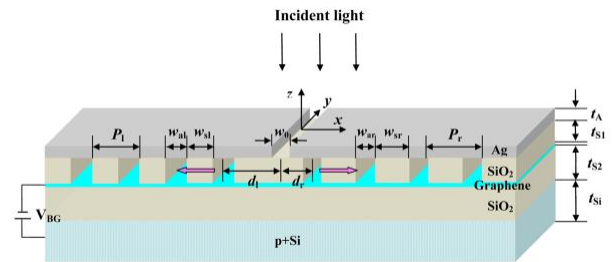


شکل ۶- (الف) قسمت حقیقی و (ب) منفی قسمت موهومی ثابت انتشار برای مدهای لبه ای (قرمز) و مدهای حجمی (آبی) مربوط به دو نوار گرافینی مجزا (هنوز کوپل نشده اند) [۳۰]

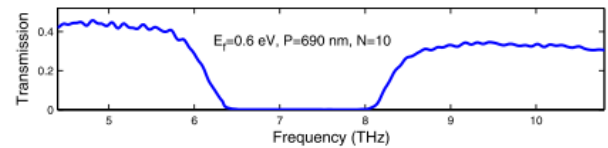


شکل ۷- دامنه میدان الکتریکی برای مدهای لبه ای نوار های گرافینی که در کنار هم قرار گرفته اند [۳۰]

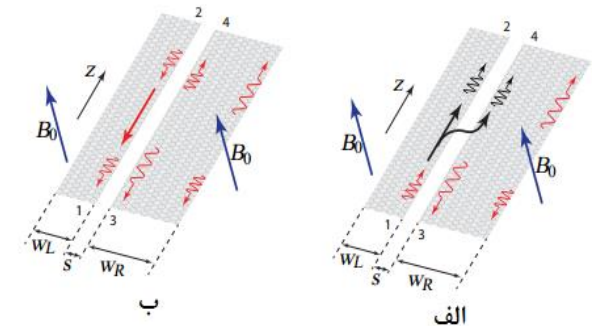
این کوپلر، ساختار گریتنینگ  $\text{SiO}_2$  برگ رفلکتور در بین دو لایه نقره و گرافن قرار گرفته و کوپلر توسط موج ورودی تحریک می شود. ساختار شبیه سازی شده و نمودار انتقال مود، بر حسب فرکانس برای حالتی که طول تناوب ها،  $P = 690 \text{ nm}$  و سطح فرمی گرافن،  $0.6$  الکترون ولت باشد، رسم می شود.



شکل ۳- موجبر جهتی که در آن، گریتنینگ  $\text{SiO}_2$  در بین دو لایه نقره و گرافن قرار گرفته و کوپلر توسط موج ورودی تحریک می شود [۲۹]



شکل ۴- نمودار انتقال بر حسب فرکانس برای موجبر جهتی ساختار [۲۹] (۳)

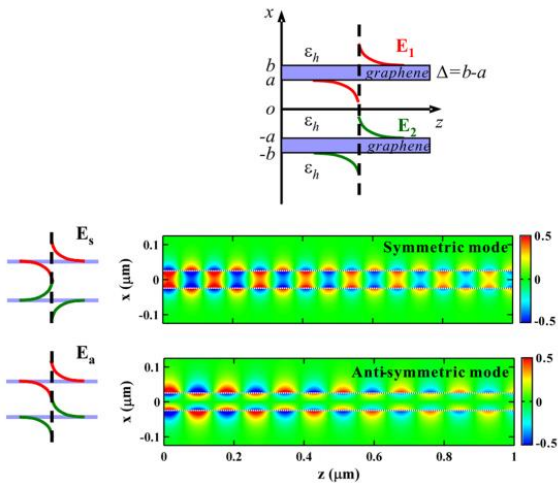


شکل ۵- کوپلر ناهم پاسخ گرافینی شامل دو موجبر پلاسماونیکی موازی که هر دو با میدان مغناطیسی عمود بر صفحه شان بایاس شده اند: (الف) تغذیه از پورت ۱ اعمال شود (ب) تغذیه از پورت ۳ اعمال شود [۳۰]

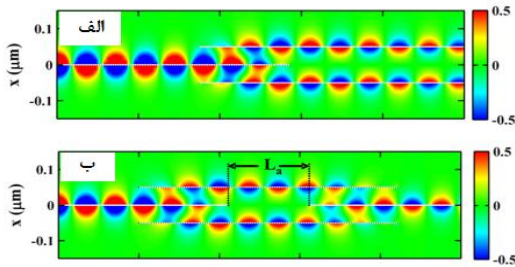
شکل (۵) کوپلر ناهم پاسخ<sup>۱</sup> گرافینی را نشان می دهد که در آن، دو موجبر پلاسماونیک موازی با ضخامت های  $W_L$  و  $W_R$  که هر دو با میدان مغناطیسی عمود بر صفحه شان بایاس شده اند. دو صفحه، با سطح شیمیایی متفاوت و نایکسان، دوپینگ شیمیایی شده اند [۳۰]. با تنظیم رسانایی گرافین، در حالت انتشار در جهت  $+z$  (شکل ۵-الف)، دو مود لبه ای در مجاورت هم (در لبه های داخلی دو صفحه)، خواص پاشندگی یکسانی داشته و میچینگ فاز رخ داده و به هم کوپل می شوند. این در حالی است در حالت انتشار در جهت  $-z$ ، مدهای مربوطه، نمودار پاشندگی نامتقارنی را داشته و کوپل نمی شوند [۳۱].

<sup>1</sup> Non-reciprocal Coupler

در شکل ۱۰، نمونه‌ی دیگری از کوپلر گرافنی چند لایه، مشابه شکل (۹) نشان داده شده است [۳۳]. در این کوپلر، مدهای TM متقارن و نامتقارن با استفاده از FDTD شبیه‌سازی شده و در شکل (۱۰) رسم شده‌اند. با استفاده از ایده طراحی کوپلر گرافنی چند لایه، می‌توان جدا کننده توان و نیز تداخل گر M-Z ساخت که در شکل (۱۱)، نمودار شدت میدان این ساختارها مشاهده می‌شود [۳۳].

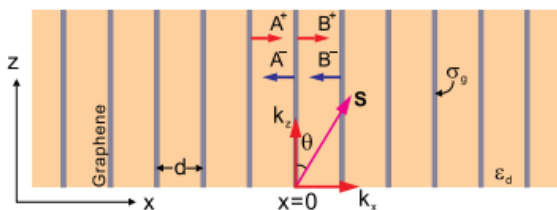


شکل ۱۰- کوپلر گرافنی چند لایه و مدهای TM متقارن و نامتقارن که با استفاده از روش عددی FDTD رسم شده‌اند [۳۳]

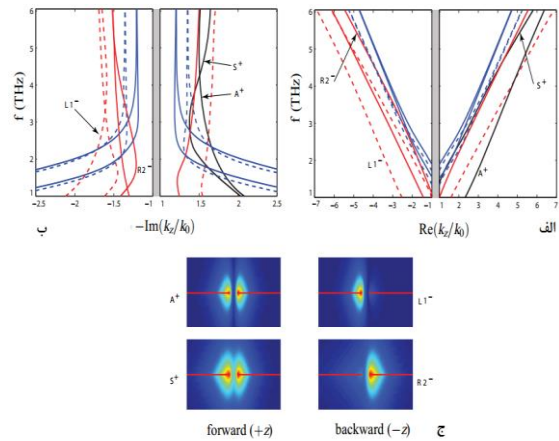


شکل ۱۱- نمودار شدت میدان (الف) جداکننده توان و (ب) تداخل گر M-Z [۳۳]

در مقالات [۳۴, ۳۵]، میزان تزویج مدهای پلاسمونی در آرایه‌ای از گرافن‌های تک لایه، بررسی می‌شود. در این مقالات، برای یک دوره تناوب، معادلات میدان برای مود TM نوشته شده و با اعمال شرایط مرزی، معادله پاشندگی برای ساختار بدست می‌آید که خواننده برای جزئیات بیشتر می‌تواند به این مقاله مراجعه نماید [۳۵].

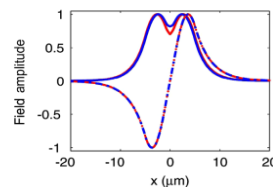
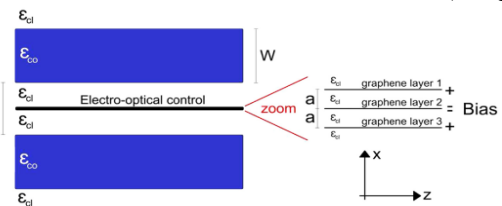


شکل ۱۲- آرایه‌ای از گرافن‌های تک لایه که به فاصله d از هم قرار می‌گیرند [۳۵]



شکل ۱۳- (الف) قسمت حقیقی و (ب) منفی قسمت موهومی ثابت انتشار برای مدهای لبه‌ای (قرمز) و مدهای حجمی (آبی) مربوط به کوپلر گرافینی (خط‌های سیاه). (ج) دامنه میدان الکتریکی در جهت انتشار  $+z$  و  $-z$  [۳۱, ۳۰]

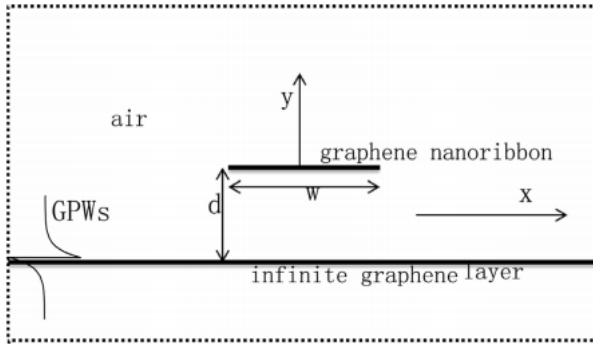
با شبیه‌سازی کوپلر در فرکانس ۶ تراهرتز و با این فرض که دو صفحه با فاصله  $s = 2 \mu\text{m}$  از هم قرار گرفته‌اند، نمودار پاشندگی به صورت شکل (۱۴) به دست می‌آید. توجه به این نکته ضروری است که در حالت انتشار در جهت  $+z$ ، مدهای  $R1^+$  و  $L2^+$  کوپل شده و در نتیجه، نمودار پاشندگی آن‌ها تغییر کرده (رنگ سیاه) و دو حالت متقارن و نامتقارن به خود می‌گیرند [۳۰]. در مقاله [۳۱] با استفاده از کوپلر ناهم پاسخ گرافنی مشابه مقاله [۳۰] به طراحی پروب پرداخته شده است که خواننده برای مطالعه دقیق‌تر می‌تواند به آن مراجعه کند. در مقالات [۳۲-۳۵] به کوپلرهای دی الکتریک<sup>۱</sup> گرافنی پرداخته شده است. در مقاله [۳۲]، که نمودار آن در شکل (۹) نشان داده شده است، یک کوپلر جهتی گرافنی چند لایه در طول موج ۱۰ میکرو متر طراحی شده است. در این کوپلر، بخش کنترلی الکترو-اپتیکی، در وسط ساختار قرار دارد که هدف آن تنظیم میزان تزویج بین موجبر هاست. با روش عددی المان محدود، ساختار به صورت عددی شبیه‌سازی شده و دامنه میدان رسم شده است [۳۲].



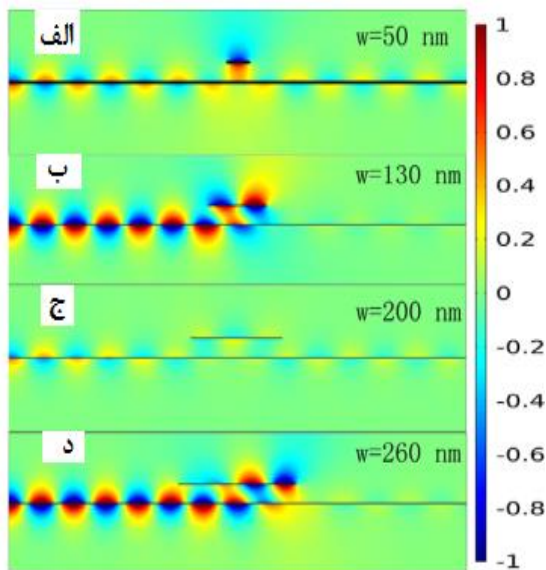
شکل ۹- کوپلر گرافنی چند لایه دی الکتریک در طول موج ۱۰ میکرو متری و رسم اندازه میدان الکتریکی و مغناطیسی با استفاده از شبیه سازی عددی FEM [۳۲]

<sup>1</sup> Dielectric Coupler

با فاصله افقی  $d$  از هم قرار گرفته و در هوا قرار دارند ارائه می شود. که خواننده برای مطالعه دقیق تر می تواند به این مقاله مراجعه نماید.



شکل ۱۵- کوپلر گرافنی متشکل از دو نانو نوار با عرض های  $w$  و بی نهایت با فاصله  $d$  [۳۷]

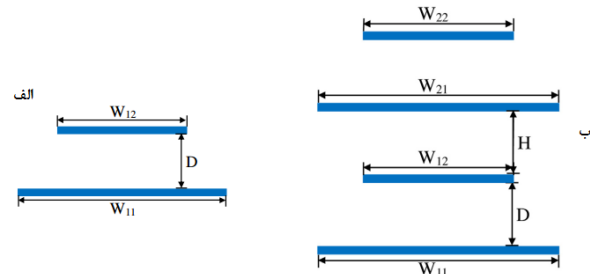


شکل ۱۶- میزان انتقال موج و تزویج آن به نانو نوار بالایی به ازای عرض های متفاوت نانو نوار بالایی [۳۷]

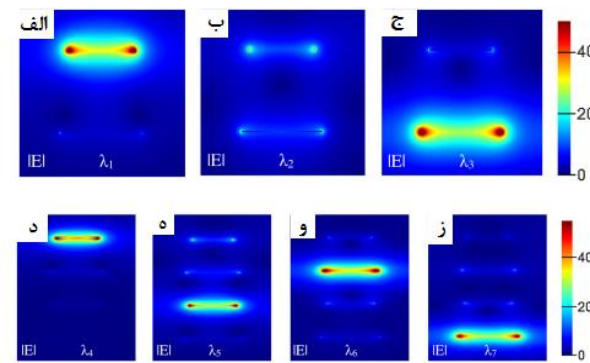
کوپلر ارائه شده در مقاله [۳۹] نمونه جدیدی از کوپلرهای گرافنی است که با روش FDTD به صورت عددی شبیه سازی شده اند. در این کوپلر، گرافن به صورت پیچ بر روی دی الکتریک با ضریب دی الکتریک  $2.33$  و ضخامت  $2$  میکرو قرار دارد که در زیر مشاهده می شود [۳۹]. این ساختار در فرکانس های  $1$  و  $1.5$  تراهرتز شبیه سازی شده و اندازه میدان مغناطیسی نرمالیزه  $H_z$  رسم شده است. همان طور که مشهود است در فرکانس  $1$  تراهرتز میزان تزویج به پورتهای  $2$  و  $3$  بیشتر از فرکانس  $1.5$  تراهرتز است [۳۹].

در مقاله [۴۰]، میزان تزویج بین دو سیم خودبایاس پوشیده شده از گرافن، بررسی می شود. در این مقاله هر یک از سیم ها دارای گرافن با بایاس مختلف می باشد که دارای اختلاف پتانسیل  $V_0$  هستند. شعاع سیم ها  $R$  بوده و به فاصله  $d$  از هم قرار دارند.

در مقالات [۳۶-۳۸]، کوپلرهای بر اساس نانو نوارهای گرافنی<sup>۱</sup>، طراحی و شبیه سازی شده اند. استفاده از ساختارهای متناوب نانو نوری گرافنی، برای ایجاد تزویج موثر بین نانو نوارها، ایده ای است که در مقاله [۳۶] مطرح شده و دو نوع سلول واحد این ساختارها، در زیر نشان داده شده است. لازم به ذکر است که کاربرد این ساختارها، در طراحی پنجره های شفاف می باشد. ساختارهای زیر شبیه سازی شده و نمودار اندازه میدان آنها، برای چند طول موج خاص در شکل (۱۴) رسم شده است [۳۶].



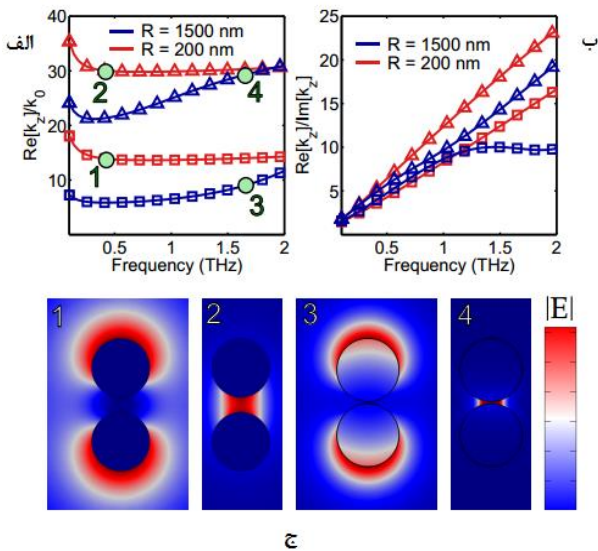
شکل ۱۳- (الف) سلول واحد کوپلر گرافنی متشکل از دو نانو نوار با عرض های متفاوت و فاصله  $D$  (ب) سلول واحد کوپلر گرافنی متشکل از  $2$  نانو نوار با عرضهای متفاوت [۳۶]



شکل ۱۴- نمودار اندازه میدان الکتریکی کل برای ساختارهای شکل (۱۳): (الف)، (ب) و (ج) اندازه میدان الکتریکی کل برای ساختار شکل (۱۳)-الف به ترتیب در طول موجهای  $6.3$ ،  $6.8$  و  $7.3$  میکرومتر، (د)، (ه)، (و) و (ز)- اندازه میدان الکتریکی کل برای ساختار شکل (۱۳)-ب به ترتیب در طول موج های  $5.8$ ،  $6.3$ ،  $6.8$  و  $7.3$  میکرومتر [۳۶]

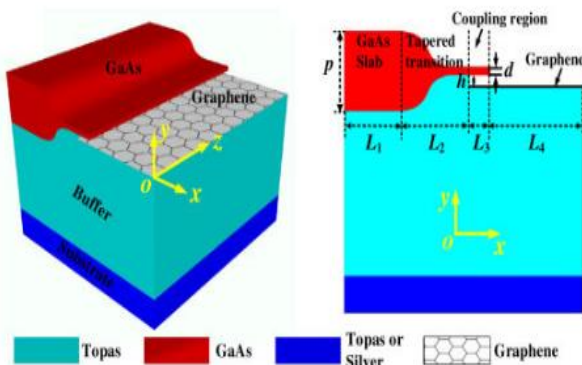
در مقاله [۳۷] کوپلر مشابه ساختار شکل (۱۳)-الف مطرح شده است اما تفاوت این ساختار با نمونه مشابه آن در ساختار شکل (۱۳)-الف این است که لایه گرافن پایینی، عرض محدود نداشته و عرض بی نهایت دارد. در شکل (۱۶) میزان انتقال موج و تزویج آن با نانو نوار گرافنی، نشان داده شده است که به ازای حالت های الف و ج که عرض نانو نوار بالایی،  $50$  و  $200$  نانو متر است، تزویج انجام شده و موج به انتهای ساختار منتقل می شود و این در حالی است که در حالت های ب و د، موج ایستا وجود داشته و انتقال صورت نمی گیرد [۳۷]. در مقاله [۳۸] ساختار مشابه دیگری برای کوپلرها توسط نانو نوارهای گرافنی ارائه می شود. در این ساختار، دو نانو نوار گرافنی به ترتیب با طول  $L$  و بی نهایت که

<sup>1</sup> Graphene Nanoribbons

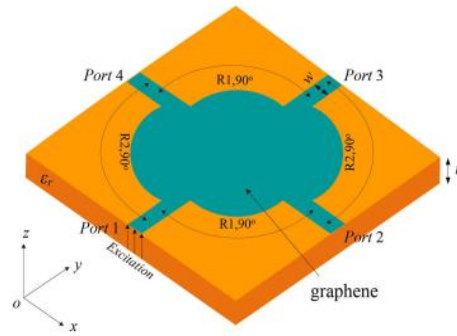


شکل ۲۱- (الف) نمودار پاشندگی، (ب) نمودار ضریب شایستگی و (ج) نمودار اندازه میدان برای حالت های ۱ تا ۴ شکل (الف) برای مودهای زوج (علامت مربع) و فرد (علامت مثلث) را به ازای شعاع های مختلف سیم ها [۴۰]

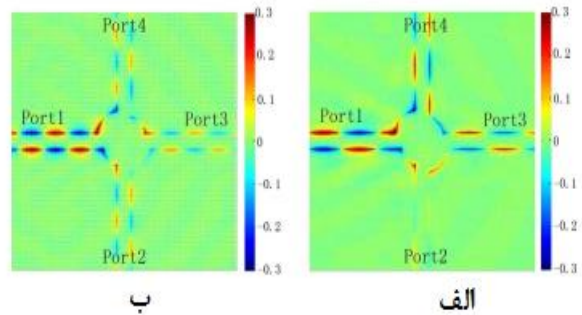
مقالات [۴۲-۴۳] دسته دیگری از کوپلرهای گرافنی هستند که در هیچ یک از دسته بندی های چهارگانه فوق، قرار نمی گیرند. در مقاله [۴۲]، که ساختار آن در شکل (۲۱) نشان داده شده، برای انتقال امواج پلاریتون سطحی از گالیم آرسناید به گرافن، از یک مخروط دوگانه سهموی، استفاده شده است. در این مقاله [۴۲]، رابطه پراکندگی، توزیع میدان، انتقال، و راندمان ساختار کوپلر به طور سیستماتیک تحلیل شده و ضریب انتقال موج از گالیم آرسناید به گرافن، در حدود ۰.۵ برای کوپلر گزارش گردیده است. مقاله [۴۳]، یک کوپلر شکاف برآمدگی<sup>۱</sup> مبتنی بر گرافن، را بررسی می کند (شکل ۲۲ را ببینید). کوپلرهای مبتنی بر موجبر شکاف برآمدگی، یکی از فناوری های جدید در زمینه کوپلرها می باشد که از مزایای آنها می توان به مسطح بودن، کم هزینه بودن ساخت و تلفات کمتر اشاره کرد.



شکل ۲۱- ساختار کوپلر گرافنی حاوی یک مخروط دوگانه سهموی از گالیم آرسناید برای انتقال امواج پلاسmoni به گرافن [۴۲]

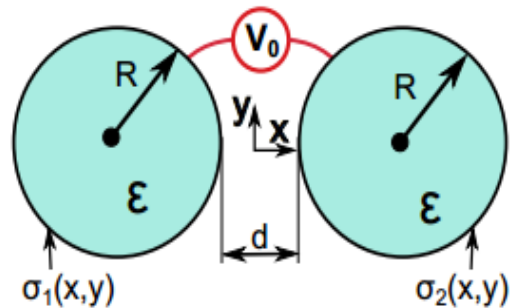


شکل ۱۸- کوپلر گرافنی که در آن، گرافن به صورت پیچ بر روی دی الکتریک با ضریب دی الکتریک ۲.۳۳ و ضخامت ۲ میکرو قرار دارد [۳۹]



شکل ۱۹- اندازه میدان مغناطیسی نرمالیزه  $H_z$  برای کوپلر شکل (۱۸) برای فرکانس های (الف) ۱ و (ب) ۱.۵ تراهرتز [۳۹]

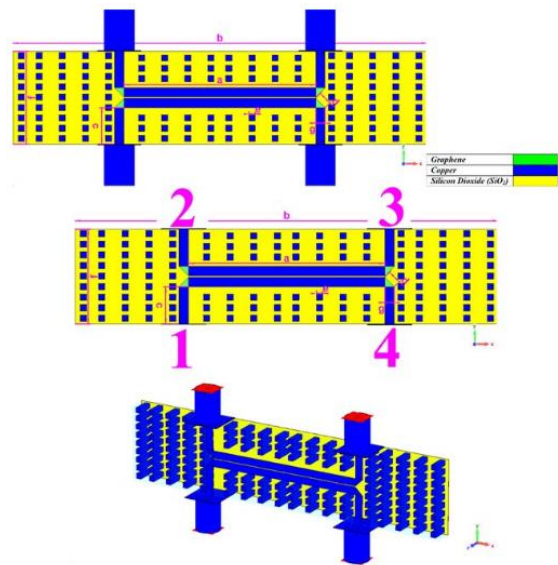
در شکل (۲۱)، نمودار پاشندگی، ضریب شایستگی و اندازه میدان الکتریکی تزویج شده بین دو سیم برای مودهای زوج (علامت مربع) و فرد (علامت مثلث) را به ازای شعاع های مختلف سیم ها رسم می شود [۴۰]. با مشاهده شکل دیده می شود که مود زوج، انرژی را در خارج دو سیم و مود فرد، انرژی را در بین دو سیم متمرکز می سازد [۴۰]. در مقاله [۴۱] نمونه ای از کوپلرهای گرافنی غیرخطی ارائه می شود که در آن، دو لایه گرافنی، با فاصله مشخص از هم قرار دارند که خواننده برای بررسی و مطالعه بیشتر می تواند به این مقاله مراجعه نماید.



شکل ۲۰- دو سیم خودبایاس پوشیده شده از گرافن با شعاع  $R$  که هر یک از سیم ها دارای گرافن با بایاس مختلف می باشند که دارای اختلاف پتانسیل  $V_0$  بوده و به فاصله  $d$  از هم قرار دارند [۴۰]

<sup>۱</sup> Ridge gap

- Structures Containing Magnetically Biased Graphene Sheets," *Plasmonics*, vol. 15, pp. 1183-1198, 2020.
- [6] M. B. Heydari, "Analytical Study of TE-Polarized SPPs in Nonlinear Multi-Layer Graphene-Based Structures," *Plasmonics*, vol. 16, pp. 2327-2334, 2021.
- [7] H. Shinohara and A. Tiwari, *Graphene: An Introduction to the Fundamentals and Industrial Applications*: John Wiley & Sons, 2015.
- [8] J. R. Wallbank, *Electronic properties of graphene heterostructures with hexagonal crystals*: Springer, 2014.
- [9] A. C. Neto, F. Guinea, N. M. Peres, K. S. Novoselov, and A. K. Geim, "The electronic properties of graphene," *Reviews of modern physics*, vol. 81, p. 109, 2009.
- [10] M. Sepioni, "Magnetic properties of graphene," 2013.
- [11] M. B. Heydari and M. H. Vadjed Samiei, "New analytical investigation of anisotropic graphene nano-waveguides with bi-gyrotropic cover and substrate backed by a PEMC layer," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 52, p. 108, 2020.
- [12] M. B. Heydari and M. H. V. Samiei, "A Novel Analytical Study of Anisotropic Multi-Layer Elliptical Structures Containing Graphene Layers," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 56, pp. 1-10, 2020.
- [13] M. B. Heydari and M. H. Vadjed Samiei, "Three-port terahertz circulator with multi-layer triangular graphene-based post," *Optik*, vol. 231, p. 166457, 2021.
- [14] Q. Bao and K. P. Loh, "Graphene photonics, plasmonics, and broadband optoelectronic devices," *ACS nano*, vol. 6, pp. 3677-3694, 2012.
- [15] F. H. Koppens, D. E. Chang, and F. J. García de Abajo, "Graphene plasmonics: a platform for strong light-matter interactions," *Nano letters*, vol. 11, pp. 3370-3377, 2011.
- [16] E. L. Wolf, *Applications of graphene: an overview*: Springer Science & Business Media, 2014.
- [17] E. Towe, T. Palacios, and M. Suemitsu, "Emerging graphene-based electronic & photonic devices, circuits, and systems [Scanning the Issue]," *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, pp. 1518-1521, 2013.
- [18] A. K. Geim, "Graphene: status and prospects," *science*, vol. 324, pp. 1530-1534, 2009.
- [19] H. Raza, *Graphene nanoelectronics: metrology, synthesis, properties and applications*: Springer Science & Business Media, 2012.
- [20] B. Sensale-Rodriguez, "Graphene-based optoelectronics," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, pp. 1100-1108, 2015.
- [21] W. Cao, J. Kang, W. Liu, Y. Khatami, D. Sarkar, and K. Banerjee, "2D electronics: Graphene and beyond," in *Solid-State Device Research Conference (ESSDERC), 2013 Proceedings of the European*, 2013, pp. 37-44.
- [22] J. Moon, M. Antcliffe, H. Seo, S. Lin, A. Schmitz, I. Milosavljevic, et al., "Graphene review: An emerging RF technology," in *Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems (SiRF), 2012 IEEE 12th Topical Meeting on*, 2012, pp. 199-202.
- [23] D. Y. Jung, S. Y. Yang, H. Park, W. C. Shin, J. G. Oh, B. J. Cho, et al., "Interface engineering for high performance graphene electronic devices," *Nano Convergence*, vol. 2, pp. 1-17, 2015.
- [24] Y. Wu, D. B. Farmer, F. Xia, and P. Avouris, "Graphene electronics: Materials, devices, and circuits," *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, pp. 1620-1637, 2013.
- [25] G. Xu, Y. Zhang, X. Duan, A. A. Balandin, and K. L. Wang, "Variability effects in graphene: Challenges and



شکل ۲۲- یک کوپلر گرافنی حاوی شکاف برآمدگی [۴۲]

### ۳- نتیجه گیری و بحث

در این مقاله، انواع کوپلرهای گرافنی مطالعه و بررسی شد. به طور کلی، کوپلرهای گرافنی پلاسمونی در ۴ دسته بندی، قرار گرفتند: کوپلرهای جهتی، کوپلرهای ناهم پاسخ، کوپلرهای صفحه ای دی الکتریک و کوپلرهای مبتنی بر نانو نوار. کوپلرهای جهتی، کوپلرهایی بودند که در آنها، دو موجبر پلاسمونیک گرافنی، با فاصله ای مشخص از هم جدا شده و ناحیه تزویج توسط دو خم موجبری، به موجبر اولیه متصل می شوند. استفاده از کوپلرهای جهتی به عنوان جدا کننده توان، در این مقاله، به طور مفصل بحث شد. استفاده از میدان بایاس مغناطیسی علاوه بر بایاس الکتریکی بر روی گرافن، باعث ایجاد پلاسمون های ناهم پاسخ می شود؛ ایده ای که برای طراحی کوپلرهای ناهم پاسخ گرافنی، به کار رفته است. در کوپلرهای مبتنی بر نانو نوار های گرافنی، چند نانو نوار به فاصله ای مشخص از هم قرار دارند که با تحریک از یک سمت، توان به نانو نوار بعدی، تزویج می شود. نحوه تحریک هریک از کوپلرهای آمده در ۴ دسته بندی فوق، به طور کامل بحث شد و کاربردهای آنها شرح داده شد.

### ۴- مراجع

- [1] H.-S. P. Wong and D. Akinwande, *Carbon nanotube and graphene device physics*: Cambridge University Press, 2011.
- [2] N. O. Weiss, H. Zhou, L. Liao, Y. Liu, S. Jiang, Y. Huang, et al., "Graphene: an emerging electronic material," *Advanced Materials*, vol. 24, pp. 5782-5825, 2012.
- [3] M. J. Allen, V. C. Tung, and R. B. Kaner, "Honeycomb carbon: a review of graphene," *Chemical reviews*, vol. 110, pp. 132-145, 2009.
- [4] P. Avouris, Z. Chen, and V. Perebeinos, "Carbon-based electronics," *Nature nanotechnology*, vol. 2, pp. 605-615, 2007.
- [5] M. B. Heydari and M. H. Vadjed Samiei, "An Analytical Study of Magneto-Plasmons in Anisotropic Multi-layer

- [35] B. Wang, X. Zhang, F. J. García-Vidal, X. Yuan, and J. Teng, "Strong coupling of surface plasmon polaritons in monolayer graphene sheet arrays," *Physical review letters*, vol. 109, p. 073901, 2012.
- [36] J. Chen, S. Xie, L. Wu, R. Zhou, Q. Liu, D. Liu, *et al.*, "Tunable paired nanoribbons with graphene for single and multiple transparency windows," *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 127, pp. 9683-9690, 2016.
- [37] B. Sun, L.-L. Wang, X. Zhai, X.-F. Li, J.-Q. Liu, Z.-R. Huang, *et al.*, "Manipulating plasmonic waves transporting on graphene with graphene nanoribbon," *Optics & Laser Technology*, vol. 64, pp. 101-105, 2014.
- [38] G. Rosolen and B. Maes, "Graphene ribbons for tunable coupling with plasmonic subwavelength cavities," *JOSA B*, vol. 31, pp. 1096-1102, 2014.
- [39] M.-L. Zhai, H.-L. Peng, X.-H. Wang, X. Wang, Z. Chen, and W.-Y. Yin, "The conformal HIE-FDTD method for simulating tunable graphene-based couplers for THz applications," *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 5, pp. 368-376, 2015.
- [40] D. Correas-Serrano, A. Alvarez-Melcon, J. Gomez-Diaz, and A. Alu, "Surface plasmon modes in self-biased coupled graphene-coated wires," in *Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 2015 IEEE International Symposium on*, 2015, pp. 1638-1639.
- [41] I. Iorsh, P. Belov, D. Smirnova, I. Shadrivov, and Y. Kivshar, "Terahertz hyperbolic metamaterials and nonlinear couplers in graphene.", *SPIE*, 2014.
- [42] L. Ye, K. Sui, and H. Feng, "High-efficiency couplers for graphene surface plasmon polaritons in the mid-infrared region," *Optics Letters*, vol. 45, pp. 264-267, 2020.
- [43] N. Kiani, F. Tavakkol Hamedani, and P. Rezaei, "Design of a graphene-based ridge gap waveguide coupler for THz applications," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 56, p. 423, 2024.
- opportunities for device engineering and applications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, pp. 1670-1688, 2013.
- [26] M. M. Deshmukh and V. Singh, "Graphene—An exciting two-dimensional material for science and technology," *Resonance-Heidelberg*, vol. 16, p. 238, 2011.
- [27] W. Xu, Z. Zhu, K. Liu, J. Zhang, X. Yuan, Q. Lu, *et al.*, "Toward integrated electrically controllable directional coupling based on dielectric loaded graphene plasmonic waveguide," *Optics letters*, vol. 40, pp. 1603-1606, 2015.
- [28] T. Zhang, X. Yin, L. Chen, and X. Li, "Ultra-compact polarization beam splitter utilizing a graphene-based asymmetrical directional coupler," *Optics letters*, vol. 41, pp. 356-359, 2016.
- [29] M.-D. He, K.-J. Wang, L. Wang, J.-B. Li, J.-Q. Liu, Z.-R. Huang, *et al.*, "Graphene-based terahertz tunable plasmonic directional coupler," *Applied Physics Letters*, vol. 105, p. 081903, 2014.
- [30] N. Chamanara, D. Sounas, and C. Caloz, "Non-reciprocal magnetoplasmon graphene coupler," *Optics express*, vol. 21, pp. 11248-11256, 2013.
- [31] N. Chamanara and C. Caloz, "Magnetically switchable graphene coupler and application to a magnetic probe," in *Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP), 2015 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on*, 2015, pp. 1-3.
- [32] A. Locatelli, A.-D. Capobianco, G. Nalesso, S. Boscolo, M. Midrio, and C. De Angelis, "Graphene-based electro-optical control of the beat length of dielectric couplers," *Optics Communications*, vol. 318, pp. 175-179, 2014.
- [33] B. Wang, X. Zhang, X. Yuan, and J. Teng, "Optical coupling of surface plasmons between graphene sheets," *Applied Physics Letters*, vol. 100, p. 131111, 2012.
- [34] B. Wang and J. Teng, "Optical Coupling in Layered Graphene Sheets," in *Information Optoelectronics, Nanofabrication and Testing*, 2012, p. IF1A. 4.