

اللهم اغفر للمسلمين  
والمسلمات وجميع المسلمين  
الذين ماتوا في  
الجزيرة العربية  
والمسلمين وجميع المسلمين  
الذين ماتوا في  
الجزيرة العربية



دانشگاه تربیت مدرس  
دانشکده فنی و مهندسی

**پایان نامه دوره‌ی کارشناسی ارشد مهندسی برق-الکترونیک**

**شبیه سازی موجبر پلاسمونی مبتنی بر ساختار گرافن-فلز**

**مرتضی یاراحمدی**

استاد راهنما:

**پروفسور محمد کاظم مروج فرشی**

استاد مشاور:

**دکتر لیلا یوسفی**

پائیز ۱۳۹۳

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

آقای مرتضی یاراحمدی پایان نامه ۶ واحدی خود را با عنوان شبیه سازی موجبر پلاسمونی بر پایه ی ساختار گرافن - فلز در تاریخ ۱۳۹۳/۹/۲۶ ارائه کردند. اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده، پذیرش آنرا برای اخذ درجه کارشناسی ارشد الکترونیک پیشنهاد می کنند.

| عضو هیات داوران                      | نام و نام خانوادگی      | رتبه علمی | امضا |
|--------------------------------------|-------------------------|-----------|------|
| استاد راهنما                         | دکتر محمدکاظم مروج قرشی | استاد     |      |
| استاد مشاور                          | دکتر لیلا یوسفی         | استادیار  |      |
| استاد ناظر                           | دکتر سارا درباری        | استادیار  |      |
| استاد ناظر                           | دکتر رحیم فائز          | استاد     |      |
| مدیر گروه<br>(با نماینده گروه تخصصی) | دکتر سارا درباری        | استادیار  |      |



## آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش‌های علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهش‌های علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرح‌های تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان‌نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان‌نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین‌نامه های مصوب انجام شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این آیین‌نامه در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۸۷/۴/۱۶ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/۴/۲۲ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

«اینجانب ..... دانشجوی رشته ..... ورودی سال تحصیلی ..... مقطع ..... دانشکده ..... متعهد می شوم کلیه نکات مندرج در آئین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش‌های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته های علمی مستخرج از پایان‌نامه / رساله تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین‌نامه فوق‌الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می‌دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هر گونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله بر اساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هر گونه اعتراض را از خود سلب نمودم»

امضا: .....  
تاریخ: ۱۳۸۷/۱۰/۱۴

آیین نامه چاپ پایان نامه (رساله) های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله) های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله) ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته  
سال در دانشکده دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی

سرکار خانم/جناب آقای دکتر ، مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر

و مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر از آن دفاع شده است»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کنند. دانشگاه می تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأديه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب *زهرا بیارجمند* دانشجوی رشته *انرژی* مقطع *کارشناسی ارشد* تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: *زهرا بیارجمند*  
تاریخ و امضا: *۹۴/۱۰/۱۴*

تقدیم

:

پدر و مادر عزیزم

که وجود آنها جایی برای آرزوی دیگری نگذاشته

دالگه دا نازارم افرشته آسمونی  
گوته که زیر پاته او بهشته جاودونی  
نمی ام و دار دنیا یه تاری د گیس اسبیت  
آر د مه تو جوو بحایی جون شیرینم مییم سیت  
چنی شویا که نوحووفتی نشسی و پا گووارم  
دالکم چشیات هم آسمونو هم آسارم  
آر که سوزم و آر که گرمی گرمی دسه تو دارم  
آر که سوزم و بهارم هر چه دارم د تو دارم

به نام آنکه جان را فکرت آموخت چراغ دل به نور جان برافروخت  
ز فضلش هر دو عالم گشت روشن ز فیضش خاک آدم گشت گلشن

نخست خداوند را شاکرم که توفیق کسب علم در محضر اساتید کرامتقدر را نصیبم فرمود. سپس بابرکت گرفتن از دود و صلوات بر محمد (ص) و ائمه معصوم (ع)، بهترین سپاس ها را تقدیم استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر مروج فرشی می کنم که در این مدت درس علم و اخلاق و زندگی از ایشان آموختم. برای ایشان آرزوی سلامتی و طول عمر دارم. از زحمات و راهنمایی های بی دریغ سرکار خانم دکتر یوسفی که همواره راهنما بود، نهایت سپاس را دارم. از استاد ارجمند جناب آقای دکتر احمدی که نکته های علمی و اخلاقی زیادی از ایشان آموختم، تشکر فراوان دارم. کمال تشکر دارم از استاد فرهیخته جناب آقای دکتر کبیر که صفا و صمیمیت ایشان نقطه های شیرینی در دوران تحصیل را رقم زد. از سرکار خانم دکتر دباری بخاطر کلاس های درسی پر بارشان نهایت سپاس را دارم. از دوستان بزرگوارم در آزمایشگاه های گروه الکترونیک نوری بخصوص آقای شعاعی بخاطر کمک ها و راهنمایی هایشان صمیمانه تشکر می کنم. در آخر بوسه بردست پدر و مادر عزیزم می زنم و از خانواده مهربانم که همواره نور امید و دلگرمی ام بوده اند، پاسنگزاری می کنم.

## چکیده

در ابتدا مروری گذرا بر کارهای انجام شده در زمینه تولید امواج پلاسمونی سطحی با گرافن و همچنین مدولاتورهای تراهرتز ارائه و شرایط لازم برای ایجاد امواج پلاسمونی در سطح فلز بررسی می شود. سپس، با بهره گیری از رابطه پاشندگی گرافن و رابطه کوبو، خواص پلاسمونی گرافن مرور خواهد شد. آنگاه، پس از توضیح درباره روش مدل کردن مواد مورد استفاده، برای درستی آزمایشی نتایج شبیه سازی، دو مقاله تازه منتشر شده در حوزه پلاسمونی بازتولید می شود. پس از اطمینان یافتن از درستی روش محاسبه، به کمک ویژگی کوک پذیری گرافن و شرایط بهینه برای طول انتشار امواج پلاسمون سطحی در فرکانس کاری ۶ تراهرتز، با روش عناصر متناهی در سه بعد شبیه سازی و تحلیل افزاره ها انجام خواهد شد.

نخستین افزاره طراحی شده، یک سویچ پلاسمونی برپایه گرافن با طول ۵ مرتبه کوتاه تر از طول موج ورودی است. ضریب عبور توان این سویچ در شرایط بهینه برای حالت روشن و نسبت آن به ضریب حالت خاموش، به ترتیب برابر با  $94/26\%$  و  $61 = ON/OFF$  است. در همین شرایط عمق مدولاسیون این افزاره برابر  $98/37\%$ ، که نسبت به بزرگ ترین عمق مدولاسیون گزارش شده  $23\%$  عمیق تر است.

بر اساس ابعاد و شرایط بهینه به دست آمده برای یک موجبر پلاسمونی مستقیم، یک سوئیچ پلاسمونی Y شکل (دو شاخه) با طول کوتاه تر از  $50\%$  طول موج ورودی طراحی خواهد شد. نتایج حاصل از شبیه سازی سه بعدی نشان می دهد. ضریب عبور توان هنگامی که هردو بازو به طور همزمان روشن و نسبت آن به حالتی که هردو خاموش اند، به ترتیب برابر  $87/2\%$  و  $8720 = ON/OFF$  است. در ضمن عمق مدولاسیون این سویچ برابر  $99/98\%$  است.

نهایتاً یک گیت منطقی AND با ساختاری مشابه ساختار اولین سویچ، و یک گیت منطقی OR متشکل از دو ساختار Y شکل رو در رو، طراحی خواهد شد. این افزاره ها در مدارهای نوری دیجیتال کاربرد فراوانی دارند. ضریب عبور توان برای حالت منطقی "۱ ۱" و نسبت آن به حالت "۰ ۰" برای گیت AND، به ترتیب، برابر با  $92/44\%$  و  $20095 \approx ON/OFF$  و برای گیت OR برابر با  $73/03\%$  با نسبت  $16983 \approx ON/OFF$  است.

**کلید واژه:** پلاسمون های سطحی، گرافن، سویچ، مدولاتور، گیت منطقی



## فهرست مطالب

| صفحه     | عنوان  |
|----------|--|
| ج        | فهرست علایم و نشانه‌ها   |
| د        | فهرست جدول‌ها  |
| ه        | فهرست شکل‌ها   |
| ۱        | <b>فصل ۱- مقدمه</b>  |
| ۱-۱      | ۱-۱-۱ پیشگفتار   |
| ۱-۲      | ۱-۲-۱ مروری بر کارهای انجام شده در زمینه گرافن پلاسمونیک                 |
| ۱-۳      | ۱-۳-۱ مروری بر مدولاتورهای تراهرتز                                       |
| ۱-۳-۱    | ۱-۳-۱-۱ مدولاسیون تمام نوری در نیمه هادی‌ها و ساختارهای فرامواد          |
| ۱-۳-۱    | ۱-۳-۱-۲ مدولاسیون الکترونیکی در نیمه هادی‌ها و فرامواد                   |
| ۱-۳-۱    | ۱-۳-۱-۳ مدولاسیون الکتریکی در گرافن                                      |
| ۱-۳-۱    | ۱-۳-۱-۴ مدولاتورهای حرارتی   |
| ۱-۳-۱    | ۱-۳-۱-۵ مدولاتورهای مبتنی بر فوتونیک کریستال                             |
| ۱۳       | <b>فصل ۲- تئوری و فیزیک حاکم</b>   |
| ۱۳-۱     | ۲-۱-۱ پیشگفتار   |
| ۱۳-۲     | ۲-۱-۲ پلاسمونیک  |
| ۱۳-۲-۱   | ۲-۱-۲-۱ مدل درود   |
| ۱۳-۲-۲   | ۲-۱-۲-۲ امواج پلاسمون پلاریتون‌های سطحی در فصل مشترک عایق و فلز          |
| ۱۳-۲-۲   | ۲-۱-۲-۳ برانگیزش پلاسمون‌های سطحی  |
| ۱۳-۲-۳   | ۲-۱-۲-۳ گرافن  |
| ۱۳-۲-۳-۱ | ۲-۱-۲-۳-۱ ویژگی‌های گرافن  |
| ۱۳-۲-۳-۲ | ۲-۱-۲-۳-۲ قابلیت کوک‌پذیری خواص نوری گرافن                               |
| ۱۳-۲-۳-۲ | ۲-۱-۲-۳-۲ قابلیت مجتمع‌سازی  |
| ۱۳-۲-۳-۲ | ۲-۱-۲-۳-۲ انتشار کم‌تلف موج پلاسمونی                                     |
| ۱۳-۲-۳-۲ | ۲-۱-۲-۳-۲ محاسبه هدایت نوری گرافن  |
| ۱۳-۲-۳-۲ | ۲-۱-۲-۳-۲ بررسی نحوه انتشار پلاسمون-پلاریتون‌های سطحی در گرافن           |
| ۱۳-۲-۳-۲ | ۲-۱-۲-۳-۲ روش محاسبه رابطه پاشندگی مد پلاسمونی گرافن به کمک شرایط مرزی   |
| ۱۳-۲-۳-۲ | ۲-۱-۲-۳-۲ محاسبه مد پلاسمونی گرافن با در نظر گرفتن هدایت حجمی $\sigma_v$ |
| ۱۳-۲-۳-۲ | ۲-۱-۲-۳-۲ رسانایی گرافن در گستره فرکانسی تراهرتز                         |
| ۲۹       | <b>فصل ۳- نحوه مدل‌سازی مواد مورد استفاده در طراحی‌ها</b>                |
| ۲۹-۱     | ۳-۱-۱ پیشگفتار   |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| ۲۹        | مدل سازی اکسید سیلیکون  | ۲-۳        |
| ۳۰        | مدل سازی طلا  | ۳-۳        |
| ۳۰        | مدل سازی گرافن  | ۴-۳        |
| ۳۰        | بایاس دهی گرافن   | ۵-۳        |
| ۳۱        | مش بندی   | ۶-۳        |
| <b>۳۳</b> | <b>افزاره های پیشنهادی و نتایج شبیه سازی آنها</b>                 | <b>۴-۴</b> |
| ۳۳        | پیشگفتار  | ۱-۴        |
| ۳۳        | باز آفرینی مقاله موجبر پلاسمونی مبتنی بر ساختار گرافن- فلز        | ۲-۴        |
| ۴۱        | بازتولید مقاله موجبر پلاسمونی هیبریدی                             | ۳-۴        |
| ۴۹        | شبیه سازی سه بعدی ساختار توری                                     | ۴-۴        |
| ۵۱        | سوییچ پلاسمونی مبتنی بر گرافن                                     | ۵-۴        |
| ۵۶        | بهبود سازی افزاره   | ۱-۵-۴      |
| ۵۶        | گام نخست (تشخیص پارامترهای تأثیرگذار)                             | ۱-۱-۵-۴    |
| ۵۷        | گام دوم (حدس اولیه پارامترها)                                     | ۲-۱-۵-۴    |
| ۵۷        | گام سوم (بهبود سازی عرض ساختار)                                   | ۳-۱-۵-۴    |
| ۵۹        | گام چهارم (بهبود سازی ضخامت لایه سیلیکا جداکننده گرافن و طلا)     | ۴-۱-۵-۴    |
| ۵۹        | گام پنجم (بهبود سازی طول سوئیچ)                                   | ۵-۱-۵-۴    |
| ۶۲        | گام ششم (تکرار روند بهبود سازی با پارامترهای ذکر شده در جدول ۴-۶) | ۶-۱-۵-۴    |
| ۶۲        | بهبود سازی عرض ساختار   | •          |
| ۶۳        | بهبود سازی ضخامت لایه سیلیکا جداکننده گرافن و طلا                 | •          |
| ۶۴        | بهبود سازی طول ساختار   | •          |
| ۶۶        | جمع بندی و مقایسه   | ۲-۵-۴      |
| ۶۷        | مدولاتور پلاسمونی مبتنی بر گرافن:                                 | ۶-۴        |
| ۶۹        | سوییچ پلاسمونی Y شکل  | ۷-۴        |
| ۷۲        | گیت منطقی AND   | ۸-۴        |
| ۷۴        | گیت منطقی OR  | ۹-۴        |
| <b>۷۷</b> | <b>نتیجه گیری و پیشنهادها</b>                                     | <b>۵-۵</b> |
| ۷۷        | جمع بندی و نتیجه گیری   | ۱-۵        |
| ۷۸        | پیشنهادها برای کارهای آینده                                       | ۲-۵        |
| ۷۹        | فهرست مراجع   |            |
| ۸۲        | واژه نامه انگلیسی به فارسی  |            |
| ۸۵        | واژه نامه فارسی به انگلیسی  |            |

## فهرست علائم و نشانه‌ها

| علائم اختصاری   | عنوان                |
|-----------------|----------------------|
| $\xi$           | ضریب وظیفه           |
| $\omega$        | فرکانس زاویه ای      |
| $\mu_c$         | پتانسیل شیمیایی      |
| $v_F$           | سرعت فرمی            |
| $T$             | دما                  |
| $\Gamma$        | نرخ پراکندگی         |
| $\sigma$        | هدایت نوری           |
| $\Delta$        | ضخامت گرافن          |
| $\beta$         | ثابت انتشار          |
| $k_0$           | عدد موج              |
| $\varepsilon$   | گذردهی الکتریکی      |
| $\varepsilon_0$ | گذردهی خلأ           |
| $\lambda_{SP}$  | طول موج پلاسمون سطحی |
| $FOM$           | ضریب شایستگی         |
| $\lambda_0$     | طول موج در فضای آزاد |
| $E$             | میدان الکتریکی       |
| $B$             | میدان مغناطیسی       |
| $\gamma$        | ثابت تضعیف           |

## فهرست جدول‌ها

| عنوان   | صفحه |
|---|------|
| جدول ۱-۱: مقایسه انواع مدولاتورهای تراهرتز                              | ۱۲   |
| جدول ۱-۴: پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی موجبر پلاسمونی مرجع [۴۱] | ۳۴   |
| جدول ۲-۴: پارامترهای شبیه‌سازی موجبر هیبرید پلاسمونی [۴۶]               | ۴۱   |
| جدول ۳-۴: پارامترهای شبیه‌سازی ساختار توری در حالت سه‌بعدی              | ۵۱   |
| جدول ۴-۴: مقادیر پارامترهای سوئیچ پلاسمونی طراحی شده                    | ۵۲   |
| جدول ۵-۴: حدس اولیه پارامترها در اولین بهینه‌سازی ساختار                | ۵۷   |
| جدول ۶-۴: مقادیر پیشنهادی برای افزاره پس از اولین بهینه‌سازی            | ۶۲   |
| جدول ۷-۴: مناسب‌ترین پارامترهای سوئیچ پلاسمونی طراحی شده                | ۶۵   |
| جدول ۸-۴: مقدار عبور در چهار حالت مختلف سوئیچ دو شاخه Y شکل             | ۷۱   |
| جدول ۹-۴: گزارش نهایی مشخصات سوئیچ دو شاخه Y شکل                        | ۷۲   |
| جدول ۱۰-۴: میزان عبور پلاسمون‌های سطحی در چهار حالت منطقی گیت AND       | ۷۴   |
| جدول ۱۱-۴: میزان عبور پلاسمون‌های سطحی در چهار حالت منطقی گیت OR        | ۷۶   |

## فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

- شکل ۱-۱: ساختار مدولاتور فرکانسی با ساختار هیبرید فرامواد/ نیمه هادی [۲۰]. ..... ۵
- شکل ۲-۱: ساختار مدولاتور الکترونیکی پیشنهادی مرجع [۲۱]. ..... ۵
- شکل ۳-۱: شمای ساختار مدولاتور Meta/ nGaAs [۲۲]. ..... ۶
- شکل ۴-۱: ساختار مدولاتور Meta/ nGaAs [۲۳]. ..... ۶
- شکل ۵-۱: شمای مدولاتور تراهرتز با ساختار شاتکی فراماده/ گالیم آرسناید [۲۴]. ..... ۷
- شکل ۶-۱: مدولاتور تراهرتز با ساختار شاتکی [۲۶]. ..... ۷
- شکل ۷-۱: شمای ساختار مدولاتور گرافنی با کنترل الکتریکی [۷]. ..... ۸
- شکل ۸-۱: شمای مدولاتور مبتنی بر ساختار Meta/ Graphene [۲۷]. ..... ۸
- شکل ۹-۱: مدولاتور حرارتی با استفاده از حلقه های تشدیدگر شکاف دار طلا بر بستر اکسید وانادیوم [۲۸]. ..... ۹
- شکل ۱۰-۱: مدولاتور حرارتی با استفاده از حلقه های تشدیدگر از جنس ابر رسانای حرارتی (YBCO) [۲۹]. ..... ۹
- شکل ۱۱-۱: مدولاتور مبتنی بر PC یک بعدی با نقص GaAs [۳۰]. ..... ۱۰
- شکل ۱۲-۱: مدولاتور تراهرتز مبتنی بر فوتونیک کریستال غیرخطی با کنترل نوری [۳۱]. ..... ۱۱
- شکل ۱-۲: الف) نحوه انتشار پلاسمون های سطحی ب) نمایش کاهش دامنه میدان الکتریکی با فاصله گرفتن از فصل مشترک [۳۸]. ..... ۱۴
- شکل ۲-۲: الف) نمودار پاشندگی SPPs در فصل مشترک عایق و فلز ب) پروفایل میدان مغناطیسی پلاسمون های سطحی برای دو حالت  $\omega = 0.5\omega_{SP}$  (خط قرمز توپر) و  $\omega = 0.8\omega_{SP}$  (خط چین آبی رنگ) [۳۷]. ..... ۱۶
- شکل ۳-۲: روش های مختلف تهییج پلاسمون های سطحی. الف) استفاده از منشور ب) ساختار توری د) برانگیزش با استفاده از میدان های نزدیک [۳۸]. ..... ۱۷
- شکل ۴-۲: منحنی های پاشندگی به ترتیب، نور در محیط آزاد، نور خروجی از منشور، پلاسمون های سطحی مرز منشور/ فلز و پلاسمون های سطحی مرز هوا/ فلز [۳۸]. ..... ۱۷
- شکل ۵-۲: شمای لایه گرافن و پیوندهای  $\sigma$  و  $\pi$  [۳۷]. ..... ۱۸
- شکل ۶-۲: محاسبه نوار انرژی گرافن از دو روش الف) تنگ بست و ب) DFT [۳۷]. ..... ۲۰
- شکل ۷-۲: الف) قسمت حقیقی و ب) قسمت موهومی رسانایی در دمای  $T = 300K$ . ..... ۲۸
- شکل ۱-۳: ضریب شکست حقیقی و موهومی اکسید سیلیکون در مراجع مختلف [۴۵, ۴۴]. ..... ۳۰
- شکل ۲-۳: نحوه تغییرات پتانسیل شیمیایی گرافن با اعمال بایاس الکتریکی. ..... ۳۱
- شکل ۳-۳: مش بندی در نرم افزار COMSOL. ..... ۳۲
- شکل ۱-۴: موجبر پلاسمونی مبتنی بر ساختار گرافن- فلز [۴۱]. ..... ۳۳

شکل ۴-۲: ساختار توری استفاده شده برای برانگیزش پلاسمون های سطحی گرافن. .... ۳۴

شکل ۴-۳: پروفایل میدان الکتریکی نرمالیزه شده ساختار توری (الف)  $\frac{\Lambda}{\lambda_p} = 1$  (ب)  $\frac{\Lambda}{\lambda_p} = 1.5$  [۴۱]... ۳۶

شکل ۴-۴: پروفایل میدان الکتریکی ساختار توری (الف)  $\frac{\Lambda}{\lambda_p} = 1$  (ب)  $\frac{\Lambda}{\lambda_p} = 1.5$  ..... ۳۷

شکل ۴-۵: (الف) ضریب جذب بر حسب ضریب تسهیم. (ب) طیف عبور بر حسب فرکانس برای سه پتانسیل شیمیایی ۰/۲ (سیاه)، ۰/۲۵ (آبی) و ۰/۳ (قرمز). (ج) ضریب جذب بر حسب دوره تناوب ساختار توری در حالیکه ضریب وظیفه ۰/۹۸ در نظر گرفته شده است [۴۱] ..... ۳۷

شکل ۴-۶: (الف) ضریب جذب بر حسب ضریب تسهیم. (ب) طیف عبور بر حسب فرکانس برای سه پتانسیل شیمیایی ۰/۲، ۰/۲۵ و ۰/۳ الکترون ولت. (ج) ضریب جذب بر حسب دوره تناوب ساختار توری. .... ۳۸

شکل ۴-۷: (الف) قسمت حقیقی و (ب) قسمت موهومی ضریب شکست مد بر حسب تغییرات فرکانس و ضخامت اکسید [۴۱] ..... ۴۰

شکل ۴-۸: (الف) قسمت حقیقی و (ب) قسمت موهومی ضریب شکست مد بر حسب تغییرات فرکانس و پتانسیل شیمیایی [۴۱] ..... ۴۰

شکل ۴-۹: شماتیک موجبر پلاسمونی شبیه سازی شده در مرجع [۴۶] ..... ۴۱

شکل ۴-۱۰: ساختار رسم شده در نرم افزار کامسول با استفاده از پارامترهای جدول ۴-۲ ..... ۴۲

شکل ۴-۱۱: پروفایل میدان الکتریکی موجبر پلاسمونی. توزیع میدان  $E_y(x, 0)$  و  $E_y(0, y)$  نیز در شکل نشان داده شده است [۴۶] ..... ۴۲

شکل ۴-۱۲: پروفایل میدان الکتریکی مد پلاسمونی شبیه سازی شده ساختار شکل ۴-۱۰ ..... ۴۳

شکل ۴-۱۳: بررسی تغییرات طول انتشار مد اصلی به ازای تغییرات  $w_{co}$  و  $h_{SiO_2}$  [۴۶] ..... ۴۴

شکل ۴-۱۴: پروفایل میدان الکتریکی مد اصلی موجبر زمانی که  $w_{co} = 300nm$  و  $h_{SiO_2} = 5nm$  هستند. .... ۴۴

شکل ۴-۱۵: پروفایل میدان الکتریکی مد اصلی موجبر زمانی که  $w_{co} = 300nm$  و  $h_{SiO_2} = 20nm$  هستند. .... ۴۵

شکل ۴-۱۶: پروفایل میدان الکتریکی مد اصلی موجبر زمانی که  $w_{co} = 300nm$  و  $h_{SiO_2} = 50nm$  هستند. .... ۴۵

شکل ۴-۱۷: (الف) قسمت حقیقی و (ب) قسمت موهومی ضریب شکست مد بر حسب تغییرات فرکانس و ضخامت اکسید. .... ۴۶

شکل ۴-۱۸: (الف) قسمت حقیقی و (ب) قسمت موهومی ضریب شکست مد بر حسب تغییرات فرکانس و پتانسیل شیمیایی. .... ۴۶

شکل ۴-۱۹: پروفایل میدان الکتریکی برای چهار مد اول پلاسمون پلاریتون های سطحی برای ضخامت های به ترتیب، ۸ nm، ۵۰ nm و ۲۰۰ nm ناحیه اکسید جداکننده گرافن و فلز طلا ..... ۴۷

شکل ۴-۲۰: (الف) قسمت حقیقی و (ب) قسمت موهومی ضریب شکست مؤثر ساختار (ج) طول موج پلاسمون های سطحی و (د) طول انتشار پلاسمون های سطحی بر حسب تغییرات پتانسیل شیمیایی... ۴۸

شکل ۴-۲۱: نمودار ضریب جذب بر حسب فرکانس برای سه مقدار پتانسیل شیمیایی ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ میلی الکترون ولت. .... ۴۹

شکل ۴-۲۲: شمای موجبر شبیه سازی شده در حالت سه بعدی. .... ۵۰

شکل ۴-۲۳: (الف) نمای کنار و (ب) نمای بالای پروفایل میدان الکتریکی پلاسمون پلایتون های سطحی بر انگیخته شده در ساختار توری (میدان الکتریکی بر حسب  $v/m$  و ابعاد بر حسب nm نمایش داده شده است). .... ۵۰

شکل ۴-۲۴: شماتیک سوئیچ پلاسمونی طراحی شده. .... ۵۲

شکل ۴-۲۵: (الف) پروفایل توزیع مؤلفه  $E_x$  میدان الکتریکی در طول سوئیچ (ب) نمای بالا و (ج) نمای کنار در حالت خاموش و (د) نمای بالا و (ه) نمای کنار در حالت روشن. (و) تغییرات میدان الکتریکی کل در حالت روشن و خاموش در طول بلوک ۲. .... ۵۳

شکل ۴-۲۶: پروفایل توزیع میدان الکتریکی در درگاه خروجی (صفحه  $y-z$ ) برای حالت خاموش و روشن سوئیچ. .... ۵۴

شکل ۴-۲۷: پروفایل توزیع میدان الکتریکی در طول سوئیچ برای حالت های روشن و خاموش (الف) نمای کنار و (ب) نمای بالا. .... ۵۵

شکل ۴-۲۸: (الف) طیف عبور در حالت روشن سوئیچ و (ب) حالت خاموش (ج) نسبت ON /OFF (د) عمق مدولاسیون بر حسب تغییرات عرض ساختار. .... ۵۸

شکل ۴-۲۹: (الف) منحنی طیف عبور در حالت روشن سوئیچ و (ب) حالت خاموش (ج) نسبت ON /OFF (د) عمق مدولاسیون بر حسب تغییرات ضخامت اکسید. .... ۵۹

شکل ۴-۳۰: (الف) طیف عبور در حالت روشن سوئیچ و (ب) حالت خاموش (ج) نسبت ON /OFF (د) عمق مدولاسیون بر حسب تغییرات طول افزاره. .... ۶۰

شکل ۴-۳۱: (الف) قسمت حقیقی و (ب) قسمت موهومی ضریب شکست مؤثر ساختار بر حسب  $\mu_c$  (ج) تغییرات نمودار شایستگی موجبر و (د) طول انتشار پلاسمون های سطحی با تغییر  $\mu_c$ . .... ۶۱

شکل ۴-۳۲: (الف) میزان عبور در حالت های روشن و خاموش سوئیچ (ب) نسبت ON/OFF (ج) عمق مدولاسیون بر حسب تغییرات عرض ساختار. .... ۶۳

شکل ۴-۳۳: میزان عبور در حالت های روشن و خاموش سوئیچ بر حسب ضخامت لایه اکسید جدا کننده ساختار (الف) نسبت ON /OFF (ب) عمق مدولاسیون (ج). .... ۶۴

شکل ۴-۳۴: (الف) میزان عبور در حالت های روشن و خاموش سوئیچ بر حسب طول بلوک ۲ (ب) نسبت ON/OFF (ج) عمق مدولاسیون. .... ۶۵

شکل ۴-۳۵: نمای بالا از پروفایل میدان الکتریکی سوئیچ پلاسمونی طراحی شده در ناحیه اکسید جدا کننده گرافن و فلز در طول افزاره. (الف) حالت خاموش و (ب) حالت روشن. .... ۶۶

شکل ۴-۳۶: طیف عبور و عمق مدولاسیون مدولاتور پلاسمونی بر حسب تغییرات  $\mu_c$ . .... ۶۷

شکل ۴-۳۷: (الف) قسمت حقیقی و (ب) قسمت موهومی ضریب شکست مؤثر ساختار بر حسب  $\mu_c$  (ج) نمودار شایستگی موجبر و (د) طول انتشار پلاسمون های سطحی با تغییر  $\mu_c$ . .... ۶۸

شکل ۴-۳۸: پروفایل میدان الکتریکی (GV/m) با تغییر پتانسیل شیمیایی بلوک ۲. (الف) بازه ۰ تا ۳۰۰ meV و (ب) بازه ۳۰۰ meV تا ۱ eV. .... ۶۸

شکل ۴-۳۹: نمای بالای پروفایل های میدان الکتریکی در ناحیه اکسید بین گرافن و فلز با تغییر پتانسیل شیمیایی گرافن از ۰ تا ۱ eV برای مدولاتور پیشنهادی. .... ۶۹

شکل ۴-۴۰: طول موج پلاسمون های سطحی انتشاری در بلوک ۲ بر حسب تغییرات  $\mu_c$ . .... ۶۹

شکل ۴-۴۱: شمای سه بعدی ساختار سوئیچ پلاسمونی Y شکل (نسبت بین ابعاد رعایت نشده است). ۷۰

شکل ۴-۴۲: نمای بالا از پروفایل میدان الکتریکی در ناحیه اکسید جدا کننده گرافن و طلا. .... ۷۱

شکل ۴-۴۳: شماتیک سه بعدی ساختار گیت پلاسمونی AND (نسبت بین ابعاد رعایت نشده است). ۷۳

شکل ۴-۴۴: نمای بالا از پروفایل میدان الکتریکی در ناحیه اکسید جدا کننده گرافن و طلا. .... ۷۳

شکل ۴-۴۵: شمای نحوه بایاس دهی لایه گرافن در گیت منطقی AND. .... ۷۴

شکل ۴-۴۶: شمای سه بعدی ساختار گیت پلاسمونی OR (نسبت بین ابعاد رعایت نشده است). ۷۵

شکل ۴-۴۷: نمای بالا از پروفایل میدان الکتریکی گیت منطقی OR در ناحیه اکسید جدا کننده گرافن و طلا. .... ۷۵



## فصل ۱ - مقدمه

### ۱-۱- پیشگفتار

گستره فرکانسی تراهرتز به دلیل کاربردهای گوناگون از جمله مخابرات، تصویربرداری، حسگرها و... مورد توجه محققان سراسر جهان قرار دارد. در بسیاری از موارد به میزان محصورشدگی بیشتری برای موج تراهرتز نیاز است. برای مثال در تصویربرداری های پزشکی، رزولوشن بالاتر تصویر اهمیت خاصی دارد. مجتمع سازی مدارات الکترونیکی و اپتیکی و بهره بردن از خواص غیرخطی موج تراهرتز از دیگر مثال های کاربردی اهمیت تحدید بیشتر موج تراهرتز هستند. علم پلاسمونیک شاخه علمی نوید بخشی برای رسیدن به این هدف است. در حوزه تراهرتز فلز قابلیت حمل پلاسمون های سطحی را ندارد. در سال های اخیر ثابت شد که گرافن در حوزه تراهرتز می تواند به خوبی پذیرای پلاسمون های سطحی باشد و با تلفات پایینی آنها را انتشار دهد. با استفاده از مزایای نانو پلاسمونیک مبتنی بر گرافن می توان افزاره هایی پلاسمونی طراحی کرد که قابلیت مجتمع سازی با ادوات الکترونیکی در یک تراشه را داشته باشند. در واقع مشکل بزرگ بودن افزاره های اپتیکی در مقایسه با همتهای الکترونیکی خود و عدم امکان مجتمع سازی با ادوات الکترونیکی باعث محروم ماندن از مزیت سرعت بالای انتقال اطلاعات اپتیک در مدارهای مجتمع الکترونیکی شده است. پلاسمونیک مبتنی بر گرافن با مزایای توأم سرعت انتقال اطلاعات نزدیک به اپتیک و فشردگی ابعاد در حد افزاهای الکترونیکی می تواند خلأ بین الکترونیک و فوتونیک را پر کند.

در ادامه به بررسی و مرور مقالات حوزهی گرافن پلاسمونیک خواهیم پرداخت.

### ۱-۲- مروری بر کارهای انجام شده در زمینه گرافن پلاسمونیک

سال ۲۰۰۹ جابلن<sup>۱</sup> و همکارانش برای نخستین بار به صورت تئوری نشان دادند که گرافن آلائیده شده در فرکانسهای کوچکتر از فرکانس فونون نوری ( $\hbar\omega \approx 0.2 \text{ eV}$ ) توانایی انتشار پلاسمون را دارد [۱]. سپس کاپین<sup>۲</sup> و همکارانش نشان دادند که گرافن دارای ویژگی های اتلاف کم در نواحی فرکانسی خاص، قابلیت تنظیم پذیری و توانایی حمایت مد پلاسمون سطحی به شدت محصور شده است؛ بنابراین گرافن می تواند گزینه مناسبی برای طراحی افزاره های کم توان و بسیار سریع باشد [۲]. نخستین مقاله تجربی در این زمینه توسط ژو<sup>۳</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۱ به چاپ رسید [۳]، البته در این مدت مقالات تئوری دیگری نیز به این مبحث پرداختند. آنها برانگیزش پلاسمون ها در آرایه ای از میکرو نوارهای گرافنی را

<sup>1</sup> Jablan

<sup>2</sup> Koppens

<sup>3</sup> Ju

مورد بررسی قرار دادند. این گروه دو روش برای جابجایی بیشینه نوسان‌های پلاسمونی در گستره‌ای وسیع از حوزه تراهرتز را ارائه دادند. اولین روش تغییر عرض میکرو نوارها و دوم تغییر آلایش به کمک گیت قرار داده شده روی گرافن بود. پس از کار تجربی گروه ژو، نیکیتین<sup>۱</sup> و همکارانش طیف‌های جذب، انعکاس و عبور میکرو نوارها را مورد بررسی قرار دادند [۴]. آنها سعی داشتند که با تغییر پارامترهای ساختار و نرخ پراکندگی، مقدار جذب را افزایش دهند. از طرفی تانگراتاناسیری<sup>۲</sup> و همکارانش می‌خواستند نشان دهند که گرافن آلاییده و الگودهی شده، امکان جذب ۱۰۰ درصدی نور تابشی را دارد [۵]. آنها ثابت کردند که ساختار آرایه‌ای از نانو قرص‌های گرافنی قرار گرفته روی فلز و با بستر دی الکتریک، توانایی جذب کامل نور را دارد. در سال ۲۰۱۰ اندرسن<sup>۳</sup> با اعمال گیت الکتریکی مدولاتور گرافنی مبتنی بر گذارهای درون باندهای<sup>۴</sup> را پیشنهاد داد [۶]. در این مدولاتور تلفات درون باندهای پلاسمون ها توسط تغییر پتانسیل شیمیایی گرافن در فرکانس فرو سرخ میانی کنترل می‌شد. از نظر تئوری این نوع مدولاسیون امکان سرعت سوئیچ زنی بالایی را فراهم می‌کند. نمونه ساخته شده این نوع مدولاتور در مرجع [۷] آمده است. از طرفی، لیو<sup>۵</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۱ مدولاتور نوری پهن باند گرافنی را ساختند که در گستره‌ی بین  $1/35 \mu\text{m}$  تا  $1/6 \mu\text{m}$  کار می‌کرد [۸]. اساس کار این مدولاتور تنظیم الکتریکی چگالی حامل لایه ی گرافن بود که از این طریق گذارهای بین باندهای مدوله می‌کردند. در سال ۲۰۱۲ گروهی از آی‌بی‌ام<sup>۶</sup> افزاره‌ای نوری با ترکیبی از پشته‌های گرافن/ عایق ساختند که تشدیدهای پلاسمونی آن با تک لایه‌ی گرافن متفاوت بود [۹]. توسط الگو دهی گرافن در پشته‌ها یک فیلتر میان نگذر برای طول موج فروسرخ دور<sup>۸</sup> و با ویژگی های پهن باند و تنظیم پذیر ساختند.

طیف فرکانسی تابش های THz در گستره ۰/۱ تا ۱۰ THz که معادل طول موج  $3 \mu\text{m}$  تا  $3 \text{mm}$  است. این گستره فرکانسی برای طراحی مدولاتورهای سریع و بسیار کارآمد مناسب است. در ادامه انواع مدولاتورهای این گستره را معرفی می‌کنیم.

### ۱-۳- مروری بر مدولاتورهای تراهرتز

در تمامی روش های مدولاسیون<sup>۹</sup> سیگنالی حاوی اطلاعات ارسالی، سیگنال دیگری را مدوله می‌کند. سیگنال دوم که به موج حامل<sup>۱۰</sup> معروف است، سیگنالی است فرکانس بالا، برای سرعت بخشیدن در ارسال سیگنال اول. در واقع سیگنال اطلاعات بر سیگنال حامل سوار شده و از فرستنده به سمت گیرنده

<sup>1</sup> Nikitin

<sup>2</sup> Thongrattanasiri

<sup>3</sup> Anderson

<sup>4</sup> Intraband transitions

<sup>5</sup> Liu

<sup>6</sup> IBM

<sup>7</sup> Stack

<sup>8</sup> Far- infrared

<sup>9</sup> Modulation

<sup>10</sup> Carrier wave

اطلاعات ارسال می گردد. بر حسب اینکه سیگنال های اول و دوم از چه نوعی باشند نامگذاری مدولاتورها<sup>۱</sup> صورت می پذیرد. در روش تمام نوری یک موج نوری حاوی اطلاعات، خصوصیات موج نوری دیگری را تغییر می دهد یا به اصطلاح مدوله می کند. این نوع مدولاتورها بیشترین سرعت مدولاسیون در بین انواع مدولاتورها را به خود اختصاص داده اند. در مدولاتورهای الکتريکی - نوری یک سیگنال الکتريکی عمل مدولاسیون را بر روی سیگنال نوری دیگری انجام می دهد. و نهایتاً در مدولاتورهای حرارتی سیگنال کنترلی از جنس تغییرات دمایی است.

در این بخش روش های مختلف مدولاسیون خواص الکترومغناطیسی امواج تراهرتز، مرور شده است. مدولاتورهای مختلف شامل الکترونیکی، نوری، حرارتی، گرافنی، مبتنی بر فرامواد<sup>۲</sup> و فوتونیک کریستالی بررسی شده است. در آخر هم مقایسه ای بین آنها انجام داده ایم.

### ۱-۳-۱ - مدولاسیون تمام نوری در نیمه هادی ها و ساختارهای فرامواد

در روش مدولاسیون تمام نوری با استفاده از ساختار نیمه هادی، این چنین است که ساختار نیمه هادی بر سر راه عبور موج تراهرتز قرار می گیرد. حال خواص نوری ساختار نیمه هادی توسط یک پمپ نوری کنترل می شود. با این روش موج تراهرتز تابشی را مدوله می کنند. اگر انرژی سیگنال پمپ بیشتر از شکاف انرژی<sup>۳</sup> نیمه هادی باشد ( $\hbar\omega > E_g$ )، فوتون تابشی باعث تولید حامل در نیمه هادی می گردد. که زمان بازترکیب حامل معمولاً در مقیاس پیکو ثانیه و فمتو ثانیه است [۱۰]. میزان حامل های تولیدی توسط مدل درود سنجیده می شود [۱۱].

$$\sigma(\omega) = \varepsilon_0 \frac{\omega_p^2 \tau}{1 - i\omega\tau} \quad 1-1$$

که  $\varepsilon_0$ ،  $\omega_p$ ،  $\tau$ ،  $\omega$  و  $\sigma(\omega)$  به ترتیب گذردهی الکتريکی در فضای آزاد، فرکانس پلاسما، زمان بازترکیب، فرکانس زاویه ای و هدایت نوری هستند. فرکانس پلاسما ( $\omega_p = \frac{ne^2}{\varepsilon_0 m}$ ) فرکانسی است که مواد به ازای کوچکتر از آن خواص فلزی دارند و به ازای بزرگتر از آن شفاف هستند. با استفاده از لیزرهای بسیار سریع (با عرض پالس شبیه زمان بازترکیب در نیمه هادی) برای سیگنال پمپ می توان مدولاتورهای تراهرتزی با سرعت بسیار بالا طراحی کرد.

در سال ۱۹۹۱ آقایان آلیوس<sup>۴</sup> و دودل<sup>۵</sup> مدولاسیون موج تراهرتز را با روش برانگیزش<sup>۱</sup> حامل های نیمه هادی سیلیکون ارائه دادند [۱۲]. فرکانس کاری این مدولاتور ۲/۵ THz و پهنای پالس  $\tau = 28$  ms

<sup>1</sup> Modulator

<sup>2</sup> Metamaterial

<sup>3</sup> Band gap

<sup>4</sup> Alius

<sup>5</sup> Dodel

است. در کارهای بعدی سعی بر این بود که سرعت مدولاسیون را افزایش دهند. یک سال بعد آقایان وگل<sup>۲</sup> و دودل توانستند پهنای پالس را تا ۴۳۰ ns کاهش دهند [۱۳]. دیگر کارهای دهه ۹۰ استفاده از نیمه هادی های گالیم آرسناید و سیلیکون برای رسیدن به پهنای پالس ۱۰ ns [۱۴] و ۵ ns [۱۵] در فرکانس کاری ۱/۴ THz بود. دو عامل اصلی محدودکننده سرعت مدولاتورهای تمام نوری مبتنی بر نیمه هادی، پهنای پالس لیزر پمپ و زمان باز ترکیب حامل در نیمه هادی است [۱۶]. البته عوامل محدود کننده ی دیگری همچون مقاومت حالت خاموش<sup>۳</sup>، موپلیته و طول عمر حامل وجود دارد. اگرچه لیزرهای اخیر به اندازه کافی سریع هستند که بتوانند مدولاسیون تراهرتز را روی سیگنال THz اعمال کنند اما همچنان زمان بازترکیب حامل در نیمه هادی عامل محدود کننده سرعت در این نسل از مدولاتورها است. در سال ۲۰۰۵ مدولاتور تمام نوری با عمق مدولاسیون ۰/۲۵ تا ۰/۱ و پهنای پالسی در مقیاس پیکو ثانیه ساخته شد [۱۷]. ساختار مدولاتور بصورت ساختار توری<sup>۴</sup> با ضخامت ۱۳۰ μm از InSb با دوره تناوب ۳۰۰ μm و عرض ۶۵ μm ارائه شد. کنترل نوری میزان حامل لایه InSb باعث تغییر در میزان عبور موج تراهرتز از ساختار توری می شود. با ارتقاء این روش نشان دادند که نیمه هادی می تواند برای تنظیم فعال خواص فرامواد در فرکانس های تراهرتز مناسب باشد. در سال ۲۰۰۶ فرامادهای حلقه نوسانگر شکاف دار<sup>۵</sup> بر بستر شبه عایق - گالیم آرسناید<sup>۶</sup> با فرکانس کاری ۰/۵۶ THz ساخته شد [۱۸]. عمق مدولاسیون برای این ساختار ۸۰٪ گزارش شده است. مقدار عمق مدولاسیون در این نوع از مدولاتور نسبت به مقادیر گزارش شده قبلی بهبود زیادی پیدا کرده است اما ضعف اساسی این مدولاتور سرعت پایین آن است که ناشی از زمان زیاد باز ترکیب در SI- GaAs می باشد. یک سال بعد چن<sup>۷</sup> و همکارانش ساختار مشابهی بر بستر ErAs/GaAs با فرکانس کاری ۰/۷۵ THz و پهنای پالس ۲۰ ps ساختند. به این ترتیب مشکل زمان بازترکیب بستر برطرف شد و این زمان به مقیاس پیکو ثانیه رسانده شد [۱۹]. یکی دیگر از کارهای انجام شده مدولاتور فرکانسی با ساختار هیبرید فرامواد/ نیمه هادی است [۲۰]. در این ساختار سیلیکون نشانده شده بر یاقوت کبود<sup>۸</sup> به عنوان ناحیه خازنی حلقه تشدیدگر فراموادی استفاده شده است. شکل ۱-۱ این ساختار را نشان می دهد. فرکانس کاری این مدولاتور THz ۰/۶ و عمق مدولاسیون ۷۰٪ است.

<sup>1</sup> Excitation

<sup>2</sup> Vogel

<sup>3</sup> Dark resistivity

<sup>4</sup> Grating

<sup>5</sup> Split ring resonator metamaterials

<sup>6</sup> Semi insulator-GaAs (SI- GaAs)

<sup>7</sup> Chen

<sup>8</sup> Silicon on Sapphire (SOS)