

اللَّهُمَّ اللَّهُمَّ اللَّهُمَّ



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

آقای حجت جمعه گی فتح آباد پایان نامه ۶ واحدی خود را با عنوان بررسی آثار پلاسمونی در طیف جذب نانو نوارهای گرافینی در تاریخ ۱۳۹۲/۹/۳ 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 وحید احمدی	استاد	
استاد ناظر	دکتر محمدکاظم مروج فرشی	استاد	
استاد ناظر	دکتر سارا درباری	استادیار	
استاد ناظر	دکتر فاطمه شهشانی	دانشیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر محمدکاظم مروج فرشی	استاد	

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

مقدمه: با عنایت به سیاستهای پژوهشی 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 هیات علمی، دانشجویان، دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان نامه ها / رساله های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین نامه ها و دستورالعمل های مصوب دانشگاه باشد.


ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه / رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشد. تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان نامه / رساله نیز منتشر می شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین نامه های مصوب انجام می شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره های ملی، منطقه ای و بین المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می شود.

نام و نام خانوادگی
امضاء

جهت همکاری و فتح ابواب


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 فعالیت های 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/ نگارنده حجت جمعه گی فتح آباد در رشته مهندسی برق - الکترونیک است که در سال ۱۳۹۲ در دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر وحید احمدی 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 کند. 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 رابه عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأدیه 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 از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب حجت جمعه گی فتح آباد دانشجوی رشته مهندسی برق - الکترونیک مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: حجت جمعه گی فتح آباد

تاریخ و امضا: ۹۲، ۹، ۴



دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده برق و کامپیوتر

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق – الکترونیک

بررسی آثار پلاسمونی در طیف جذب نانو نوارهای گرافینی

حجت جمعه گی فتح آباد

استاد راهنما:

پروفسور وحید احمدی

پاییز ۱۳۹۲

تقدیم بہ

دکنکی ہای مادرم

حمایت ہای بی دریغ پدرم

ودد لکرمی ہای ہمسر

حمد و سپاس ایزد منان را که با الطاف بیکران خود به من توفیق داد تا قدمی را در راه علم و دانش در کنار اساتید فرهیخته بردارم. امیدوارم که این قدم‌های کوچک مورد رضای حق قرار گرفته و توفیق پیمودن این مسیر نورانی را تا همیشه به من عطا فرماید.

اینک که پایان نامه خود را به اتمام رسانده‌ام بر خود واجب می‌دانم از استاد ارجمندم جناب آقای دکتر احمدی به پاس تلاش‌های خستگی‌ناپذیر و راهنمایی‌های ارزشمندشان که نه تنها راهگشای من در اتمام این پروژه بود بلکه الگویی در تفکر علمی من قرار گرفته است کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم. از استاد بزرگوار جناب آقای دکتر مروج که از محضر ایشان بهره‌ها بردم مراتب سپاس و تشکر را دارم. خالصانه‌ترین درودها را نثار سرکار خانم دکتر درباری و سرکار خانم شهشهانی می‌کنم که زحمت داوری این پایان‌نامه را برعهده گرفتند و برای هر چه پربارتر شدن این پایان‌نامه تلاش کردند. از آقای محمد کریمی دانشجوی دکتری تربیت مدرس به خاطر بحث‌های سودمند و همچنین برای محاسبه رسانایی گرافین به روش تقریب فاز تصادفی تشکر می‌کنم. از آقای اشکان وکیل در دانشگاه پنسیلوانیا به دلیل کمک‌های بدون چشم‌داشت و بی‌دریغشان نهایت تشکر را دارم. برای دوستان خوبم در آزمایشگاه اپتوالکترونیک و بیرون از آن که هر یک به نحوی به من کمک کردند آرزوی موفقیت دارم. از خانواده و همسرم به پاس تلاش‌های پر محبتشان و نفس‌های خیرشان که همواره مایه امید من بوده است سپاسگزاری می‌کنم.

چکیده

هدف علم پلاسمونیک، مجتمع کردن مدارات نوری است، در این میان، مواد متداول مورد استفاده در افزاره‌های پلاسمونی به دلیل تلفات بالا، نیل به هدف علم پلاسمونیک را با مشکل همراه کرده‌اند. چندی پیش ثابت شد که گرافین امکان میزبانی پلاسمون‌های سطحی را دارد، البته با دو ویژگی منحصر به فرد نسبت به بقیه مواد: تلفات ناچیز و تنظیم پذیری پلاسمون‌ها. مقالات زیادی در این حوزه به چاپ رسیده‌اند، اما بیشتر آن‌ها به مباحث فیزیکی آن پرداخته و افزاره‌های انگشت‌شماری تا به حال مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

در این پایان‌نامه ابتدا به بررسی شرایط لازم برای انتشار پلاسمون‌ها گرافین پرداختیم، سپس به کمک رسانایی نوری بدست آمده توسط تقریب کوبو، گذردهی گرافین را محاسبه کردیم. در فصل‌نهایی این پایان‌نامه به معرفی مدولاتوری خواهیم پرداخت که در آن از نوسان پلاسمون‌های گرافین برای ایجاد نوسان فانو در طیف عبور موجبر MIM و کنترل طیف عبوری مدولاتور به کمک اعمال ولتاژ استفاده شده است. سپس تأثیر ابعاد مختلف ساختار بر روی عملکرد مدولاتور را بررسی کردیم. اما در نهایت به این نتیجه رسیدیم که این ساختار به دلیل تلفات بالای طلا در محدوده‌ی فرسرخ میانی، از عملکرد خوبی برخوردار نیست. بنابراین پس از بررسی موجبرهای پلاسمونی مختلف، به کمک موجبر پلاسمونی هیبرید به بهبود عملکرد مدولاتور پرداختیم. پس از بررسی پارامترهای مختلف ساختار، در نهایت توانستیم به مدولاتوری برسیم که می‌تواند با اعمال ۱۵ ولت مقدار عبور را از ۸۵ درصد به ۸ درصد برساند. ساختار معرفی شده را می‌توان به سادگی با تکنولوژی موجود CMOS با ابعاد بسیار کوچک طراحی شده در پایان‌نامه بر روی ویفر SOI ساخت.

کلید واژه: گرافین، پلاسمون، گرافین پلاسمونیک، مدولاتور گرافینی

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۵	فهرست جدول‌ها
۵	فهرست شکل‌ها
۱	فصل ۱- مقدمه و مروری بر روی کارهای انجام‌گرفته
۱	۱-۱- پیشگفتار
۲	۲-۱- مروری بر مقالات حوزه گرافین پلاسمونیک
۴	۳-۱- مروری بر موجبرهای پلاسمونی
۴	۱-۳-۱- موجبر عایق-فلز
۵	۲-۳-۱- موجبر پلاسمونی بارگذاری شده با دی الکتریک
۵	۳-۳-۱- پلاریتون پلاسمون سطحی دوربرد
۶	۴-۳-۱- موجبر فلز- دی الکتریک- فلز
۸	۵-۳-۱- کانال SPP
۸	۶-۳-۱- موجبرهای پلاسمونی هیبریدی
۱۱	فصل ۲- تئوری و فیزیک مسئله
۱۱	۱-۲- پیشگفتار
۱۲	۲-۲- گرافین
۱۴	۳-۲- پلاسمون- پلاریتون‌های سطحی
۱۷	۴-۲- رسانایی مختلط گرافین
۱۷	۱-۴-۲- روابط تحلیلی رسانایی گرافین
۲۱	۲-۴-۲- نتایج عددی رسانایی گرافین
۲۸	۵-۲- امواج پلاسمون- پلاریتون‌های سطحی در گرافین
۳۴	۶-۲- مقایسه‌ی خواص پلاسمونی گرافین و نقره
۳۷	۷-۲- تراز فرمی در گرافین
۳۸	۸-۲- تئوری و فیزیک نوسان‌های فانو

فصل ۳ - روش‌های محاسباتی.....	۴۱
۱-۳- پیشگفتار.....	۴۱
۲-۳- مدل‌سازی گرافین.....	۴۱
۳-۳- گذردهی اکسید سیلیکون در حوزه فرسرخ میانی.....	۴۲
۴-۳- حل معادله انتشار موج در نرم‌افزار COMSOL.....	۴۳
۱-۴-۳- روش المان محدود و شبیه‌سازی گرافین.....	۴۳
۱-۱-۴-۳- حوزه محاسباتی (Ω).....	۴۴
۲-۱-۴-۳- شرایط مرزی.....	۴۵
۳-۱-۴-۳- مش بندی.....	۴۶
فصل ۴ - بررسی و تحلیل نتایج شبیه‌سازی.....	۴۷
۱-۴- پیشگفتار.....	۴۷
۲-۴- بازآفرینی مقاله‌ی موجبر پلاسمونی.....	۴۷
۳-۴- پلاسمون‌های سطحی در گرافین.....	۵۵
۴-۴- پلاسمون‌های سطحی در نوار گرافین.....	۶۰
۵-۴- مدولاتور گرافینی با استفاده از موجبر پلاسمونی MIM.....	۶۱
۱-۵-۴- طیف عبور موجبر MIM.....	۶۲
۲-۵-۴- انتقال مد از موجبر MIM به گرافین.....	۶۳
۳-۵-۴- عملکرد مدولاتور.....	۶۴
۴-۵-۴- بررسی تأثیر ساختار در عملکرد مدولاتور.....	۷۰
۱-۴-۵-۴- اثر ضخامت لایه‌ی اکسید سیلیکون.....	۷۰
۲-۴-۵-۴- اثر ضخامت لایه‌ی فلز.....	۷۲
۳-۴-۵-۴- اثر عرض نوار گرافینی.....	۷۳
۴-۴-۵-۴- تغییر جنس فلز.....	۷۴
۵-۴-۵-۴- تغییر فرکانس کاری مدولاتور.....	۷۵
۶-۴- مدولاتور گرافینی با استفاده از موجبر پلاسمونی هیبریدی.....	۷۸
۱-۶-۴- بررسی تأثیر ساختار در عملکرد مدولاتور.....	۸۰
۱-۱-۶-۴- اثر ضخامت لایه‌ی اکسید سیلیکون.....	۸۱
۲-۱-۶-۴- اثر ضخامت لایه‌ی فلز.....	۸۲

۸۳	..... تغییر عرض نوار گرافینی	۳-۱-۶-۴
۸۴	..... تغییر جنس فلز	۴-۱-۶-۴
۸۶	..... محدودیت فرکانسی مدولاتور	۲-۶-۴
۸۸	..... نتیجه گیری و پیشنهادات	فصل ۵-۵
۸۸	..... جمع بندی و نتیجه گیری	۱-۵
۸۹	..... پیشنهادها برای کارهای آینده	۲-۵
۹۰	..... مراجع	فصل ۶-۶
۹۵	..... واژه نامه انگلیسی به فارسی	
۹۷	..... واژه نامه فارسی به انگلیسی	

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۴۸	جدول ۱: پارامترهای شبیه‌سازی موجبر هیبرید.....
۵۶	جدول ۲: پارامترهای شبیه‌سازی گرافین در COMSOL.....
۵۹	جدول ۳: مقایسه‌ی طول موج پلاسمون‌های محاسبه‌شده از رابطه‌ی پاشندگی.....
۶۵	جدول ۴: پارامترهای شبیه‌سازی مدولاتور مبتنی بر موجبر فلز- دی الکتریک- فلز.....
۷۴	جدول ۵: مقایسه‌ی گذردهی فلزهای طلا، نقره و آلومینیم در فرکانس ۴۰ THz.....
۷۵	جدول ۶: پارامترهای مورد استفاده برای شبیه‌سازی ساختار در ۴ فرکانس مختلف.....
۷۹	جدول ۷: پارامترهای شبیه‌سازی مدولاتور مبتنی بر موجبر هیبریدی.....
۸۴	جدول ۸: مقایسه‌ی گذردهی فلزهای طلا، نقره و آلومینیم در فرکانس ۴۰ THz.....

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: سطح مقطع ساختار عایق-فلز با شبیه‌سازی مد پلاسمونی.....	۴
شکل ۱-۲: الف) ساختار موجبر پلاسمونی بارگذاری شده با دی الکتریک، ب) پروفایل میدان شبیه‌سازی شده در ساختار موجبر.....	۵
شکل ۱-۳: ساختار موجبرهای LRSPP.....	۶
شکل ۱-۴: تصویر SEM موجبر پلاسمونی MIM.....	۷
شکل ۱-۵: نمودار شدت میدان مد پلاسمونی در داخل ساختار MIM.....	۷
شکل ۱-۶: الف) طرح کانال V شکل موجبر CPP، ب) تصویر SEM موجبر ساخته‌شده به روش فرزکاری بیم یونی متمرکز.....	۸
شکل ۱-۷: شماتیک موجبر پلاسمونی هیبریدی.....	۹
شکل ۱-۸: الف) نمایشی از موجبر پلاسمونی هیبریدی.....	۹
شکل ۱-۹: الف) پروفایل مد موجبر پلاسمونی هیبریدی، ب) نمودار نشان‌دهنده‌ی نتایج عددی برای طول انتشار در عرضه‌ای موجبری متفاوت W_{co} و ضخامت‌های مختلف اکسید.....	۱۰
شکل ۱-۲: اوربیتال‌ها در گرافین.....	۱۳
شکل ۲-۲: ساختار نوار انرژی گرافین و بزرگنمایی نقاط دیراک.....	۱۴
شکل ۲-۳: الف) نمایشی از موج الکترومغناطیسی و حامل‌های سطحی در فصل مشترک فلز و دی الکتریک، ب) مؤلفه‌ی میدان الکتریکی در نزدیکی سطح.....	۱۵
شکل ۲-۴: نمودار پاشندگی موج SPP.....	۱۵
شکل ۲-۵: روش‌های مختلف برانگیزش SPP. الف) ساختار ریچمن، ب) ساختار ریچمن دو لایه، ج) ساختار اتو، د) برانگیزش به کمک پروب NSOM، ه) پراش از توری، و) پراش از برآمدگی ایجادشده در سطح.....	۱۶
شکل ۲-۶: a) قسمت حقیقی و b) قسمت موهومی رسانایی گرافین در دمای $T = 3K$ بر حسب طول موج و تراز فرمی.....	۲۲
شکل ۲-۷: a) قسمت حقیقی و b) قسمت موهومی رسانایی در دمای $T = 300K$ بر حسب طول موج و تراز فرمی.....	۲۳
شکل ۲-۸: محاسبه‌ی رسانایی گرافین از دو روش تحلیلی و عددی در طول موج $7/51 \mu m$	۲۴

- شکل ۲-۹: سهم ناشی از گذارهای درون باندی (الف) و گذارهای بین باندی (ب) در رسانایی در طول موج $0.7/51 \mu\text{m}$ ۲۵
- شکل ۲-۱۰: قسمت حقیقی و موهومی رسانایی گرافین برای سه مقدار تراز فرمی $0.2, 0.4, 0.6$ بر حسب طول موج ۲۵
- شکل ۲-۱۱: گرافین بی‌نهایت قرار گرفته در صفحه‌ی xy ۲۹
- شکل ۲-۱۲: لایه‌ای با ضخامت Δ و گذردهی ϵ_m در فضای آزاد قرار گرفته است ۳۱
- شکل ۲-۱۳: مقادیر حقیقی (الف) و موهومی (ب) عدد موج بهنجار شده به k_0 و نمودار شایستگی (ج) گرافین بر حسب تراز فرمی و طول موج ۳۶
- شکل ۲-۱۴: استفاده از گرافین به عنوان موجبر پلاسمونی با کمک الگودهی ولتاژ اعمالی ۳۷
- شکل ۲-۱۵: محل تراز فرمی در گرافین قبل (راست) و بعد (چپ) از اعمال ولتاژ ۳۷
- شکل ۲-۱۶: شماتیک دو نوسانگر متصل به هم و نیروی اعمال شده به آن‌ها. (ب) دامنه‌ی نوسان نوسانگر C_1 و (ج) دامنه‌ی نوسان نوسانگر C_2 . نوسانگر اول دارای پروفایل متقارن در $\omega_1 = 1$ و پادمقارن در $\omega_2 = 1.2$ و در نوسانگر دوم هر دو بیشینه متقارن هستند ۳۹
- شکل ۲-۱۷: نوسان فانو در ترکیب دو سیستم ۴۰
- شکل ۲-۱۸: موجبر بلور فوتونی قرار گرفته در کنار یک کاواک، (ب) طیف عبوری ساختار با (خط توپر) و بدون (خط چین) دو نقص ایجاد شده در موجبر ۴۰
- شکل ۳-۱: قسمت‌های حقیقی و موهومی گذردهی نسبی گرافین بر حسب تراز فرمی ۴۱
- شکل ۳-۲: ضریب شکست حقیقی و موهومی اکسید سیلیکون در مراجع مختلف ۴۲
- شکل ۳-۳: نمای سه بعدی گرافین قرار گرفته روی ماده‌ای دیگر ۴۵
- شکل ۳-۴: سطح مقطع شکل ۳-۳ که در شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفته است ۴۵
- شکل ۳-۵: مش بندی در نرم‌افزار COMSOL در اطراف لایه‌ی گرافین ۴۶
- شکل ۴-۱: شماتیک موجبر هیبرید شبیه‌سازی شده در مرجع ۴۸
- شکل ۴-۲: پروفایل مؤلفه‌ی میدان در موجبر هیبرید ۴۹
- شکل ۴-۳: میدان شبیه‌سازی شده ساختار موجبر هیبرید ۴۹
- شکل ۴-۴: توزیع میدان $E_y(0,y)$ شبیه‌سازی شده در شکل ۳-۴ ۵۰
- شکل ۴-۵: توزیع میدان $E_y(x,0)$ شبیه‌سازی شده در شکل ۳-۴ ۵۰
- شکل ۴-۶: قسمت حقیقی ضریب شکست موجبر پلاسمونی بر حسب تغییرات عرض موجبر در سه ضخامت اکسید ۵۰، ۲۰ و ۵ نانومتر ۵۱

- شکل ۴-۷: قسمت حقیقی ضریب شکست موجبر پلاسمونی شبیه‌سازی شده. ۵۱
- شکل ۴-۸: طول انتشار موجبر پلاسمونی بر حسب تغییرات عرض موجبر در سه ضخامت اکسید ۵۰، ۲۰ و ۵ نانومتر. ۵۲
- شکل ۴-۹: طول انتشار موجبر پلاسمونی شبیه‌سازی شده بر حسب تغییرات عرض موجبر در سه ضخامت اکسید ۵۰، ۲۰ و ۵ نانومتر. ۵۳
- شکل ۴-۱۰: پروفایل میدان ساختار شبیه‌سازی شده در ضخامت اکسید ۵۰ nm و عرض ۱۰۰ nm. ۵۳
- شکل ۴-۱۱: پروفایل میدان ساختار شبیه‌سازی شده در ضخامت اکسید ۵۰ nm و عرض ۳۰۰ nm. ۵۳
- شکل ۴-۱۲: پروفایل میدان ساختار شبیه‌سازی شده در ضخامت اکسید ۵۰ nm و عرض ۵۰۰ nm. ۵۴
- شکل ۴-۱۳: طول انتشار و ضریب شکست موثر موجبر پلاسمونی بر حسب تغییرات ارتفاع h_{Si-rib} برای ضخامت اکسید ۵ نانومتر. ۵۴
- شکل ۴-۱۴: طول انتشار و ضریب شکست موثر موجبر پلاسمونی شبیه‌سازی شده بر حسب تغییرات ارتفاع h_{Si-rib} برای ضخامت اکسید ۵ نانومتر. ۵۵
- شکل ۴-۱۵: شمای سه بعدی گرافین قرار گرفته در هوا. ۵۶
- شکل ۴-۱۶: پروفایل میدان عمود بر صفحه‌ی گرافین در ترازهای فرمی ۰/۱ eV (الف)، ۰/۳ eV (ب)، ۰/۴ eV (ج) و ۰/۶ eV (د). ۵۷
- شکل ۴-۱۷: نمودار توزیع میدان رسم شده در شکل ۴-۱۶. طول موج‌های نوسان‌ها برای ترازهای فرمی ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۶ به ترتیب با λ_1 ، λ_2 و λ_3 در شکل مشخص شده‌اند. ۵۸
- شکل ۴-۱۸: طول موج پلاسمون‌های محاسبه‌شده از رابطه‌ی پاشندگی گرافین بر حسب تراز فرمی. ۵۹
- شکل ۴-۱۹: مدهای دوم، چهارم و ششم پلاسمونی حول گرافین. ۶۰
- شکل ۴-۲۰: شمای سه بعدی از ساختار برای شبیه‌سازی نحوه تبدیل پلاسمون موجبر به گرافین. ۶۳
- شکل ۴-۲۱: نحوه‌ی جفت شدگی پلاسمون‌های موجبر به گرافین در ترازهای فرمی ۰/۲ eV (الف)، ۰/۳ eV (ب) و ۰/۶ eV (ج). ۶۴
- شکل ۴-۲۲: شمای سه بعدی و سطح مقطع ساختار مدولاتور پیشنهادی با موجبر MIM. ۶۵
- شکل ۴-۲۳: طیف‌های عبور، بازتابش و جذب مدولاتور پیشنهادی با موجبر MIM. ۶۶
- شکل ۴-۲۴: ساختارهای متداول نوسان فانو. (الف) موجبر به طور مستقیم به کاواک جفت شده است. (ب) موجبر در مجاورت کاواک قرار گرفته است. ۶۶
- شکل ۴-۲۵: مدهای پیوسته موجبر MIM و مدهای گسسته‌ی نوار گرافینی. ۶۷
- شکل ۴-۲۶: مدهای گسسته‌ی نوار گرافینی در مدولاتور پیشنهادی. ۶۸

- شکل ۴-۲۷: نحوه‌ی عملکرد مدولاتور با اعمال ولتاژ. ۷۰
- شکل ۴-۲۸: طیف عبوری در ۴ ضخامت مختلف اکسید سیلیکون بر حسب تراز فرمی. ۷۱
- شکل ۴-۲۹: طیف عبوری بین مقادیر بیشینه و کمینه ی شکل ۴-۲۸ بر حسب ولتاژ اعمالی. ۷۱
- شکل ۴-۳۰: طیف عبوری در ۴ ضخامت مختلف طلا بر حسب تراز فرمی. ۷۲
- شکل ۴-۳۱: طیف عبوری بین مقادیر بیشینه و کمینه ی شکل ۴-۳۰ بر حسب ولتاژ اعمالی. ۷۲
- شکل ۴-۳۲: طیف عبوری در ۴ عرض مختلف گرافین بر حسب تراز فرمی. ۷۳
- شکل ۴-۳۳: طیف عبوری بین مقادیر بیشینه و کمینه ی شکل ۴-۳۲ بر حسب ولتاژ اعمالی. ۷۴
- شکل ۴-۳۴: طیف عبوری مدولاتور با تغییر فلز به نقره و آلومینیم بر حسب تراز فرمی. ۷۵
- شکل ۴-۳۵: طیف عبوری در ۴ طول موج مختلف بر حسب تراز فرمی. ۷۶
- شکل ۴-۳۶: طیف عبوری بین مقادیر بیشینه و کمینه ی شکل ۴-۳۵ بر حسب ولتاژ اعمالی. ۷۶
- شکل ۴-۳۷: قسمت حقیقی گذردهی نسبی گرافین برای ۴ طول موج بر حسب تراز فرمی. ۷۷
- شکل ۴-۳۸: شمای سه بعدی و سطح مقطع ساختار مدولاتور پیشنهادی با موجبر هیبریدی. ۷۹
- شکل ۴-۳۹: طیف‌های عبور، بازتابش و جذب مدولاتور پیشنهادی با موجبر هیبریدی. ۸۰
- شکل ۴-۴۰: طیف عبوری در ۴ ضخامت مختلف اکسید سیلیکون بر حسب تراز فرمی. ۸۱
- شکل ۴-۴۱: طیف عبوری بین مقادیر بیشینه و کمینه ی شکل ۴-۴۰ بر حسب ولتاژ اعمالی. ۸۱
- شکل ۴-۴۲: طیف عبوری در ۴ ضخامت مختلف طلا بر حسب تراز فرمی. ۸۲
- شکل ۴-۴۳: طیف عبوری بین مقادیر بیشینه و کمینه ی شکل ۴-۴۲ بر حسب ولتاژ اعمالی. ۸۳
- شکل ۴-۴۴: طیف عبوری در ۴ عرض مختلف گرافین بر حسب تراز فرمی. ۸۳
- شکل ۴-۴۵: طیف عبوری بین مقادیر بیشینه و کمینه ی شکل ۴-۴۴ بر حسب ولتاژ اعمالی. ۸۴
- شکل ۴-۴۶: طیف عبوری مدولاتور با تغییر فلز به نقره و آلومینیم بر حسب تراز فرمی. ۸۵
- شکل ۴-۴۷: طیف عبوری مدولاتور برای ساختار هیبرید و مقادیر $h_{SiO_2} = 60nm$ و $h_{Au} = 80nm$ و $L = 180nm$ ۸۵
- شکل ۴-۴۸: بهترین عملکرد مدولاتور هیبرید گرافینی در محدوده‌ی کمتر از $0.6 eV$ ۸۶

فهرست علائم و نشانه ها

عنوان	علامت اختصاری
سرعت فرمی	v_F
فرکانس زاویه ای	ω
پتانسیل شیمیایی	μ
نرخ پراکندگی	Γ
دمای کلوین	T
میدان مغناطیسی	B
میدان الکتریکی	E
رسانایی نوری	σ
توزیع فرمی - دیراک	n_F
بار الکترون	e
چگالی حامل ها	n_s
ثابت پلانک	h
ثابت پلانک کاهش یافته	\hbar
عدد موج	β
عدد موج فضای آزاد	k_0
امپدانس ذاتی محیط	η_0
ضخامت گرافین	Δ
گذردهی خلأ	ε_0
گذردهی	ε

ω_p	فرکانس پلاسما
γ	فرکانس برخورد
<i>FOM</i>	نمودار شایستگی
λ_0	طول موج در فضای آزاد
λ_{SPP}	طول موج پلاسمون-پلاریتونه‌ای سطحی
E_F	تراز فرمی
ρ	چگالی حالات

فصل ۱- مقدمه و مروری بر روی کارهای انجام گرفته

۱-۱- پیشگفتار

هدف علم الکترونیک همواره طراحی و تولید افزاره‌هایی سبک، ارزان، کم مصرف و از همه مهم‌تر سریع در پردازش و انتقال اطلاعات بوده است. همان طور که مور پیش‌بینی کرد [۱، ۲] تعداد ترانزیستورها در مدارات مجتمع به طور پیوسته و با سرعت زیاد از زمان اختراع IC در حال افزایش است که موجب پردازش سریع‌تر، بدون افزایش قابل توجه اندازه این مدارات می‌شود. با این حال از سال ۲۰۰۵ تاکنون [۲] رشد قابل توجهی در ریزپردازنده‌ها دیده نشده است. دلیل این عدم پیشرفت تناسب نداشتن مقیاس شدن ولتاژ و ابعاد در ترانزیستورهاست.

ترکیب الکترونیک و فوتونیک یکی از راه‌حل‌های این مشکل است. افزاره‌های فوتونیک به دلیل کار با سیگنال‌های نوری که فرکانس‌های بالاتری دارند، از افزاره‌های الکترونیک سریع‌تر هستند. برای سال‌ها سیلیکون انتخابی مطلوب برای افزاره‌های نوری بوده است، شاید به این دلیل که از تکنولوژی سیلیکون که در الکترونیک به تکامل رسیده بود، برای مجتمع سازی افزاره‌های نوری نیز بهره گرفته شود؛ اما به دلیل اینکه بعضی از افزاره‌های مانند موجبرها باید ابعاد بزرگی داشته باشند تا بتوانند نور را انتقال دهند، این مجتمع سازی افزاره‌های نوری فوتونیک با شکست روبرو می‌شود. شاخه‌ی نانو پلاسمونیک می‌تواند با محصور کردن امواج نوری در مقیاس‌های کوچک‌تر از طول موج، راه‌حلی برای این مشکل باشد. نانو پلاسمونیک در حالی امکان طراحی عناصری چون موجبر را می‌دهد که ابعاد آن بسیار کوچک‌تر از همتای فوتونیک‌شان است. حوزه‌ی پلاسمونیک مهندسی پلاسمون‌های سطحی است، دقیقاً مانند الکترونیک و فوتونیک که به ترتیب علم دست‌کاری الکترون‌ها و فوتون‌هاست.

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

۱-۲- مروری بر مقالات حوزه گرافین پلاسمونیک

جابلن^۱ و همکارانش برای اولین بار در سال ۲۰۰۹ به صورت تئوری اثبات کردند [۶] که گرافین آلاییده شده در فرکانس‌های کوچک‌تر از فرکانس فونون نوری ($\hbar\omega_{oph} \approx 0.2eV$) قابلیت حمل کم اتلاف پلاسمون‌ها را دارد و مقادیر بالای تلفات پلاسمون‌ها ناشی از گذارهای بین باندهای^۲ (توسط برانگیخته شدن زوج الکترون-حفره) بوده که می‌توان آن را با آلایش زیاد حذف کرد.

کاپن^۳ و همکارانش پس از آن نشان دادند [۷] که گرافین در نواحی خاصی از فرکانس کم اتلاف بوده و همچنین قابلیت تنظیم پذیری داشته و توانایی حمایت پلاسمون‌های سطحی به شدت محصورشده را دارد؛ بنابراین گرافین می‌تواند بستری برای افزاره‌های جدید، کم توان و بسیار سریع باشد.

پس از آن مقالاتی به صورت تئوری به این مبحث پرداختند، اما اولین مقاله تجربی در این زمینه توسط ژو^۴ و همکارانش در سال ۲۰۱۱ به چاپ رسید [۸]. این گروه برانگیخته شدن پلاسمون‌ها را در آرایه‌ای از میکرو نوارهای گرافینی را در دمای اتاق بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که می‌توان بیشینه‌ی نوسان‌های پلاسمونی را در گستره‌ی وسیع فرکانسی تراهرتز با تغییر عرض میکرو نوارها و همچنین تغییر آلایش به کمک گیت قرار داده‌شده روی گرافین، تنظیم کرد. به دنبال این کار آزمایشگاهی ارزشمندی، نیکیتین^۵ و همکارانش طیف‌های عبور، انعکاس و جذب نوارها را مورد بررسی قرار دادند [۹] و با تغییر پارامترهای ساختار و نرخ پراکندگی، سعی در بیشینه کردن جذب کردند. در مطالعه‌ای مشابه تانگراتاناسیری^۶ و همکارانش امکان جذب نور ۱۰۰ درصدی را برای گرافین آلاییده شده الگو دهی شده مورد بررسی قرار دادند [۱۰]. آن‌ها ثابت کردند که آرایه‌ای از نانو قرص‌های گرافینی وقتی روی ضخامت خاصی از دی الکتریک پوشانده شده با فلز قرار گیرد، توانایی جذب کامل نور را دارد. این ساختار جذب را نسبت به زاویه‌ی و قطبش نور فرودی مستقل می‌کند.

^۱ Jablan

^۲ Interband Transitions

^۳ Koppens

^۴ Ju

^۵ Nikitin

^۶ Thongrattanasiri