





دانشکده مهندسی برق و رباتیک

رشته مهندسی برق - گرایش مخابرات میدان و موج

پایان نامه کارشناسی ارشد

موضوع

کاربرد سطوح گرافن در طراحی آنتن ریز نوار در باند

ماکروویو

نگارنده:

افسانه صدیقی

استاد راهنما:

دکتر جواد قالیبافان

آذر ۱۳۹۷

شماره: ۱۲۱۳، ۲۰۰۷  
تاریخ: ۵، ۹، ۹۷

باسمه تعالی



دانشگاه گیلان

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای افسانه صدیقی با شماره

دانشجویی ۹۵۰۹۳۰۴ رشته مهندسی مخابرات گرایش میدان و امواج تحت عنوان: کاربرد سطوح گرافن در

طراحی آنتن ریزنوار در باند میکروویو که در تاریخ ۱۳۹۷/۰۹/۰۵ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه

صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

<input type="checkbox"/> مردود	<input checked="" type="checkbox"/> قبول (با درجه: خوب)
<input type="checkbox"/> عملی	<input checked="" type="checkbox"/> نظری

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبۀ علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	حاج میرزا...	استاد	[Signature]
۲- استاد راهنمای دوم	---	---	---
۳- استاد مشاور	---	---	---
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	محمد...	استاد	[Signature]
۵- استاد ممتحن اول	ولی...	استاد	[Signature]
۶- استاد ممتحن دوم	نیا...	استاد	[Signature]

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



تیمصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

## تقدیم به دو وجود مقدس

آنان که ناتوان شدند تا ما به توانایی برسیم...

موباشان سپید شد تا ما رو سفید شویم...

تقدیم به پدر مادر مهربانم که هر لحظه وجودم را از چشمه‌سارِ پر از عشق چشمانشان سیراب می‌کنند. آنان که در سختی‌ها و

دشواری‌های زندگی همواره یاری دلسوز و فداکار و پشتیبانی محکم و مطمئن برایم بوده‌اند. پدر و مادر عزیزم که هرچه دارم از

برکت حضور و دعای خیر آنان است.

از خداوند منان که توفیق تحصیل را به همراه نعمت های بی شمار عطا فرمودند سپاس گزارم. از «جناب

آقای دکتر قالیباف» که در تمامی مراحل انجام این پژوهش از هیچ کلمی فروگذار نکردند سپاسگزارم. بهره

من از فضایل علمی و اخلاقی ایشان آن قدر است که خود را در هر زمان و مرحله ای از زیستن شاکرد

ایشان می دانم.

از «جناب آقای دکتر غلامحسین نژاد» که بی دریغ در پیشبرد این پایان نامه همراه بودند و در هر خطه

راهنما و مشوق من بودند بسیار سپاس گزارم.

# تعهد نامه

این جانب افسانه صدیقی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مخابرات – میدان دانشکده. برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه کاربرد سطوح گرافن در طراحی آنتن ریز نوار در باند ماکروویو تحت راهنمایی دکتر جواد قالبافان متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط این جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورداستفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

## تاریخ

## امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نیست.

در این پژوهش چهار ساختار جدید با استفاده از سطوح گرافن معرفی شده‌اند. آنتن ریزنواری جدید با قابلیت تنظیم قطبش بین دو حالت قطبش خطی، دایروی راست‌گرد و دایروی چپ‌گرد پیشنهاد گردیده است. ایده اصلی در ساختار آنتن‌های پیشنهادی، استفاده از چند نوار باریک از جنس گرافن در قسمت‌های میانی و لبه‌های یک پچ مربعی متداول است. نوارهای گرافنی به وسیله دو سطح ولتاژ DC متفاوت با توجه به تغییر امپدانس سطحی گرافن، فعال و غیرفعال می‌گردند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد آنتن‌های پیشنهادی قابلیت تغییر قطبش تشعشعی را در دو یا سه حالت مختلف در باند فرکانسی X دارند. این در حالی است که تغییر ولتاژ تحریک گرافن، اثر مخربی بر سایر پارامترهای آنتن ندارد.

ساختار پیشنهادی سوم یک کاهنده سطح مقطع راداری با فرکانس کاری قابل تنظیم می‌باشد. ایده اصلی در طراحی، تغییر فرکانس ساختار پهن‌بند با تغییر امپدانس سلول‌های AMC می‌باشد. این امر با استفاده از قابلیت تنظیم‌پذیری رسانایی گرافن با استفاده از بایاس الکتریکی محقق شده است. با استفاده از سه سطح ولتاژ بایاس می‌توان در سه پهنای باند مختلف مقدار RCS را بین 3.87-27.16 GHz به کمتر از -10dB کاهش داد.

در چهارمین طرح پیشنهادی با استفاده از گرافن به عنوان زیرلایه ثانویه، ساختاری فوق پهن باند به منظور کاهش RCS معرفی ارائه شده است که قابلیت کاهش RCS در پهنای باند 0-60 GHz را به مقدار حداقل 8dB- را دارد. هر دو ساختار کاهنده سطح مقطع راداری به گونه‌ای هستند که نسبت به زاویه موج برخوردی حساس نمی‌باشند و در هر دو مد انتشاری TE و TM به‌طور یکسان و صحیح عمل می‌کند.

## کلمات کلیدی

گرافن، کاهش سطح مقطع راداری، تنظیم‌پذیر، هادی مغناطیس مصنوعی، پهن باند، آنتن ریزنواری، قطبش خطی، قطبش دایروی.



## لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

افسانه صدیقی و جواد قالیبافان " کاربرد نوار گرافنی جهت طراحی آنتن چاپی با قطبش قابل تنظیم

در باند X"، مجله صنایع الکترونیک (ارسال شده)

A. Sedighi, V. Aimdi and J.Ghalibafan “ Frequency Tunable Radar Cross Section Reduction Based on Graphene Surface” International Journal of Microwave and Wireless Technology (Submit)



## فهرست مطالب

۱.....	فصل اول آشنایی با گرافن
۲.....	۱-۱ مقدمه
۲.....	۲-۱ تاریخچه و ساختار گرافن
۴.....	۳-۱ خصوصیات گرافن
۵.....	۴-۱ رسانایی سطحی گرافن
۸.....	۵-۱ صفحه مختصات گرافن
۱۰.....	۶-۱ انتخاب زیر لایه جهت تولید گرافن
۱۱.....	۷-۱ دی الکتریک گیت جهت بایاس گرافن
۱۲.....	۸-۱ روش‌های تولید گرافن
۱۲.....	۱-۸-۱ ورقه ورقه سازی مکانیکی (Mechanical exfoliation)
۱۳.....	۲-۸-۱ ورقه ورقه سازی فاز مایع (Liquid-phase exfoliation)
۱۴.....	۳-۸-۱ رشد هم بافته (Epitaxial growth)
۱۵.....	۴-۸-۱ رسوب بخار شیمیایی (Chemical vapor deposition (CVD))
۱۷.....	۹-۱ روش انتقال گرافن به زیر لایه
۱۹.....	فصل دوم کاربردهای گرافن در حوزه مخابرات - میدان



- ۱-۲ مقدمه ..... ۲۰
- ۲-۲ افزایش پهنای باند با استفاده از گرافن ..... ۲۲
- ۱-۲-۲ ترا هرتز ..... ۲۲
- ۲-۲-۲ ماکروویو ..... ۲۳
- ۳-۲ کاهش کوپلینگ متقابل ..... ۲۴
- ۱-۳-۲ سطوح کاهش میزان کوپلینگ متقابل ..... ۲۴
- ۲-۳-۲ آنتن پوش جهت کاهش کوپلینگ متقابل ..... ۲۵
- ۴-۲ تنظیم جهت پرتو ..... ۲۶
- ۱-۴-۲ سوئیچ پرتو در آرایه بازتابی ..... ۲۷
- ۲-۴-۲ پوشش بیم الکترونیکی آنتن موج نشستی ..... ۲۷
- ۵-۲ شکل دهی پرتو آنتن ..... ۲۹
- ۱-۵-۲ شکل دهی پرتو با فراسطوح ..... ۲۹
- ۲-۵-۲ شکل دهی پرتو با استفاده از روکش ..... ۳۰
- ۶-۲ تنظیم پلاریزاسیون آنتن ..... ۳۲
- ۷-۲ ساخت رزوناتور ..... ۳۲
- ۸-۲ ساخت مدولاتورهای سریع ..... ۳۳
- ۹-۲ فشرده سازی ..... ۳۴
- ۱۰-۲ تنظیم میزان تضعیف در تضعیف کننده ها ..... ۳۵



- ۱۱-۲ کاهش هزینه آنتن‌های کاربردی ارتباطات بیسیم..... ۳۶
- ۱۲-۲ ساخت جاذب‌های انعطاف و تطبیق‌پذیر..... ۳۷
- ۱۳-۲ تنظیم فرکانس..... ۳۷
- ۱-۱۳-۲ تنظیم فرکانس با استفاده از سطح امپدانسی..... ۳۷
- ۲-۱۳-۲ تنظیم فرکانس با استفاده از پلاریتون پلاسمون‌های سطحی..... ۳۹
- فصل سوم آنتن ریزنواری باقابلیت تنظیم پلاریزاسیون بر پایه گرافن..... ۴۱**
- ۱-۳ مقدمه..... ۴۲
- ۲-۳ راهکارهای موجود جهت طراحی آنتن‌های چند پلاریزه..... ۴۳
- ۳-۳ راهکارهای بررسی‌شده جهت طراحی آنتن‌های چند پلاریزه..... ۴۴
- ۴-۳ ویژگی‌های آنتن طراحی‌شده..... ۵۵
- فصل چهارم کاهنده سطح مقطع راداری گرافنی باقابلیت تنظیم فرکانس..... ۵۷**
- ۱-۴ مقدمه..... ۵۸
- ۲-۴ طراحی کاهش سطح RCS قابل تنظیم و نتایج شبیه‌سازی‌شده..... ۶۰
- ۳-۴ ویژگی‌های ساختار پیشنهادی..... ۶۵
- فصل پنجم کاهنده سطح مقطع راداری گرافنی فوق پهن باند..... ۶۷**
- ۱-۵ مقدمه..... ۶۸
- ۲-۵ ساختار کاهنده RCS فوق پهن باند..... ۶۸





۳-۵ ویژگی‌های ساختار پیشنهادی ..... ۷۰

مراجع ..... ۷۱



## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ ساختار گرافن [۱] ..... ۳
- شکل ۲-۱ ساختار فیزیکی برای اعمال ولتاژ بایاس گرافن در تجهیزات مخابراتی ..... ۷
- شکل ۳-۱ امیدانس سطحی گرافن به ازای ضریب پتانسیل ۰/۳ الکترون‌ولت، دمای ۳۰۰ درجه کلین و زمان استراحت ۱ پیکوثانیه ..... ۸
- شکل ۴-۱ شکل صفحه‌ی مختصات دکارتی؛ بردارهای یک‌ه‌ی  $\hat{i}$  و  $\hat{j}$  هم‌اندازه و بر یکدیگر عمود هستند [۵] ..... ۹
- شکل ۵-۱ بردارهای یک‌ه‌ی  $\hat{i}$  و  $\hat{j}$  در صفحه‌ی مختصات گرافنی ..... ۱۰
- شکل ۶-۱ گرافن ۲ لایه بر روی زیر لایه  $\text{SiO}_2$  (ب) گرافن چندلایه بر روی زیر لایه  $\text{SiO}_2$  [۶] ..... ۱۱
- شکل ۷-۱ ارتباط گرافن تولیدشده به روش رشد هم بافته و زیر لایه  $\text{SiC}$  [۶] ..... ۱۵
- شکل ۸-۱ تولید قطعات بزرگ گرافن به روش CVD [۷] ..... ۱۶
- شکل ۹-۱ الف) روش انتقال گرافن تولیدی به روش رشد هم‌بافت (ب) روند استاندارد برای ساخت دستگاه‌های گرافن [۶] ..... ۱۷
- شکل ۱-۲ الف) ساختار پیشنهادی مقاله (ب) تغییرات امیدانس سطحی گرافن با تغییر پتانسیل شیمیایی در فرکانس‌های مختلف [۸] ..... ۲۳
- شکل ۲-۲ الف) جاذب پهن باند پیشنهادی (ب) مدل مداری معادل ساختار جاذب پیشنهادی [۹] ..... ۲۴
- شکل ۳-۲ الف) فراسطح پیشنهادی جهت کاهش کوپلینگ متقابل (ب) تغییرات سطح کوپلینگ در پتانسیل‌های شیمیایی متفاوت [۱۰] ..... ۲۵
- شکل ۴-۲ ساختار پیشنهادی جهت کاهش کوپلینگ متقابل [۱۱] ..... ۲۶



- شکل ۵-۲ ساختار آرایه بازتابی باقابلیت سوئیچ پرتو [۱۲] ..... ۲۷
- شکل ۶-۲ ساختار سطح گرافنی با راکتانس مدوله شده سینوسی که مانند یک آنتن موج نشتی عمل می کند. [۱۳] ..... ۲۸
- شکل ۷-۲ ایجاد راکتانس مدوله شده با اعمال ولتاژ DC به پدهای زیرین لایه گرافن [۱۳] ..... ۲۹
- شکل ۸-۲ ساختار فراسطح با قابلیت شکل دهی پرتو [۱۴] ..... ۳۰
- شکل ۹-۲ ساختار پیشنهادی جهت تنظیم پهنای باند امپدانس و الگوی تشعشی [۱۵] ..... ۳۱
- شکل ۱۰-۲ الف) تغییر الگوی تشعشی ب) تغییر پهنای باند امپدانس با تغییر امپدانس استوانه [۱۵] ..... ۳۲
- شکل ۱۱-۲ آنتن با پلاریزاسیون قابل تنظیم [۱۶] ..... ۳۲
- شکل ۱۲-۲ الف) رزوناتور گرافنی ب) امپدانس ورودی رزوناتور با گرافن و بدون گرافن [۱۷] ..... ۳۳
- شکل ۱۳-۲ مدولاتور سریع با استفاده از گرافن [۱۸] ..... ۳۴
- شکل ۱۴-۲ مقسم توان ۱ به ۹ فشرده سازی شده [۱۹] ..... ۳۵
- شکل ۱۵-۲ تضعیف کننده باقابلیت تنظیم مقدار تضعیف [۲۰] ..... ۳۶
- شکل ۱۶-۲ شکل خطوط انتقال هم صفحه ساخته شده از نقره و گرافن - نمونه های ساخته شده آنتن از نقره و گرافن [۲۱] ..... ۳۶
- شکل ۱۷-۲ جاذب گرافنی باقابلیت انعطاف پذیری و تطبیق پذیری [۲۲] ..... ۳۷
- شکل ۱۸-۲ الف) آنتن باقابلیت تنظیم فرکانس ب) تلفات بازگشتی آنتن به ازای پتانسیل های شیمیایی متفاوت ..... ۳۸
- شکل ۱۹-۲ الگوی تشعشی آنتن در دو فرکانس متفاوت ..... ۳۹

شکل ۲-۲۰	الف) آنتن نواری گرافنی باقابلیت تنظیم فرکانس ب) فرکانس کاری آنتن با توجه به پتانسیل شیمیایی گرافن	۴۰.....
شکل ۳-۱	آنتن‌های پچ با پلاریزاسیون دایروی تک تغذیه	۴۳.....
شکل ۳-۲	آنتن پیشنهادی با پلاریزاسیون دایروی با شکاف در میانه پچ بدون استفاده از گرافن	۴۵.....
شکل ۳-۳	الف) پهناى باند امیدانسی آنتن با پلاریزاسیون دایروی ب) نسبت مد محوری آنتن	۴۶.....
شکل ۳-۴	الف) پهناى باند امیدانسی در دو قطبش خطی و دایروی ب) نسبت محوری در قطبش دایروی	۴۸.....
شکل ۳-۵	آنتن با دو قطبش دایروی چپ‌گرد و خطی	۴۹.....
شکل ۳-۶	الف) پهناى باند امیدانسی آنتن پیشنهادی در دو قطبش خطی و دایروی چپ‌گرد ب) نسبت محوری آنتن در قطبش دایروی چپ‌گرد	۵۰.....
شکل ۳-۷	پترن تشعشعی آنتن در فرکانس ۹/۳۴ GHz الف) قطبش دایروی راست‌گرد ب) قطبش خطی	۵۱.....
شکل ۳-۸	آنتن پیشنهادی با سه قطبش دایروی چپ‌گرد، دایروی راست‌گرد و خطی	۵۲.....
شکل ۳-۹	آنتن پیشنهادی با سه قطبش دایروی چپ‌گرد، دایروی راست‌گرد و خطی با شکاف هوایی	۵۳.....
شکل ۳-۱۰	الف) پهناى باند امیدانسی آنتن پیشنهادی در سه قطبش خطی و دایروی چپ‌گرد و دایروی راست‌گرد ب) مد محوری آنتن در قطبش دایروی چپ‌گرد و دایروی راست‌گرد	۵۴.....
شکل ۳-۱۱	پترن تشعشعی آنتن در فرکانس ۹/۲۲ GHz الف) قطبش دایروی چپ‌گرد ب) قطبش دایروی راست‌گرد	۵۵.....
شکل ۴-۱	سلول‌های AMC-1 و AMC-2 ساختار پیشنهادی	۶۰.....
شکل ۴-۲	ساختار کاهنده RCS پیشنهادی	۶۱.....

- شکل ۳-۴ ساختار با سلول‌های PEC (الف) اختلاف‌فاز دو سلول AMC (ب) کاهش RCS ..... ۶۱
- شکل ۴-۴ (الف) فاز برگشتی AMC-1 و AMC-2 به‌عنوان تابعی از فرکانس ..... ۶۲
- شکل ۵-۴ کاهش RCS ساختار پیشنهادی در برخورد مستقیم الف) ولتاژ بایاس ۰/۱ ولت ب) ولتاژ بایاس ۰/۸ ولت ..... ۶۳
- شکل ۶-۴ کاهش RCS برای زوایای برخورد مختلف در ولتاژ بایاس ۲۵ ولت ..... ۶۴
- شکل ۷-۴ کاهش RCS ساختار در ولتاژ بایاس ۲۵ ولت الف) مد TE ب) مد TM ..... ۶۵
- شکل ۱-۵ ساختار کهنده RCS فوق پهن باند ..... ۶۸
- شکل ۲-۵ کاهش سطح مقطع راداری در ساختار پیشنهادی در ولتاژ بایاس ۰/۱ ولت ..... ۶۹
- شکل ۳-۵ کاهش سطح مقطع راداری در ساختار پیشنهادی در ولتاژ بایاس ۲۵ ولت ..... ۶۹

## فهرست جداول

- جدول ۱-۳ مشخصات زیرلایه گرافن ..... ۴۴
- جدول ۲-۳ ابعاد آنتن پیشنهادی دایروی قطبش دایروی (mm) ..... ۴۵
- جدول ۳-۳ مشخصات گرافن در دو حالت روشن و خاموش ..... ۴۷
- جدول ۴-۳ ابعاد آنتن طراحی شده با دو قطبش خطی و دایروی چپ گرد ..... ۴۹
- جدول ۵-۳ بازه عملکرد آنتن پیشنهادی در شکل ۳-۵ ..... ۵۱
- جدول ۶-۳ بازه عملکرد آنتن پیشنهادی در شکل ۳-۶ ..... ۵۴
- جدول ۱-۴ پهنای باند کاهش RCS برای زوایای برخورد مختلف در ولتاژ بایاس ۲۵ ولت ..... ۶۴



فصل اول

تشیخ و تشخیص

## ۱-۱ مقدمه

در این پژوهش از ویژگی‌های منحصربه‌فرد ماده‌ای نوظهور به نام گرافن<sup>۱</sup> استفاده شده است لذا برای ایجاد تصویری بهتر از این خواص و کاربردها در ابتدا به معرفی ساختار گرافن، چگونگی ظهور، خواص و روش‌های ساخت این ماده می‌پردازیم.

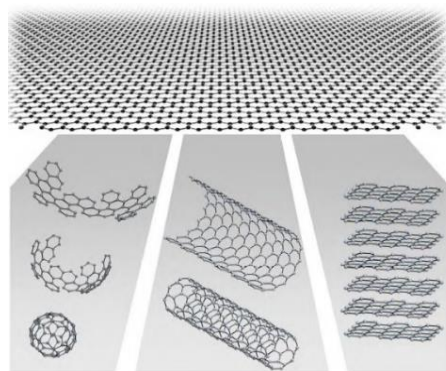
## ۱-۲ تاریخچه و ساختار گرافن

هرچند نخستین بار در سال ۱۹۴۷ فیلیپ والاس درباره گرافن نوشت و سپس از آن زمان تلاش‌های زیادی برای ساخت آن صورت گرفته بود اما قضیه‌ای به نام قضیه مرمین-واگنر در مکانیک آماری و نظریه میدان‌های کوانتومی وجود داشت که ساخت یک ماده دوبعدی را غیرممکن و چنین ماده‌ای را غیر پایدار می‌دانست؛ در سال ۲۰۰۴، آندره گایم و کنستانتین نووسلف، از دانشگاه منچستر موفق به ساخت این ماده شده و نشان دادند که قضیه مرمین-واگنر نمی‌تواند کاملاً درست باشد. جایزه نوبل فیزیک ۲۰۱۰ نیز به خاطر ساخت ماده‌ای دوبعدی به این دو دانشمند تعلق گرفت.[۱]

گرافن نام یکی از آلوتروپ‌های کربن است. این ماده دارای ضخامت یک اتم با ویژگی‌های منحصربه‌فرد است که به دلیل ضخامت کم، این ماده را به‌عنوان باریک‌ترین ماده جهان نیز می‌شناسند. ساختار گرافن در شکل ۱-۱ دیده نشان داده شده است.

---

<sup>۱</sup> Graphene



شکل ۱-۱ ساختار گرافن [۱]

درواقع گرافن اصطلاحی است که به نوارهای بسیار نازکی از تک لایه‌های گرافیت گفته می‌شود. اگر گرافیت را یک دفترچه از صفحات موازی در نظر بگیریم، به هر ورق آن گرافن گفته می‌شود. ساختار الکترونیکی کربن توانایی پیوند در شکل و پیکربندی‌های مختلف با خصوصیات کاملاً متفاوت را ایجاد می‌نماید. همین امر سبب شکل‌گیری گرافیت و الماس که متداول‌ترین اشکال کربن است می‌گردد. الماس زمانی شکل می‌گیرد که ۴ الکترون والانس در یک اتم کربن پیوند دارند و ساختار سه‌بعدی مکعبی الماس شکل می‌گیرد. الماس سخت‌ترین ماده شناخته‌شده توسط بشر به دلیل شبکه سه‌بعدی پیوند کربن-کربن است. این ماده جزوه معدود مواد طبیعی است که از نظر الکتریکی عایق و از نظر حرارتی رساناست. گرافن با یک پیوند کمتر در لایه والانس تنها ۳ پیوند در اتم کربن دارد. این سه پیوند در یک صفحه قرار دارند و زوایای بین آن‌ها با یکدیگر مساوی و برابر با ۱۲۰ درجه و اتم چهارم برای حرکت بین اتم‌ها و یا شناور بودن آزاد است. البته این ایدئال‌ترین حالت یک صفحه‌ی گرافن است. در برخی مواقع، شکل این صفحه به گونه‌ای تغییر می‌کند که در آن پنج‌ضلعی‌ها و هفت‌ضلعی‌هایی نیز ایجاد می‌شود [۲].

## ۱-۳ خصوصیات گرافن

گرافیت شامل پیوندهای کووالانسی قوی بین اتم‌های کربن و صفحات گرافن است به همین دلیل خواص مکانیکی منحصر به فردی دارد؛ مانند الماس گرافیت هم رسانای حرارتی خوبی است و به دلیل الکترون آزاد رسانای الکتریکی بالایی دارد.

با توجه به ساختار منحصر به فرد کریستال دو بعدی گرافن و پیوندهای بسیار قوی کربن این ماده دارای خواص منحصر به فرد مکانیکی، نوری، حرارتی و الکترومغناطیسی است. به دلیل این ویژگی‌های منحصر به فرد این ماده امروزه از آن در بسیاری از علوم جهت کاربردهای مختلف مانند استفاده می‌شود. ویژگی اصلی این ماده رسانایی الکتریکی سطحی قابل تنظیم آن است که به دو قسمت حقیقی و موهومی تقسیم می‌شود. قسمت حقیقی آن معرف امپدانس و قسمت موهومی اندوکتانس گرافن را معرفی می‌کند. تنظیم پذیری رسانایی گرافن توسط یک اهرم بیرونی می‌تواند کاربردهای متعددی را از این ماده در حوزه آنتن فراهم کند. باید توجه داشت در کاربردهای آنتن این اهرم بایاس بیرونی عموماً ولتاژ تحریک dc می‌باشد.

از نظر خواص نوری گرافن می‌توان گفت لایه با ضخامت یک اتم برای چشم غیر مسلح تقریباً نامرئی است زیرا تنها ۲/۳ نور سفید را جذب می‌کند. پاسخ نوری گرافن تا محدوده نیز ادامه دارد به طوری که با اعمال میدان مغناطیسی و جریان الکتریکی برای هر دو ناحیه خطی و فوق سریع خواص آن تغییر کند. اثر نوری دیگر گرافن جذب قابل اشباع در محدوده ترا هرتز و میکروویو است که اثری غیر خطی است و این زمانی اتفاق می‌افتد که شدت نور ورودی از مقدار آستانه تجاوز کند. گرافن ممکن است تحت تحریک شدید اشباع شود.

تاکنون گرافن به صورت دو بعدی با طول ۱۰۰ متر و عرض ۲۳ سانتیمتر توسط شرکت Sony ساخته شده است. همچنین ورق‌های گرافن با اندازه کمتر از ۲۰ نانومتر از لحاظ ترمودینامیکی ناپایدارند. این مبحث در

دینامیک مولکولی سیستم‌ها بسیار مهم است، چون نتایج گرفته‌شده در کمتر از ۲۰ نانومتر می‌تواند درست نباشد [۲].

## ۴-۱ رسانایی سطحی گرافن

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های فلزات و شبه فلزات، رسانایی الکتریکی آن‌ها می‌باشد. از آنجایی که گرافن یک ماده‌ی دوبعدی می‌باشد، فقط رسانایی الکتریکی سطحی برای آن قابل‌بیان می‌باشد. به دلیل این ساختار خاص، می‌توان آن را با تانسور رسانایی سطحی مدل کرد. به استناد مطالب بیان‌شده در مرجع [۳] برای محاسبه‌ی رسانایی سطحی گرافن از رابطه‌ی کوپو استفاده می‌شود. با استفاده از تخمین فاز تصادفی، رسانایی سطحی را می‌توان به دو قسمت درون باندی و میان باندی تقسیم کرد. روابط ۱-۱ تا ۴-۱ رسانایی سطحی گرافن را نشان می‌دهد.

$$\sigma_{graphene} = \sigma_{intra} + \sigma_{inter} \quad (1-1)$$

$$\sigma_{inter} \cong \frac{j q^2}{4\pi\hbar} \ln\left(\frac{2|\mu_c| - \omega\hbar}{2|\mu_c| + \omega\hbar}\right) \quad (2-1)$$

$$\sigma_{intra} = j \frac{q^2 K_B T}{\pi\hbar^2 (\omega + j\tau^{-1})} \left[ \frac{\mu_c}{K_B T} + 2 \ln\left(e^{-\frac{\mu_c}{K_B T}} + 1\right) \right] \quad (3-1)$$

$\omega = 2\pi f$  و  $f$  فرکانس کار

$\mu_c$ : ضریب پتانسیل شیمیایی

$\hbar$ : ثابت کاهش‌یافته پلانک

$q$ : بار الکترون

$T$ : دمای محیط بر حسب کلونین

$k_B$ : ثابت بولتزمن

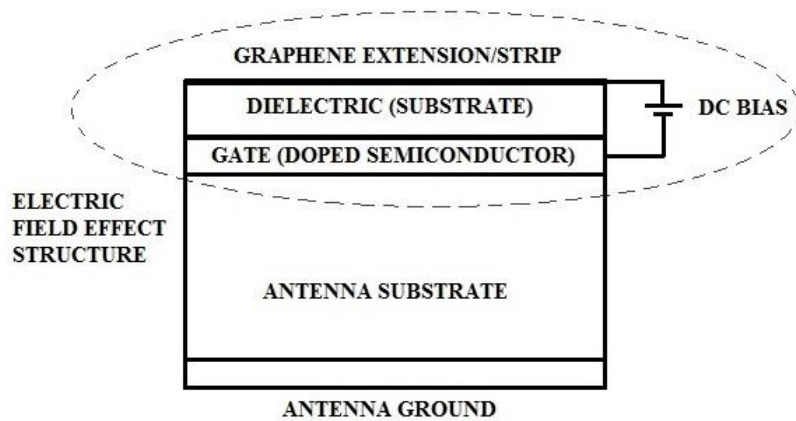
$\tau$ : زمان استراحت موج<sup>۲</sup>

با توجه به این فرمول‌ها، رسانایی الکتریکی گرافن به فرکانس ( $f$ )، ضریب پتانسیل شیمیایی ( $\mu_c$ )، دمای محیط ( $T$ ) و زمان استراحت ( $\tau$ ) وابسته می‌باشد. با توجه به این عوامل، معمولاً نتایج حاصل از تحلیل یا طراحی‌ها را با ثابت گرفتن سه عامل و تغییر دادن عامل چهارم بیان می‌کنند.

در محدوده فرکانسی ماکروویو مقدار  $\sigma_{inter}$  در برابر  $\sigma_{intra}$  قابل چشم‌پوشی است لذا در باند ماکروویو می‌توان رسانایی سطحی گرافن را به صورت فرمول (۱-۲) در نظر گرفت. در کاربردهای الکترونیکی عموماً پارامتر دمای محیط ثابت در نظر گرفته می‌شود. زمان استراحت گرافن طی فرآیند ساخت گرافن تعیین می‌گردد و پس از تولید گرافن به‌طور پویا قابل تغییر نیست. لذا پارامترهای فرکانس و پتانسیل شیمیایی به دلیل تنظیم‌پذیری پویای آن‌ها برای تحقیقات و کاربردهای الکترونیکی بسیار حائز اهمیت می‌باشند. لذا در اینجا به ذکر ارتباط میان پارامترهای قابل تنظیم با رسانایی سطحی و به تبع آن امپدانس سطحی گرافن می‌پردازیم. ساختار فیزیکی گرافن در کاربردهایی که هدف تغییر پتانسیل شیمیایی است در شکل (۱-۲) نمایش داده شده است. [۴]

---

<sup>2</sup> Relax time



شکل ۲-۱ ساختار فیزیکی برای اعمال ولتاژ بایاس گرافن در تجهیزات مخابراتی

پتانسیل شیمیایی گرافن به صورت فرمول ۴-۱ تا ۵-۱ می باشد.

$$\mu_c ; hv_f \sqrt{n\pi} \quad (۴-۱)$$

$$n = \frac{\epsilon\epsilon_0 V_b}{dq} \quad (۵-۱)$$

$v_f$ : سرعت فرمی ( $1 \times 10^6 (m/s)$ )

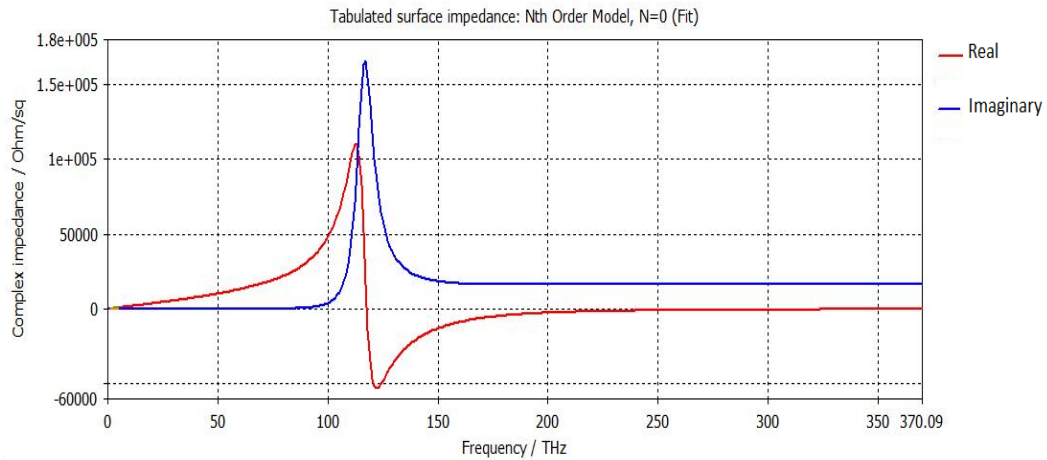
$n$ : چگالی حامل ( $m^{-2}$ )

$V_b$ : ولتاژ بایاس (V)

$d$ : ضخامت زیر لایه گرافن (m)

$\epsilon$ : گذردهی نسبی زیر لایه جداکننده گرافن و گیت

با توجه به روابط فوق با تغییر ولتاژ بایاس گرافن می توان پتانسیل شیمیایی و به تبع آن رسانایی سطحی گرافن را تغییر داد. در شکل (۳-۱) تغییر امپدانس سطحی گرافن بر اساس فرکانس را نشان می دهد که در نرم افزار CST رسم شده است.

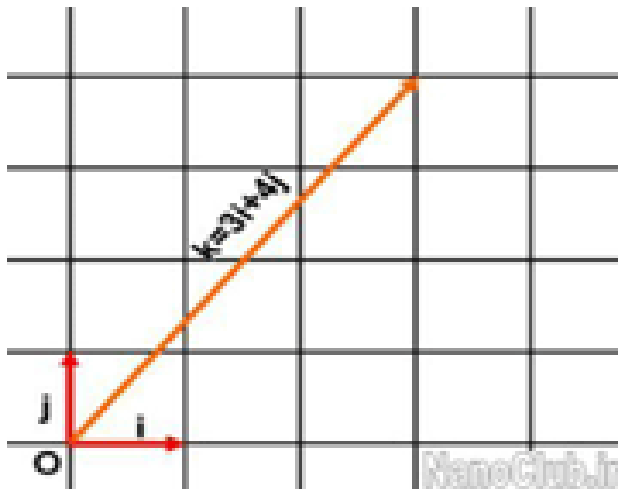


شکل ۳-۱ امپدانس سطحی گرافن به ازای ضریب پتانسیل ۰/۳ الکترونولت، دمای ۳۰۰ درجه کلین و زمان استراحت ۱ پیکوثانیه.

## ۵-۱ صفحه مختصات گرافن

در صفحه مختصات کارتیزین یا دکارتی دو بردار یکه‌ی  $i$  و  $j$  هر یک به طول یک واحد وجود دارد که توسط آن‌ها می توان از نقطه‌ی مبدأ به هر نقطه‌ی دیگری مثل  $(m, n)$  رفت. این کار با تعریف یک بردار به شکل  $k=mi+nj$  امکان پذیر می گردد (شکل ۴-۱) [۵].

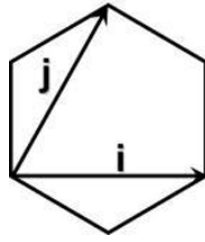




شکل ۱-۴ صفحه‌ی مختصات دکارتی؛ بردارهای یک‌ه‌ی  $i$  و  $j$  هم‌اندازه و بر یکدیگر عمود هستند. [۵]

دستگاه مختصات کارتزین، یک دستگاه دویبعی است که در آن دو بردار یک‌ه‌ی یادشده، هم‌اندازه بوده و بر یکدیگر عمود هستند؛ اما باید توجه داشت که تمام دستگاه‌های مختصات به این شکل نیستند. بلکه می‌توان دستگاه‌هایی را تعریف کرد که در آن اندازه‌ی بردارهای یک‌ه‌ی ناهم‌اندازه و زاویه‌ی بین آن دو مقدار دیگری باشد مانند صفحه‌ی مختصات گرافن. صفحه‌ی مختصات گرافن یک صفحه‌ی دویبعی متشکل از شش ضلعی‌های منتظم می‌باشد. این صفحه یادآور شکل منظم کندوی زنبورهای عسل است.

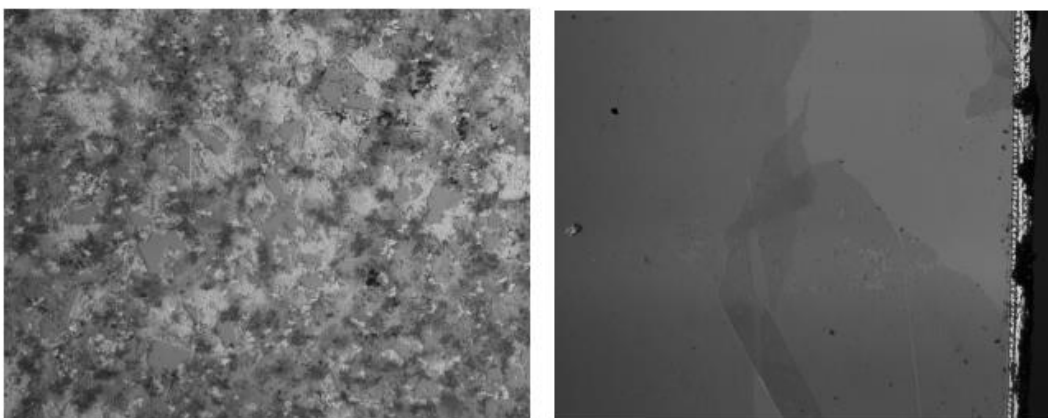
در این صفحه‌ی مختصات دویبعی، دو بردار یک‌ه‌ی هم‌اندازه‌ی  $i$  و  $j$  به طوری که در تصویر (۱-۵) نشان داده شده است، تعریف می‌شود. زاویه‌ی بین این دو بردار برابر با  $60^\circ$  درجه است. برای حرکت روی این صفحه می‌توان بردار  $C=mi+nj$  را تعریف نمود. این بردار را بردار کایرال می‌نامند. هم‌چنین می‌توان زاویه‌ی بین بردار کایرال و محور متناظر با بردار یک‌ه‌ی  $i$  را به عنوان زاویه کایرال که مشخصه‌ی راستای بردار کایرال است در نظر گرفت. این زاویه یکی از مشخصه‌های نانولوله‌های کربنی می‌باشد.



شکل ۱-۵ بردارهای یک‌ه‌ی  $i$  و  $j$  در صفحه‌ی مختصات گرافنی.

## ۱-۶ انتخاب زیرلایه جهت تولید گرافن

انتخاب زیر لایه به دلیل تأثیر در عملکرد قطعه گرافن مهم است. معمولاً زیر لایه  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  استفاده می‌شود ولی ناهمواری‌های سطح و حفره‌های بار، چگالی الکترون در لایه گرافن روی آن را کاهش می‌دهد این کاهش چگالی حامل‌های گرافن روی  $\text{SiO}_2$  که به وسیله برهمکنش فوتون‌ها محدود می‌شود. نیروی کششی بالای گرافن اجازه می‌دهد یک تجهیز بین دو اتصال فلزی معلق باشد. تجهیزات معلق برای کاربردهای حس‌گر جهت بهبود نسبت سیگنال به نویز به کار می‌رود. بافت‌شناسی گرافن تحت تأثیر بستر زیرین آن قرار دارد. گرافن طبیعی تمایل به تکرار بافت چین‌دار زیر لایه  $\text{SiO}_2$  پشتیبان دارد اما وجود فتورزیست‌های باقی‌مانده چین‌های دیگری در ورق گرافن ایجاد می‌کند که مستقل از زیر لایه است. نمونه گرافن دو و چندلایه بر روی زیر لایه  $\text{SiO}_2$  در شکل (۱-۶) نشان داده شده است.



ب

الف

شکل ۱-۶ الف) گرافن ۲ لایه بر روی زیر لایه  $\text{SiO}_2$  ب) گرافن چندلایه بر روی زیر لایه  $\text{SiO}_2$  [۶]

نیتريت بورن شش ضلعي  $^3$  (h-BN) يك ساختار متناوب گرافن است كه نيتروژن و بورن در سلول واحد جايگزين دو اتم كربن شده‌اند. لذا به‌طور خودكار صاف است و بنابراین چين خوردگي لايه گرافن روی قسمت بالایی وجود ندارد. چگالی حامل گرافن لایه نشانی شده بر روی h-BN حدود سه برابر در مقایسه با زیر لایه  $\text{SiO}_2$  بیشتر است [۶].

## ۱-۲ دی‌الکتريک گیت جهت میاس گرافن

يك تجهيز ترانزیستور اثر میدان  $^4$  برلی اعمال ولتاژ بایاس نیاز به دی‌الکتريک بين نیمه‌هادی و اتصال فلزی دارد. به‌طور مشابه برای ایزوله نمودن زیر لایه‌ها، يك انتخاب ضعيف برای دی‌الکتريک می‌تواند چگالی حامل‌ها را در تجهيز گرافن کاهش دهد.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  به‌عنوان دی‌الکتريک گیت بالایی در FET های گرافن

<sup>3</sup> Hexagonal boron nitride

<sup>4</sup> Field Effect Transistor

استفاده می‌شود. h-BN در ساختارهای ساندویچ که گرافن بین دو لایه h-BN قرار می‌گیرد استفاده می‌شود [۶].

## ۱-۸ روش‌های تولید گرافن

روش‌های متنوع زیادی به منظور تهیه نمونه‌های گرافن و نانولوله‌های کربنی به کار برده می‌شود که در نتیجه آن بازه بسیار وسیعی از مواد با عنوان گرافن و نانولوله‌های کربنی تولید می‌گردد. لذا دانستن روش‌های متفاوت سنتز برای درک چرایی تفاوت خصوصیات نمونه‌های مختلف گرافن و اینکه کدام روش سنتز می‌تواند نمونه مناسب برای آزمایش و کاربرد مورد نظر را تولید نماید. روند پس رشد گرافن نیز به طور مختصر در این فصل توضیح داده می‌شود. در عمل ما توصیف می‌کنیم که چگونه پس از رشد گرافن را به زیر لایه‌های مختلف منتقل می‌نماییم [۷].

### ۱-۸-۱ ورقه‌سازی مکانیکی (Mechanical exfoliation)

روش تورق مکانیکی یا "نوار اسکاچ" اولین بار برای تفکیک گرافن تک لایه، دولایه و چندلایه در سال ۲۰۰۴ استفاده شد. این روش از ضعف پیوند واندروالسی بین لایه‌های اتمی ورقه‌های گرافیت استفاده می‌کند. یک کریستال گرافیت چندین مرتبه به وسیله نوار چسب پوسته برداری می‌شود تا زمانی که تکه‌های کوچک گرافیت تک لایه، دولایه و چندلایه چسبیده به نوار باقی بماند. سپس نوار چسب با تکه‌های چسبیده به آن را برخلاف جهت زیر لایه فشار می‌دهیم و برمی‌داریم. در برخی حالات کریستال‌های گرافن باقی مانده که به زیر لایه چسبیده‌اند با تعداد بسیار زیادی گرافن چندلایه و کریستال گرافیت همراه‌اند. برای اجتناب از ایجاد آلودگی روی سطح گرافن باید نوار چسب مورد استفاده به طور مناسب و علمی تمیز گردد.

تکه‌های گرافن تک لایه تولیدشده با این روش فقط قسمت کوچکی از زیر لایه را اشغال می‌کند و با تعداد بسیار زیادی قطعه‌های گرافن دولایه و چندلایه و کریستال گرافیت نازک مخلوط می‌گردد؛ بنابراین داشتن روشی برای پیدا کردن قطعات گرافن تک لایه ضروری است. متداول‌ترین روش ساده‌ترین روش نیز هست. در این روش از زیر لایه سیلیکونی به‌عنوان بستر با یک‌لایه به ضخامت ۳۰۰ یا ۹۰ نانومتر از  $\text{SiO}_2$  که بر روی آن حرارت داده‌شده است استفاده می‌گردد.

این روش اجازه می‌دهد حتی یک قطعه گرافن تک لایه با چشم غیرمسلح در یک میکروسکوپ الکترونی به دلیل تغییر کوچکی در ضریب شکست مسیر طی شده توسط نور قابل‌رؤیت گردد. حتی تغییری بسیار کوچک در ضخامت لایه  $\text{SiO}_2$  از ۳۰۰ به ۳۱۵ نانومتر می‌تواند سبب نامرئی شدن گرافن گردد. سریع‌ترین و قابل‌اطمینان‌ترین روش برای بررسی مناسب بودن ضخامت لایه اکسید از طریق رنگ آن است زیرا رنگ به‌عنوان تابعی از ضخامت به‌سرعت تغییر می‌کند. یک‌لایه ۳۰۰ نانومتری رنگ بنفش صورتی دارد. بازده و زمان موردنیاز برای شناسایی نمونه‌های گرافن این اطمینان را به ما می‌دهد که این فن برای تولید تجاری نمونه‌های گرافن کاملاً نامناسب است.

## ۱-۸-۲ ورقه‌سازی فاز مایع (Liquid-phase exfoliation)

روش تورق مکانیکی نمونه‌های بسیار کوچک گرافن تک لایه با کیفیت بالا را به همراه تعداد زیادی گرافن چندلایه و کریستال گرافیت تولید می‌نماید که برای مصارف تجاری مناسب نیست. در روش تورق فاز مایع توسعه‌یافته روش تورق مکانیکی است. این روش شامل غوطه‌ور ساختن ورق‌های گرافیت در حلال و قرار دادن سوسپانسیون حاصل در است تا به‌سادگی با گرافیت تکه‌تکه و به ورق‌های گرافن تبدیل شود.

این فن اولین بار در سال ۲۰۰۸ گزارش شد. با این روش تعداد بسیار بیشتر و بزرگ‌تری نسبت به روش تورق مکانیکی می‌توان تولید نمود.

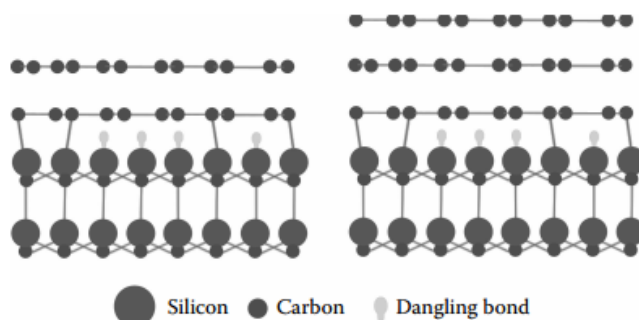
### ۱-۸-۳ رشد هم‌بافته (Epitaxial growth)

زیر لایه اصلی مورد استفاده برای رشد هم‌بافته گرافن کربید سیلیکون است که از سال ۲۰۰۶ برای رشد هم‌بافته گرافن تک لایه و از سال ۲۰۰۴ برای رشد هم‌بافته گرافن چندلایه به کار می‌رود. رشد هم‌بافته گرافن به‌طور معمول بر روی صفحه سیلیکونی از جنس 6H-SiC با حرارت دهی تحت خلأ یا آرگون در دمای ۱۲۵۰ تا ۲۰۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود. حرارت دهی در فشار محیط تحت گاز آرگون از دستاوردهای اخیر در سال ۲۰۰۸ است که سبب افزایش مهمی در اندازه دانه‌های ورق گرافن شده است.

در هر دو حالت گرافن از اتم‌های کربنی که از لایه بالایی SiC زمانی که در دمای بالا تجزیه می‌شود حاصل می‌گردد رشد می‌یابد. اتم‌های سیلیکون طی فرآیند تصعید در اتمسفر محو می‌شوند و اتم‌های کربن برای تشکیل گرافن آزادند. رشد خود می‌تواند محدودکننده باشد و زمانی که لایه گرافن شکل می‌گیرد تصعید سیلیکون اتفاق نیافتد. رشد هم‌بافته گرافن بر روی کربید بورن نیز قابل‌دستیابی است. در این حالت به دلیل اندازه مشابه اتم‌های کربن و بور، گرافن به‌شدت با اتم‌های کربن لایه نشانی می‌شود.

کیفیت کریستال برای نمونه‌های گرافن بهترین رشد هم‌بافته حقیقتاً بسیار بالاست. در رشد هم‌بافته لایه گرافن با زیر لایه به‌شدت در واکنش است. چرخش گرافن با چرخش زیر لایه تعیین می‌شود؛ و زیر لایه حتی می‌تواند سبب ظهور چندلایگی در گرافن شود و متعاقباً نشان داده شده است که گرافن تولیدی توسط رشد هم‌بافته بر روی SiC تحت فشار کششی بسیار زیادی هستند. طیف‌نگاری رامان نشان می‌دهد که فشار کششی هم صفحه در گرافن تولیدی با این شیوه برابر با چند گیگا پاسکال فشار هیدرو استاتیک است. قیمت بالای SiC یکی دیگر از موانع استفاده تجاری از این روش است. به همین دلیل علی‌رغم نتایج اولیه

امیدبخش به دست آمده اکنون فن رسوب بخارهای شیمیایی به صورت وسیع جهت رشد گرافن در ابعاد بزرگ استفاده می‌گردد. ارتباط بین گرافن رشد یافته و زیر لایه SiC در شکل (۷-۱) نشان داده شده است.



شکل ۷-۱ ارتباط گرافن تولیدشده به روش رشد هم بافته و زیر لایه SiC [۶]

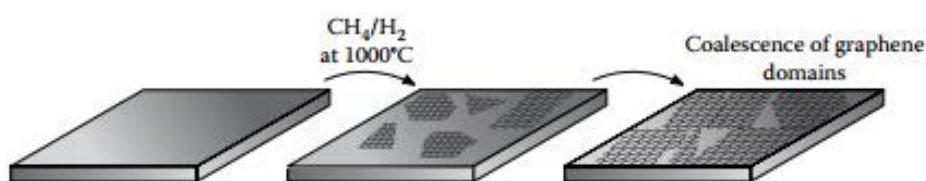
## ۱-۸-۴ رسوب بخار شیمیایی (Chemical vapor deposition (CVD))

ثابت شده است که روش رشد گرافن مناسب برای کاربردهای تجاری رسوب بخار شیمیایی بر روی زیر لایه فلزی موقت است. گازهای پیشگام و روش‌های تجربی به کار برده می‌شود اما متداول‌ترین روش CVD خلأ در دمای تقریبی ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد با متان به عنوان گاز پیشگام و هیدروژن انجام می‌گردد. این فرایند کاتالیزوری است زیرا زیر لایه فلزی واسط تجزیه گاز پیشگام برای تولید کربن شکل‌دهنده لایه گرافن را تسریع می‌کند.

مس متداول‌ترین زیر لایه مورد استفاده است، نیکل، کبالت، رودنیوم، پالا دیوم، رنیوم، ایریدیوم و پلاتینیم نیز به کار می‌روند. در برخی موارد شبکه لانه‌زنبوری گرافن رشد یافته CVD متناسب با زیر لایه است در حالی که معمولاً در رشد هم‌بافت مشاهده نمی‌شود در مواردی که رشد بر روی سطح کبالت و نیکل صورت می‌گیرد شبکه‌های زیر لایه و گرافن متناسب‌اند در حالی که رودنیوم، پالا دیوم، ایریدیوم و پلاتینیم

شبکه‌ها متناسب نیستند. کیفیت کریستال گرافن تولیدی با روش CVD از کمتر از روش تورق مکانیکی است دو توضیح برای این وجود دارد.

**اول:** زمانی که متان به رآکتور وارد می‌شود روند رشد به‌طور هم‌زمان در محل‌های گوناگون بر روی زیر لایه شروع می‌شود لذا نمونه گرافن مانند شکل (۸-۱) شامل تعداد زیادی کریستال کوچک به‌جای یک کریستال بزرگ است.



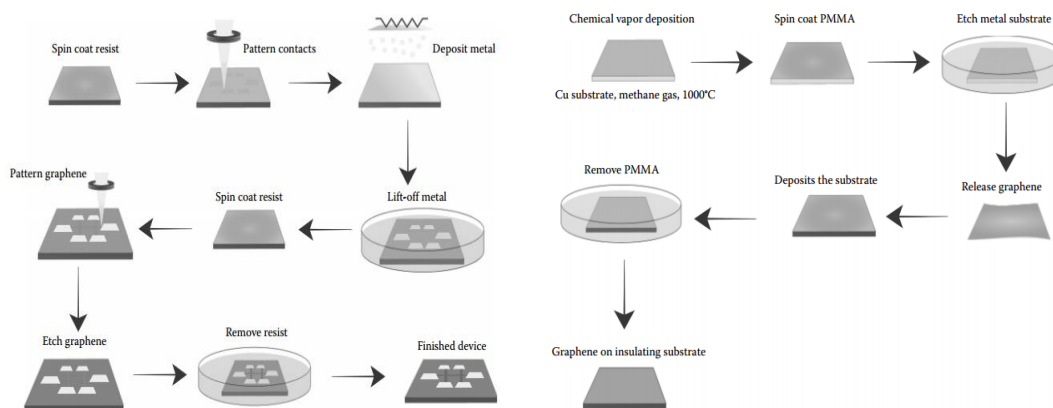
شکل ۸-۱ تولید قطعات بزرگ گرافن به روش CVD [۷]

دوم: دمای رشد نسبتاً پایین است. رشد معمولاً در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد صورت می‌گیرد درحالی‌که HOPG و گرافیت طبیعی به‌عنوان مواد شروع‌کننده روند تورق فاز مایع و مکانیکی با دمای بالای ۲۰۰۰ درجه سانتی‌گراد در کارخانه یا مرکز زمین تولید می‌شوند. متأسفانه زمانی که از مس استفاده می‌شود دمای رشد بالا سبب ذوب شدن زیر لایه می‌شود. علی‌رغم این محدودیت‌ها اثر هال در نمونه‌های رشد یافته بر روی مس و نیکل دیده شده است. کیفیت گرافن تولیدی بری کاربردهای الکترونیک به اندازه کافی مناسب است و اندازه دانه‌های گرافن معمولاً ۱۰۰ میکرومتر است و یک کریستال گرافن تک می‌تواند در امتداد مرزهای قطعه بر روی زیر لایه رشد کند.



## ۹-۱ روش انتقال گرافن به زیر لایه

معمولاً داشتن نمونه گرافن بر روی زیر لایه طراحی شده برای کاربرد یا آزمایشی خاص ضروری است. خوشبختانه انتقال گرافن به زیر لایه‌های مختلف نسبتاً ساده است. متداول‌ترین روند برای انتقال گرافن این است که نمونه گرافن را در یک لایه نازک پلی متیل متاکریلات پوشش دهیم. زیر لایه اصلی بعداً جدا می‌شود. تعداد زیادی واکنش‌دهنده وجود دارند که می‌توانند این کار را انجام دهند در حالی که گرافن و PMMA سالم بمانند برای مثال هیدروکسید پتاسیم می‌تواند زیر لایه  $\text{SiO}_2$  را در این روند جدا نماید. سپس PMMA و گرافن متصل به آن بر روی زیر لایه جدید جای می‌گیرند و در مرحله بعد PMMA با حل شدن در استون جدا می‌شود. این روند می‌تواند برای نمونه‌های تولید شده بر روی  $\text{SiO}_2$  به روش تورق مکانیکی و یا بر روی مس به روش CVD انجام شود. روند انتقال گرافن به زیر لایه موردنظر در شکل (۹-۱) دیده می‌شود.



ب

الف

شکل ۹-۱ الف) روش انتقال گرافن تولیدی به روش رشد هم‌بافت ب) روند استاندارد برای ساخت دستگاه‌های

گرافن [۶]

با توجه به مطالب ذکر شده ابتدا زیر لایه مناسب جهت تولید گرافن با توجه به کاربرد و پارامترهای موردنظر را انتخاب نموده سپس با استفاده از روش انتقال ذکر شده گرافن را طبق الگوی طراحی شده بر روی زیر لایه نهایی منتقل می‌نماییم [۶].

# فصل دوم

کاربردهای کرفشرد در حوزه مخابرات -

میل

## ۲-۱ مقدمه

در فصل پیشین به معرفی و بررسی خصوصیات گرافن و روش‌های تولید و انتقال آن بر روی زیر لایه طراحی شده پرداختیم. خواص و ویژگی‌های منحصر به فرد این ماده نوظهور توجه محققان علوم گوناگون را به خود جلب کرده است. حوزه مخابرات با توجه به اینکه از به‌روزترین حوزه‌های علمی-صنعتی است در این امر جزو پیشتازان است به طوری که از زمان ساخت اولین نمونه گرافن تاکنون تحقیقات بسیاری در زمینه کاربرد گرافن در حوزه مخابرات صورت گرفته است. با توجه به حجم تحقیقات صورت گرفته برخی از مهم‌ترین و واضح‌ترین این کاربردها در این فصل به اختصار بررسی خواهد شد. با توجه به مشخصات گرافن متفاوت گرافن در محدوده‌های فرکانسی مختلف به طور کلی کاربرد گرافن در دو بازه فرکانسی متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است:

**تراهرتز:** به دو دلیل مطالعات زیادی در این حوزه بر روی گرافن صورت گرفته است که به شرح زیر می‌باشد.

➤ رسانایی سطحی گرافن و به تبع آن امپدانس گرافن در این بازه فرکانسی دارای دو بخش راکتانسی و امپدانس است که با حساسیت بالا قابل کنترل می‌باشد و در واقع گرافن مانند نیمه‌هادی عمل می‌نماید. در بسیاری از کاربردها از این ویژگی برای ایجاد تغییرپذیری الگوی تشعشعی و تنظیم فرکانس تشدید آنتن، کنترل پرتوی آنتن، کنترل فاز موج بازتابی، تنظیم توان بازتابی استفاده می‌گردد.

➤ وجود پلاریتون پلاسمون های سطحی ۵ در این باند که می توان از آن جهت کوچک سازی آنتن باقابلیت کنترل پذیری الکتریکی، کنترل موقعیت پرتوی آنتن و بسیاری از کاربردهای دیگر استفاده نمود. پلاریتون پلاسمون های سطحی تحریک های الکترومغناطیسی هستند که به الکترون های آزاد جمع شونده و نوسان کننده سطحی در فلزات تزویج می شوند تا بتوانند به طور طولی در سطح تقاطع فلز دی الکتریک انتشار یابند. البته پرتو الکترومغناطیسی تابیده شده باید دارای شرایطی باشد: از جمله طوری تابانده شود که بازتاب داخلی کامل ایجاد شود و دارای قطبش طولی (P-Polarized) باشد.

علت حائز اهمیت بودن پلاسمون پلاریتون های سطحی توانایی آن ها در تمرکز دادن میدان الکترومغناطیسی است که حد پراکندگی آن ها در موج های اپتیکی نانومتری کاهش می دهد و گسترش میدان های موضعی را تا چندین مرتبه بزرگی بهبود می دهد؛ و باعث می شود مدهای انتشاری پلاسمون پلاریتون های سطحی (میدان الکتریکی عرضی (TE) یا میدان مغناطیسی عرضی (TM)) در صفحات عمود بر جهت انتشار محصور شوند.

**ماکروویو:** با توجه به مقدار ناچیز راکتانس گرافن در این بازه فرکانسی، گرافن رفتاری شبیه فلز نشان می دهد؛ لذا کاربرد آن به عنوان سطح امپدانس قابل کنترل جهت تغییر فرکانس تشدید، افزایش پهنای باند امپدانس، تنظیم تطبیق امپدانس و پارامترهای تشعشی و پهنای بین قابل تنظیم بررسی گردیده است.

---

<sup>5</sup> Surface Plasmon Polariton

به‌طور کلی در کاربردهای آنتنی از گرافن به‌عنوان عنصر پارازیتیک (به شکل سطوح امپدانس بالا<sup>۶</sup>) و یا فلز تشعشی به‌منظور ایجاد دو فرکانس تشدید مستقل، افزایش پهنای باند، تنظیم‌پذیری الگوی تشعشی آنتن، بهبود تطبیق، کاهش اثر کوپلینگ متقابل، افزایش بهره و تبدیل قطبش استفاده می‌شود.

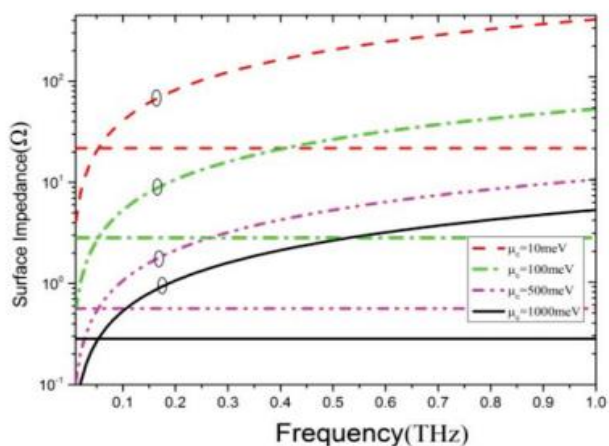
## ۲-۲ افزایش پهنای باند با استفاده از گرافن

### ۲-۲-۱ تراهرتز

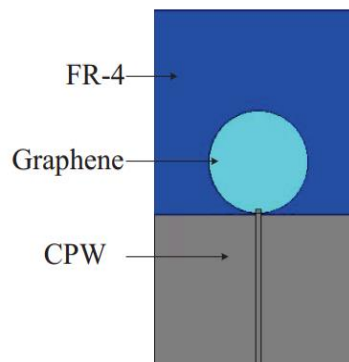
کاربرد گرافن در آنتن‌ها به‌عنوان فلز تشعشی سبب تلفات بالا و در نتیجه بهره تشعشی نامناسب می‌گردد. در آنتن نشان داده‌شده در شکل (۱-۲) با استفاده از ویژگی امپدانس گرافن در فرکانس‌های تراهرتز در قسمت تغذیه و تشعشع‌کننده ساختار پیشنهادی بهره تشعشی و پهنای باند آنتن به مقدار قابل توجهی بهبود یافته است. قسمت تشعشی آنتن که گرافن است و توسط یک خط انتقال هم‌صفحه<sup>۷</sup> تغذیه می‌شود. یک لایه سیلیکون پشت زیر لایه قرار دارد تا با استفاده از آن بتوان با اعمال اختلاف پتانسیل بین گرافن و لایه سیلیکون رسانایی سطحی و به‌تبع آن امپدانس گرافن را مانند شکل (۱-۲) کنترل نمود. همان‌طور که در شکل مشخص است با افزایش پتانسیل شیمیایی، امپدانس سطحی به‌طور محسوس کاهش می‌یابد [۸].

<sup>۶</sup> High Impedance Surfaces

<sup>۷</sup> Co-Planar Waveguide



ب



الف

شکل ۲-۱ الف ( ساختار پیشنهادی مقاله ب) تغییرات امپدانس سطحی گرافن با تغییر پتانسیل شیمیایی در فرکانس‌های مختلف [۸]

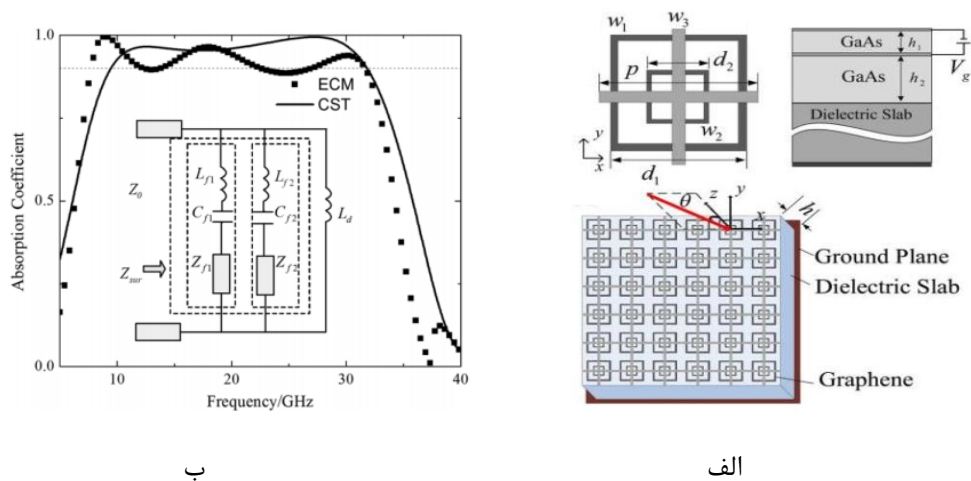
## ۲-۲-۲ ماکروویو

به دلیل کاربرد گسترده در کاهش سطح مقطع راداری<sup>۸</sup> در دهه‌های اخیر جاذب‌ها به شدت مورد توجه قرار گرفتند. پیش از این از پیچ‌های متشکل از سطوح با امپدانس بالا برای ساخت جاذب‌های پهن باند در فرکانس ماکروویو استفاده شده است که در آن جذب انرژی با تنظیم ولتاژ بایاس در باند فرکانسی نسبتاً وسیعی کنترل می‌شود. همچنین از لکه‌های گرافن جهت ساخت جاذب‌های کامل استفاده شده است. در این مقاله یک لایه به ساختار سطوح فرکانس‌گزین<sup>۹</sup> چاپ‌شده بر روی زیر لایه با پوشش یک طرفه فلز اضافه شده

<sup>۸</sup> Radar Cross Section

<sup>۹</sup> Frequency Selective Surface

است و ساختاری مانند آنچه در شکل (۲-۲) دیده می‌شود پیشنهاد شده است. با استفاده از مدل مداری می‌توان ساختار پیشنهادی به صورت نشان داده شده در شکل (۲-۲) مدل کرد.



شکل ۲-۲ الف) جاذب پهن باند پیشنهادی ب) مدل مداری معادل ساختار جاذب پیشنهادی [۹]

ضریب جذب ساختار پیشنهادی در فرکانس‌های مختلف با استفاده از مدل مدار معادل و شبیه‌سازی

با نرم‌افزار تحلیل تمام موج به ازای  $\mu c=0eV$  با توجه به مدل مداری ارائه شده و نوارهای گرافن با

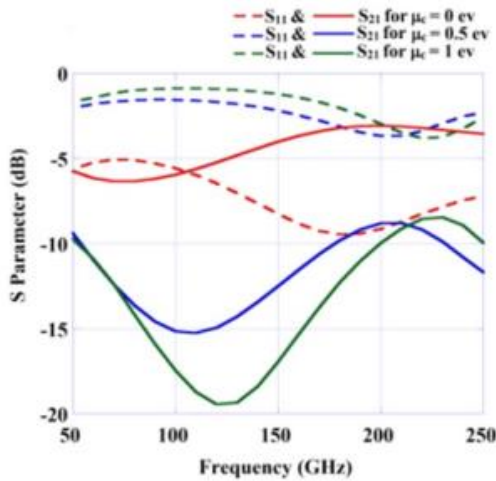
کمترین تنظیم می‌توانیم جاذبی پهن باند یا باند باریک داشته باشیم [۹].

## ۳-۲ کاهش کوپلینگ متقابل

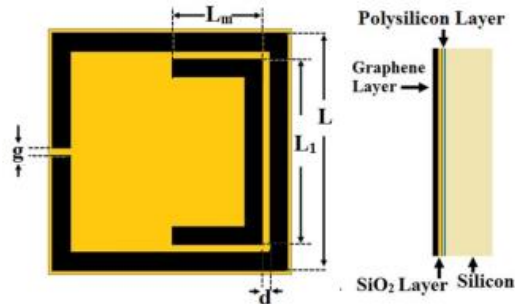
### ۳-۲-۱-۳-۲ سطوح کاهش میزان کوپلینگ متقابل



با استفاده از فراسطوح می‌توان کوپلینگ متقابل را کاهش داد. همان‌طور که در شکل (۳-۲) دیده می‌شود با استفاده از رزوناتورهای حلقوی شکافی<sup>۱۰</sup> ساخته شده از گرافن بارگذاری شده فراسطوحی جهت کاهش کوپلینگ متقابل دو آنتن تک قطبی طراحی شده است [۱۰].



ب



الف

شکل ۳-۲ الف) فراسطوح پیشنهادی جهت کاهش کوپلینگ متقابل ب) تغییرات سطح کوپلینگ در پتانسیل‌های شیمیایی متفاوت [۱۰]

## ۲-۳-۲ آنتن پوش جهت کاهش کوپلینگ متقابل

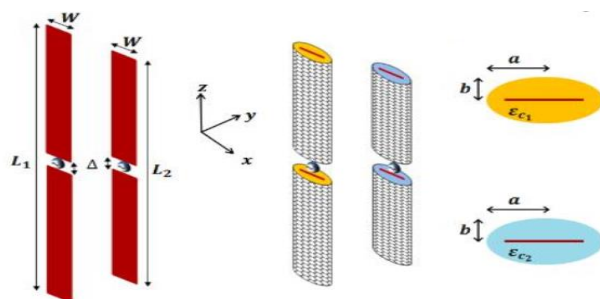
در ساختاری شکل (۴-۲) با استفاده از گرافن کوپلینگ متقابل دو آنتن دوقطبی در فرکانس THz کاهش داده شده، در نتیجه دو آنتن برای یکدیگر نامرئی هستند. وقتی دو آنتن در فاصله نزدیک از یکدیگر (Near Field) قرار می‌گیرند توان تشعشعی هر آنتن بر روی آنتن دیگر تأثیر می‌گذارد. در اثر کوپلینگ متقابل فرکانس کاری دو آنتن تغییر کرده و الگوی تشعشعی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. یکی از کاربردهای جالب مخفی سازی کاهش کوپلینگ متقابل است. در حقیقت ساختار پیشنهادی به شکلی عمل می‌کند که

<sup>10</sup> Split Ring Resonator

دو آنتن قرار گرفته در ناحیه میدان نزدیک همدیگر برای هم نامرئی می شوند. این ساختار مانند شکل (۲-۴) متشکل از دو بخش است:

(۱) دو آنتن دوقطبی ریزنواری (برای فراگیر بودن طرح با فرکانس کاری مختلف

(۲) پوشش بیرونی بیضی شکل از جنس گرافن



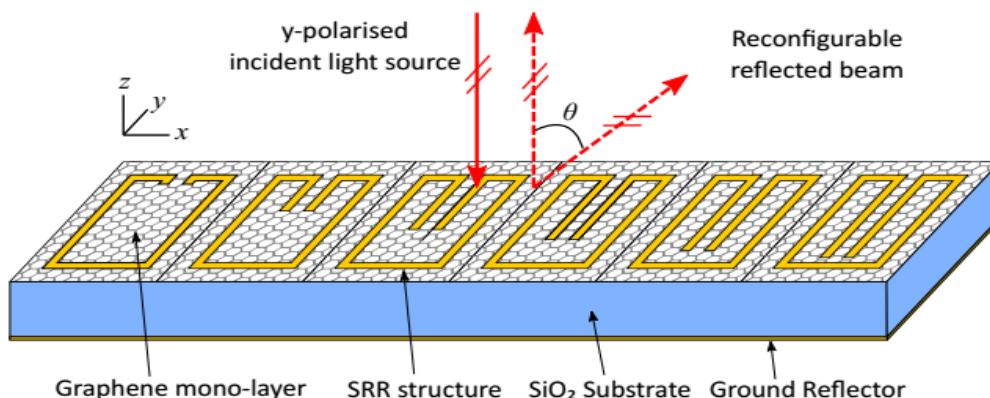
شکل ۲-۴ ساختار پیشنهادی جهت کاهش کوپلینگ متقابل [۱۱]

زمانی که آنتن ۱ تحریک شود آنتن ۲ نقش دایرکتور را دارد و به الگوی تشعشعی آنتن ۱ جهت می دهد و بالعکس. با توجه به اینکه پوشش گرافن دارای قابلیت میزان امپدانس سطحی و در نتیجه فرکانس رزونانس با تغییر پتانسیل شیمیایی می باشد، می توان بدون تغییر پارامترهای ابعادی آنتن که مانند حالت تطبیق نشده عمل می کند تنها با تغییر پتانسیل شیمیایی فرکانس رزونانس سطح را روی فرکانس رزونانس آنتن تنظیم کرد و آنتن را به حالتی مانند تطبیق امپدانس شده تبدیل کرد. با رسم منحنی امپدانس ورودی به شکل زیر می توان با تنظیم پتانسیل شیمیایی روی مقدار مناسب به فرکانس رزونانس رزونانس آنتن دست یافت [۱۱].

۲-۴ تنظیم جهت پرتو

## ۲-۴-۱ سوئیچ پرتو در آرایه بازتابی

رسانایی قابل تنظیم گرافن می‌تواند قابلیت کنترل مشخصات برگشتی ساختارهای الکترومغناطیسی که در نزدیک فرکانس رزونانس کار می‌کنند را ایجاد نماید. آنتن آرایه بازتابی با قابلیت سوئیچ پرتو در شکل (۲-۵) دیده می‌شود. ساختار شامل صفحه یکپارچه گرافن تک لایه و آرایه غیرمتناوب رزوناتورهای حلقوی شکافی فلزی نزدیک رزونانس است. با کنترل ولتاژ بایاس صفحه گرافن می‌توان فاز و دامنه برگشتی رزوناتورهای حلقوی شکافی را کنترل نمود به طوری که آرایه بازتابی با قابلیت سوئیچ پرتو بین دو حالت را داشته باشد [۱۲].

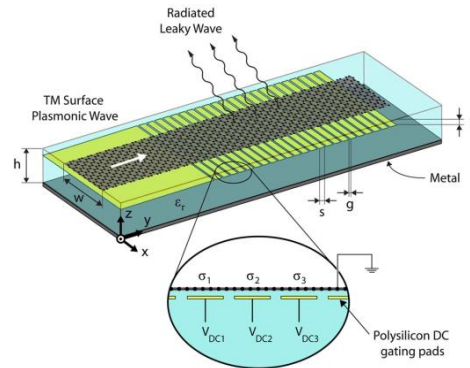


شکل ۲-۵ ساختار آرایه بازتابی با قابلیت سوئیچ پرتو [۱۲]

## ۲-۴-۲ پوشش یم الکترونیکی آنتن موج نشی

در این مقاله با استفاده از صفحه دوبعدی گرافنی و ایجاد مد نشی با کنترل راکتانس سطحی گرافن با کنترل بایاس گرافن توسط پدهایی که زیر لایه گرافن کار گذاشته شده است. همان‌طور که در شکل

(۶-۲) دیده می‌شود این ساختار متشکل از یک لایه گرافن است که در زیر آن پدهای گیت از جنس پلی سیلیکون برای اعمال ولتاژ مدوله‌شده به و زیر لایه با پوشش فلز به‌عنوان زمین می‌باشد.



شکل ۶-۲ ساختار سطح گرافنی با راکتانس مدوله‌شده سیلیسی با مانند یک آنتن موج نشتی عمل می‌کند. [۱۳]

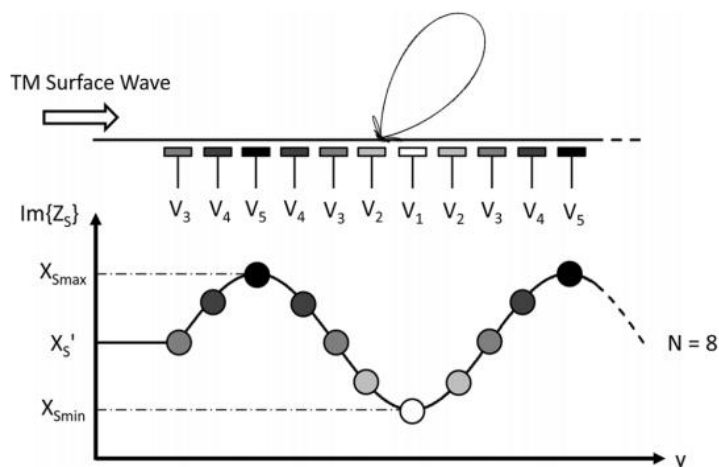
پدهای زیر لایه گرافن برای اعمال ولتاژ DC جهت تنظیم رسانایی آنتن نصب شده‌اند. در تحقیقات قبلی انجام‌شده از گرافن به‌عنوان لایه پارازیتیک به‌عنوان سوئیچ و در برخی کاربردها با تحریک مد پلاسمون به‌عنوان فلز تشعشعی نیز در آنتن‌های پچ و در آرایه‌های فازی استفاده‌شده است. در این ساختار با اعمال ولتاژ مختلف به پدهای زیرین مانند شکل (۷-۲) و ایجاد سطح راکتانس مدوله‌شده سیلیسی گرافن شرایطی ایجاد می‌گردد که سرعت فاز موج از سرعت فاز هوای آزاد ( $k_0$ ) بیشتر شود و پدیده نلثت موج رخ دهد. هنگامی که سرعت فاز موج بیشتر از سرعت نور گردد پدیده نشت رخ داده است. این نوع موج، موج سریع نام دارد. از این موج در ساخت آنتن‌های موج نشتی که شاخه‌ای از آنتن‌های موج متحرک است، استفاده می‌گردد. موج حرکت‌کننده در آنتن‌های موج نشتی موج به‌طور مداوم در امتداد طول آن تابش می‌دهد و از این‌رو عدد موج شامل مختلط و دارای یک بخش ثابت تضعیف و فاز می‌باشد.

<sup>11</sup> leakage

<sup>12</sup> Traveling wave antenna

سطوحی مانند گرافن با راکتانس مثبت قابلیت انتشار امواج سطحی TM را دارند. اثر متقابل بین امواج

سطوحی و راکتانس سطحی مدوله شده سبب بروز پدیده براگ و در نتیجه ایجاد مد نشتی می شود.



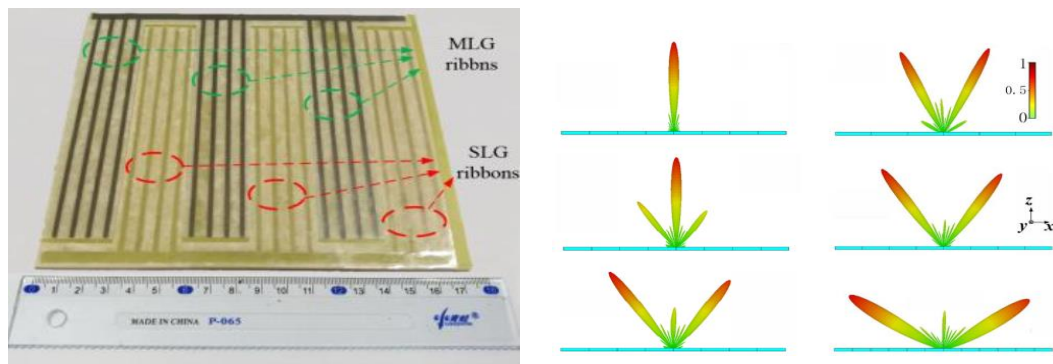
شکل ۲-۷ ایجاد راکتانس مدوله شده با اعمال ولتاژ DC به پدهای زیرین لایه گرافن [۱۳]

سایز پدها و تعداد آنها با توجه به دوره‌های مورد نیاز ترکیبی انتخاب شده است. سطح گرافنی حامل موج TM است. پس از طراحی و شبیه‌سازی، این آنتن دارای بازده ۱۰٪ است. این بازده به دلیل محدودیت‌هایی مانند زمان استراحت گرافن، بازه عملی ولتاژ قابل اعمال به پدها و موجود نبودن زیرلایه در باند تراهرتز می باشد [۱۳].

۲-۵ شکل دبی پرتو آنتن

۲-۵-۱ شکل دبی پرتو با فراسطوح

فرا سطحها<sup>۱۳</sup> گروه جدیدی از فرامواد<sup>۱۴</sup> هستند که به دلیل توانایی استثنایی که در تغییر امواج الکترومغناطیسی دارند توجه محققان را به خود جلب نمودند. در ساختار نشان داده شده در شکل (۸-۲) یک فرا سطح با استفاده از نوارهای گرافن به منظور شکل دهی پرتو در باند ماکروویو طراحی شده است. نوارهای گرافن تک لایه<sup>۱۵</sup> و چند لایه<sup>۱۶</sup> با استفاده از روش رشد CVD تولید شده اند. اختلاف فاز بازگشتی نوارها ۱۸۰ درجه و دامنه آنها در حد مورد قبول است. زاویه بازتاب متفاوت سلولها نشان می دهد با این طراحی می توان سیستم فاز دودویی مانند فرا سطحهای کدگذاری ساخته با استفاده از مواد مقاومتی، بر مبنای فرا سطحها طراحی نمود. علاوه بر این در یک ساختار ثابت با تغییر مقاومت سطحی نوارهای گرافن چند لایه می توان جهت پرتو را تغییر داد [۱۴].



شکل ۸-۲ ساختار فرا سطح با قابلیت شکل دهی پرتو [۱۴]

## ۲-۵-۲ شکل دهی پرتو با استفاده از روش

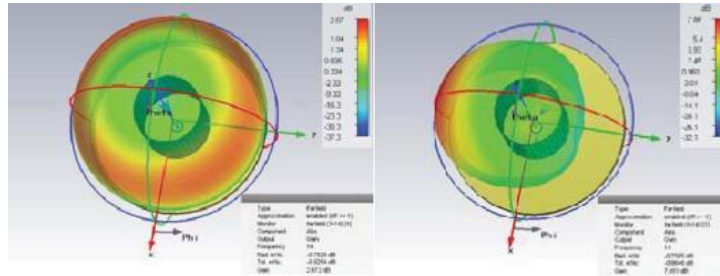
<sup>13</sup> Metasurface

<sup>14</sup> Metamaterial

<sup>15</sup> Single Layer Graphene

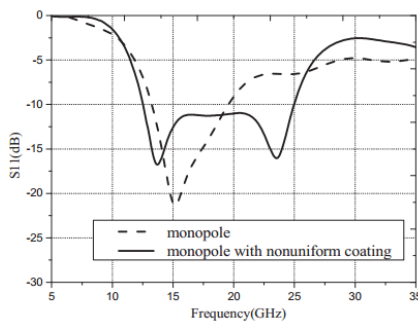
<sup>16</sup> Multi Layer Graphene

در ساختار نشان داده شده در شکل (۲-۹) با استفاده از گرافن به عنوان سطح امپدانسی یکپارچه با خاصیت رسانایی تنظیم پذیر با ولتاژ، آنتنی باقابلیت تنظیم شکل الگوی تشعشعی و پهنای باند طراحی شده است.

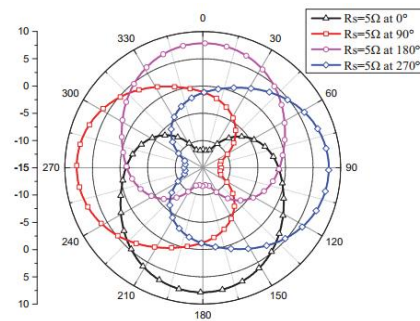


شکل ۲-۹ ساختار پیشنهادی جهت تنظیم پهنای باند امپدانسی و الگوی تشعشعی [۱۵]

پوشش سیلندری از جنس گرافن در اطراف آنتن تک قطبی که به صورت همه جهته<sup>۱۷</sup> تشعشع می نماید قرار داده شده است و با تنظیم رسانایی سطح امپدانسی گرافن توسط ولتاژ بایاس خارجی می توان شکل الگوی تشعشعی آنتن تک قطبی را تغییر داده و آن را به صورت همه جهته یا صفحه کاملاً افقی<sup>۱۸</sup> تنظیم نمود. فرکانس کوپلینگ بین سیلندر و آنتن با فاصله‌ی بین پوشش و آنتن مشخص می شود لذا این فاصله پهنای باند را نیز مشخص می کند. نتایج شبیه سازی تلفات بازگشتی و تغییر شکل الگوی تابشی مانند آنچه در شکل (۱۰-۲) آمده است را نشان می دهد [۱۵].



ب



الف

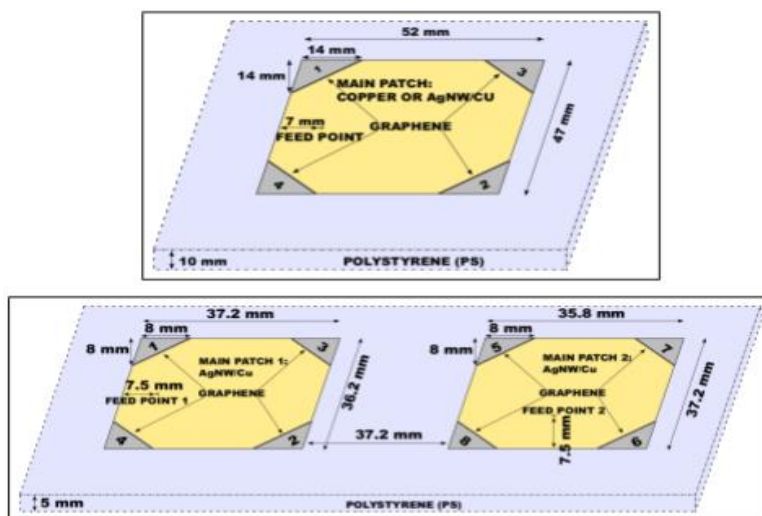
شکل ۱۰-۲ الف) تغییر الگوی تشعشعی ب) تغییر پهنای باند امپدانسی با تغییر امپدانس استوانه [۱۵]

<sup>17</sup> Omidirectional

<sup>18</sup> Broadside

## ۲-۶ تنظیم پلاریزاسیون آنتن

ساختاری مانند شکل (۲-۱۱) با زوایای پچ از جنس گرافن می‌باشد که با تنظیم ولتاژ بایاس آن‌ها روی مقداری معادل صفر یا یک باینری می‌توان پلاریزاسیون را تنظیم نمود. در این ساختار با استفاده از گرافن در گوشه‌های پچ و سوئیچ سطح گرافن بین دو حالت امپدانس (رسانایی کامل و دی‌الکتریک با اتلاف بالا) می‌توان پلاریزاسیون افقی و دایروی را به یکدیگر تبدیل نمود. در ادامه ساختار آرایه دوتایی این آنتن نیز بررسی شده است [۱۶].

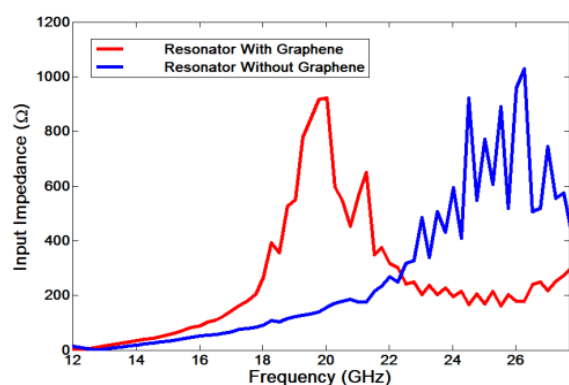


شکل ۲-۱۱ آنتن با پلاریزاسیون قابل تنظیم [۱۶]

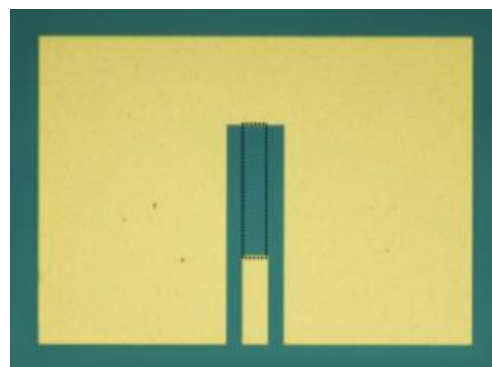
## ۲-۷ ساخت رزوناتور



مطابق تحقیقات انجام شده می توان با استفاده از گرافن رزوناتور اتصال کوتاه با پاسخ قابل قبول ساخت. رزوناتور نشان داده شده در شکل (۲-۱۲) با استفاده از گرافن تک لایه در باند ماکروویو و تراهرتز طراحی و ساخته شده است. گرافن در باند ماکروویو با روش CVD و در باند تراهرتز با روش تورق تولید شده و توسط لیزر طرح رزوناتور لایه برداری شده است. قسمت رزوناتور میانی گرافن و خطوط جانبی از جنس طلاست. پس از ساخت و با بررسی امپدانس ورودی نشان داده شده در شکل (۲-۱۲) عملکرد رزوناتور مانند رزوناتور ساخته شده از فلز می باشد [۱۷].



ب



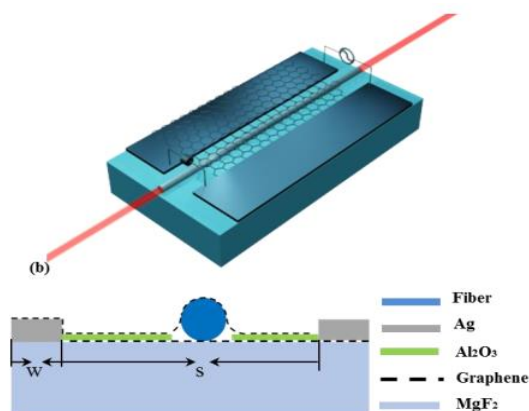
الف

شکل ۲-۱۲ الف) رزوناتور گرافنی ب) امپدانس ورودی رزوناتور با گرافن و بدون گرافن [۱۷]

## ۲-۸ ساخت مولاتوریهای سریع

ساختار دوبعدی گرافن چگالی حامل بسیار بالایی دارد به گونه ای که می توانیم با استفاده از آن پهنای باند بیش از ۵۰۰ گیگاهرتز داشته باشیم. عامل محدود کننده این پهنای باند در حد چند ده گیگاهرتز کم بودن ثابت RC نسبت به زمان جابجایی حامل است. در تحقیقی که ساختار آن در شکل (۲-۱۳) آمده است

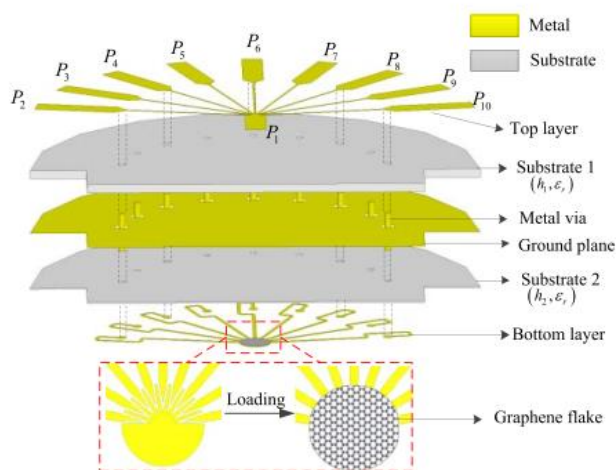
با استفاده از ترکیب گرافن و میکروفیبر با تغییر انرژی فرمی گرافن با توجه به برهمکنش گرافن و امواج ناپایدار میکروفیبر به مدولاسیون الکترواپتیکیال در پهنای باند ۸۲ گیگاهرتز (3dB) دست یافته‌اند [۱۸].



شکل ۲-۱۳ مدولاتور سریع با استفاده از گرافن [۱۸]

## ۹-۲ فشرده‌سازی

در ساختار نشان داده شده در شکل (۲-۱۴) یک مقسم توان ۱ به ۹ فشرده با استفاده از مقاومت‌های ایزوله همه جهته بر پایه ورقه گرافن طراحی گردیده است. مقسم توان بر روی ساختار دوطبقه ریزنواری با سوراخ‌های ایجاد شده جهت کاهش سایز قرار دارد. قسمتی از دایره ساخته شده از صفحات گرافن بر روی ساختاری دندان‌اره‌ای بارگذاری شده است تا مقاومت‌های همه جهته ایزوله را بین پورت‌های خروجی ایجاد کنند و نیازی به مقاومت‌های معمول با معایب آن‌ها و مشکلات لحیم‌کاری نباشد. این ساختار ساخته شده و تحت تست قرار گرفته است و نتایج تست تأیید کننده طراحی و تحلیل می‌باشد [۱۹].

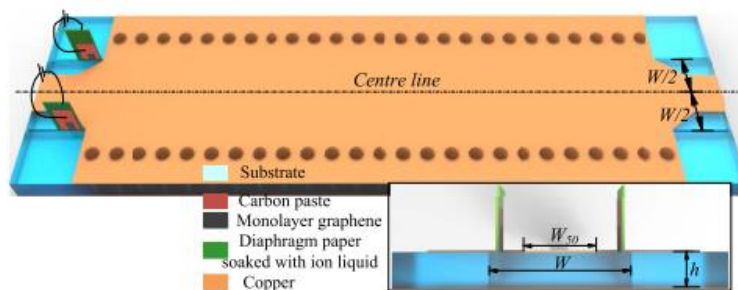


شکل ۱۴-۲ مقسم توان ۱ به ۹ فشرده‌سازی شده [۱۹]

## ۱۰-۲ تنظیم میزان تضعیف در تضعیف‌کننده

در ساختار تضعیف‌کننده موج‌بری مجتمع شده<sup>۱۹</sup> در زیر لایه نشان داده شده در شکل (۲-۱۵) دو ساختار ساندویچی گرافن به عنوان تیغه‌های E-plane با قابلیت تنظیم رسانایی درون یک SIW قرار داده شده‌اند. با اعمال ولتاژ بایاس گرافن در حالی که بازگشتی در سطح پایین حفظ می‌شود تضعیف به صورت پویا تغییر می‌نماید. نمونه این تضعیف‌کننده برای فرکانس 7-14.5GHz ساخته و تست شده است و نتایج تحلیل و شبیه‌سازی و تست انطباق خوبی دارند [۲۰].

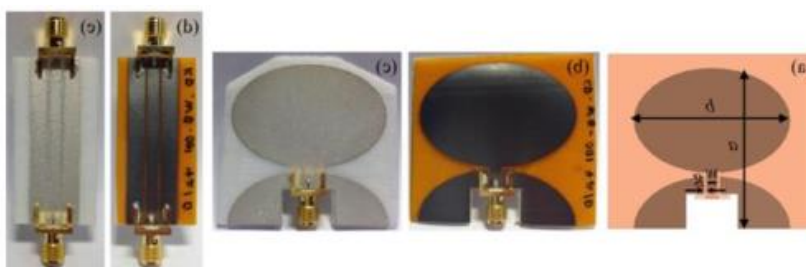
<sup>19</sup> Substrate integrated waveguide



شکل ۲-۱۵ تضعیف‌کننده با قابلیت تنظیم مقدار تضعیف [۲۰]

## ۲-۱۱ کاهش هزینه آنتن‌های کاربردی ارتباطات بیسیم

کارهای زیادی با استفاده از گرافن در زمینه ساخت آنتن‌های RFID، ساخت خطوط انتقال و آنتن‌های RF و دستگاه‌های RFID فشرده انجام شده است. با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد گرافن مانند مقاومت الکتریکی قابل تنظیم و قیمت ارزان‌تر آن نسبت به نقره که اکنون در تولید آنتن‌های RFID استفاده می‌شود، از این ماده در ساخت آنتن‌های شکافی یا دوقطبی صفحه‌ای استفاده شده است ولی دارای باند فرکانسی باریک است. در این مقاله یک آنتن بیضوی گرافن در بازه ۲ تا ۵ مگاهرتز طراحی شده و برای تست آن در باند RF یک موج‌بر انتقال هم صفحه طراحی و در باند ۱ تا ۲۰ مگاهرتز ساخته و تست شده است. ساختار ارائه شده به صورت نشان داده شده در شکل (۲-۱۶) می‌باشد [۲۱].

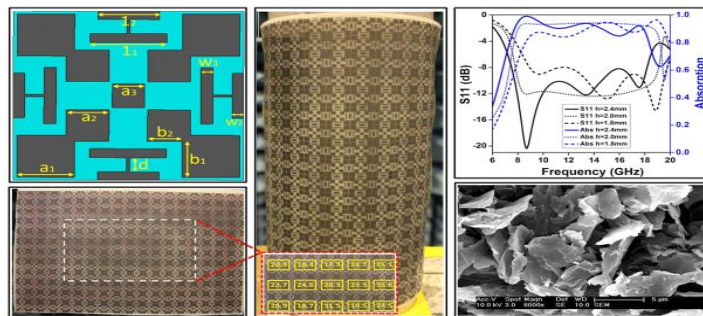


شکل ۲-۱۶ شکل خطوط انتقال هم صفحه ساخته شده از نقره و گرافن - نمونه‌های ساخته شده آنتن از نقره و

گرافن [۲۱]

## ۱۲-۲ ساخت جاذب‌های انعطاف و تطبیق‌پذیر

در پژوهش انجام‌شده که ساختار آن در شکل (۲-۱۷) دیده می‌شود جاذب پهن باند با قابلیت انعطاف و شکل‌پذیری بالا با استفاده از نانوذره‌های گرافن طراحی، ساخته و تست گردیده است. این جاذب باند  $X$  و  $Ku$  را پوشش می‌دهد و با استفاده از شابلون و جوهر گرافن تولید گردیده است. استفاده از گرافن امکان انعطاف‌پذیری جاذب و پیاده‌سازی آن بر روی استوانه فلزی را فراهم آورده است. سطح مقطع راداری<sup>۲۰</sup> استوانه فلزی بدون جاذب و با استفاده از آن اندازه‌گیری شده و نتایج عالی بوده است [۲۲].



شکل ۲-۱۷ جاذب گرافنی با قابلیت انعطاف‌پذیری و تطبیق‌پذیری [۲۲]

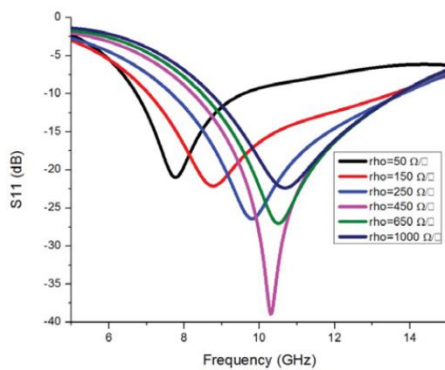
## ۱۳-۲ تنظیم فرکانس

### ۱-۱۳-۲ تنظیم فرکانس با استفاده از سطح امپدانس

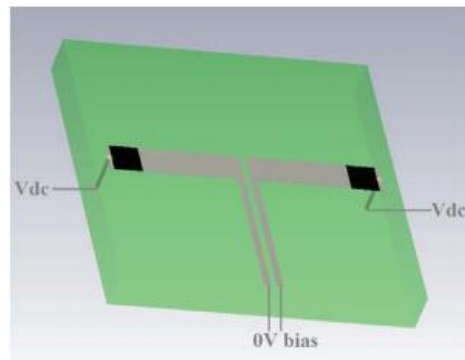
<sup>20</sup> Radar Cross Section

در این مقاله آنتن دوقطبی با گرافن بارگذاری شده در دو انتها مورد مطالعه قرار گرفته است. ساختار پیشنهادی مانند شکل (۲-۱۸) می‌باشد.

جنس زیرلایه FR4 است. به منظور افزایش طول فیزیکی آنتن گرافن به دو انتهای آن متصل شده است. در سمت دیگر صفحات گرافن دو قطعه فلز کوچک که به وسیله سوراخ بدون اتصال<sup>۲۱</sup> به صفحه زمین متصل شدند قرار دارد تا بتوان ولتاژ DC مورد نیاز برای بایاس گرافن را اعمال نمود. بر اساس نتایج شبیه‌سازی با افزایش امپدانس سطح گرافن فرکانس مرکزی بزرگ‌تر می‌شود لذا با تغییر مقاومت سطح گرافن می‌توان فرکانس رزونانس را جابه‌جا نمود. با توجه به شکل زیر پهنای باند آنتن با وجود استفاده از ماده تلفاتی گرافن و تغییر امپدانس سطح آنتن هنوز نسبتاً زیاد است. با توجه به شکل (۲-۱۹)، الگوی تشعشی می‌توان گفت بازه قابل تنظیم و کارایی تشعشی ساختار پیشنهادی با تغییر امپدانس سطح گرافن نسبتاً خوب است.



ب

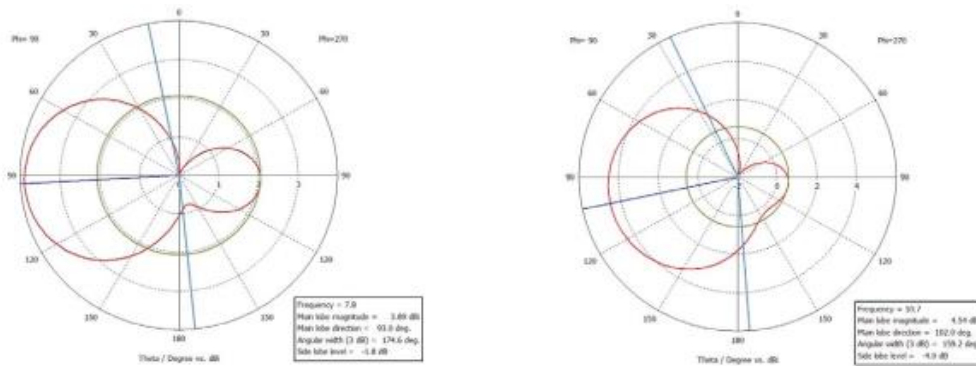


الف

شکل ۲-۱۸ الف) آنتن با قابلیت تنظیم فرکانس ب) تلفات بازگشتی آنتن به ازای پتانسیل‌های شیمیایی

متفاوت

<sup>21</sup> Via



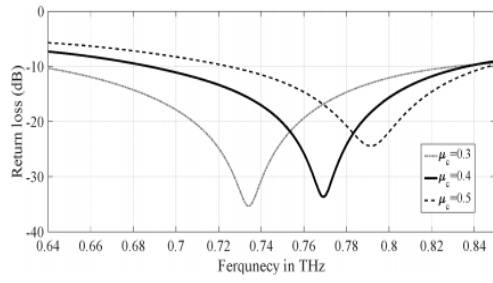
شکل ۲-۲۹ الگوی تشعشعی آنتن در دو فرکانس متفاوت

هرچقدر امپدانس سطحی گرافن کمتر باشد جریان سطحی گرافن قوی تر می شود و طول الکتریکی

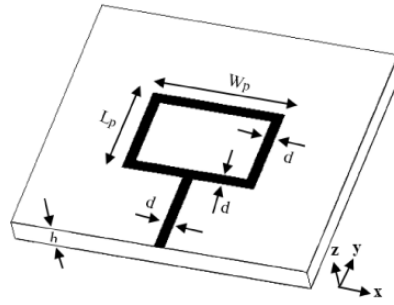
دوقطبی افزایش می یابد. هنگامی که امپدانس سطح گرافن را کاهش می دهیم به نقطه ای می رسیم که دیگر فرکانس رزونانس کمتر نمی گردد و مشخصات بازتابی گرافن بسیار نزدیک به فلز است [۲۳].

## ۲-۱۳-۲ تنظیم فرکانس با استفاده از پلاریتون پلاسمون های سطحی

در شکل (۲-۲۰) آنتن نواری جدید باقابلیت تنظیم فرکانس در بازه پایین باند ترا هرترز نشان داده شده است. در این ساختار با توجه به نحوه رفتار پلاریتون های سطحی در گرافن و تحلیل آن توانایی تغییر فرکانس کاری آنتن ایجاد شده است. این آنتن با استفاده از گرافن چندلایه طراحی شده است لذا دارای بازه پایین تری نسبت به گرافن تک لایه و فلز می باشد [۲۴].



ب



الف

شکل ۲-۲۰ الف) آنتن نواری گرافنی باقابلیت تنظیم فرکانس ب) فرکانس کاری آنتن با توجه به پتانسیل شیمیایی گرافن



# فصل سوم

انتشار ریزنولوی با قابلیت تنظیم

پلدریزوسو، بر پایه کرفشر

## ۳-۱ مقدمه

امروزه با توجه به اهمیت ارتباطات بیسیم آنتن‌ها سهم به سزایی از حجم وسیع تحقیقات درزمینهٔ مخابرات میدان را به خود اختصاص داده‌اند. آنتن‌ها بسته به کاربرد، فرکانس کاری، محیط مورد استفاده و ابعاد به انواع مختلفی تقسیم شده‌اند. از جمله پرکاربردترین انواع آنتن‌ها می‌توان آنتن‌های ریزنواری را نام برد. این آنتن‌ها با وجود داشتن کاستی‌هایی همچون توان قابل تحمل و بهره پایین، داشتن سطح پلاریزاسیون متقاطع بالا، پهنای باند کم، تشعشع ناخواسته تغذیه و بازدهی پایین به دلیل داشتن مزایایی از قبیل کوچکی ابعاد و سبک بودن، سهولت و ارزان قیمت بودن ساخت، حداقل بودن تشعشع مدهای ناخواسته، قابلیت پوشش چند باند فرکانسی و قطبش همچنان بسیار پر کاربرد هستند.

در فصل‌های قبل در مورد رسانایی سطحی گرافن در فرکانس‌های گوناگون و انواع زیرلایه‌های موجود جهت پیاده‌سازی ساختار مناسب به منظور اعمال ولتاژ DC به‌طور مفصل توضیح داده شد. همچنین مواردی از کاربردهای این عنصر در صنعت مخابرات میدان ذکر گردید. هدف طراحی انجام‌شده در این فصل به اختصار موارد زیر می‌باشد:

(۱) استفاده از گرافن در آنتن‌های دارای چند قطبش

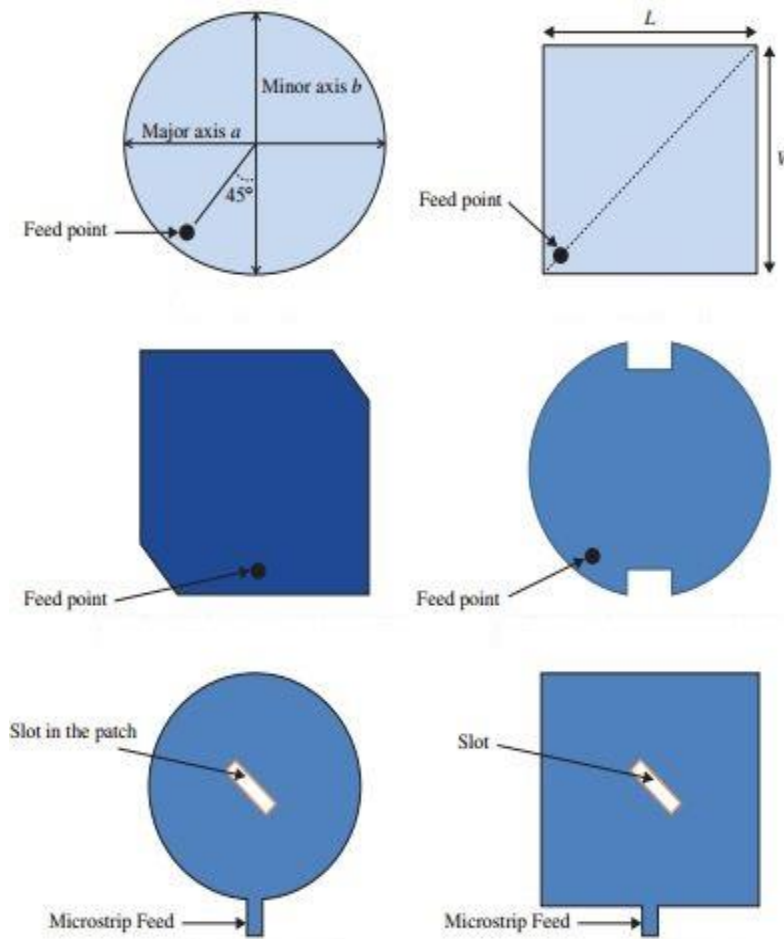
(۲) ارائه طرحی با قابلیت پیاده‌سازی و کنترل ساده

(۳) ارائه آنتنی تک تغذیه با قابلیت تنظیم پلاریزاسیون

در این فصل انواع روش‌های ایجاد قطبش دایروی با استفاده از پیچ مربعی مرسوم بررسی می‌گردد. در گام بعدی به معرفی ساختاری می‌پردازیم که در آن با استفاده از گرافن می‌توان در محدوده فرکانسی مشخصی در باند X سه پلاریزاسیون خطی، دایروی راست‌گرد و دایروی چپ‌گرد را ایجاد نمود.

## ۲-۳ راهکارهای موجود جهت طراحی آنتن‌های چندپلاریزه

روش‌های متعددی برای پیاده‌سازی آنتن‌های دو پلاریزه که شامل قطبش دایروی می‌باشند وجود دارد. به‌طور کلی در اکثر این روش‌ها آنتن دارای دو تغذیه می‌باشد. با تغییر در ساختار پچ می‌توان پلاریزاسیون دایروی در آنتنی که متشکل از یک پچ مربعی و یک تغذیه می‌باشد ایجاد نمود. شکل ۱-۳ نشان‌دهنده چند نمونه از ساده‌ترین تغییرات در پچ جهت ایجاد قطبش دایروی است.



شکل ۱-۳ آنتن‌های پچ با پلاریزاسیون دایروی تک تغذیه

حال اگر بتوان شرایطی را ایجاد نمود که در ساختارهای فوق بتوان بین قطبش دایروی و خطی سوئیچ نمود می توان به آنتن دو پلاریزه با یک تغذیه دست یافت.

### ۳-۳ راهکارهای بررسی شده جهت طراحی آنتن های چند پلاریزه

در طی این پژوهش با توجه به فرکانس کاری ساختارها مشخصات زیرلایه انتخابی جهت پیاده سازی ساختار اعمال ولتاژ DC به منظور کنترل رسانایی سطحی گرافن مطابق جدول ۳-۱ انتخاب گردیده است [۴]. زیرلایه مورد استفاده در این آنتن از نوع Rogers RO4003C با ضریب گذردهی نسبی  $3/38$  و تانژانت تلفات  $0/0027$  و ضخامت  $0/813$  میلی متر می باشد. تمامی نتایج ارائه شده در ادامه بر اساس شبیه سازی با استفاده از نرم افزار CST Studio Suite است. با توجه به مطالب ذکر شده در بخش ۱-۴ رسانایی گرافن بر اساس فرمول های ۱-۳ الی ۱-۵ و در نظر گرفتن  $10000$  نقطه برای بازه فرکانسی که شبیه سازی انجام شده است محاسبه گردید و در نرم افزار به صورت جدول برای تعریف سطح امپدانسی که معرف گرافن است استفاده شده است.

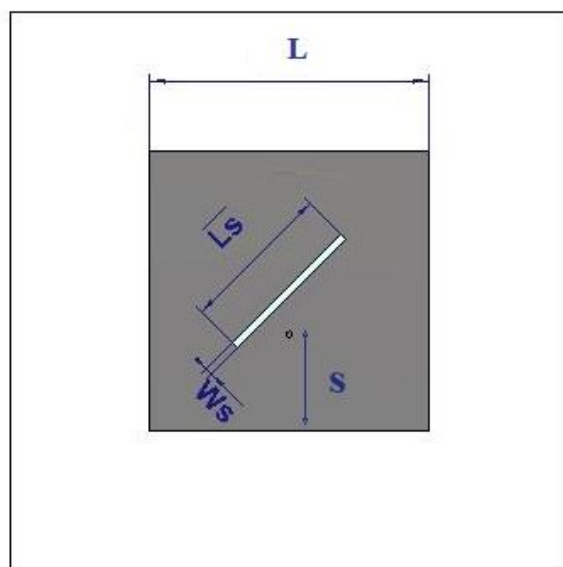
جدول ۳-۱ مشخصات زیرلایه گرافن

Substrate material	hBN
$\tau$ (ms)	۱
$\epsilon$	۴
d(nm)	۱۰

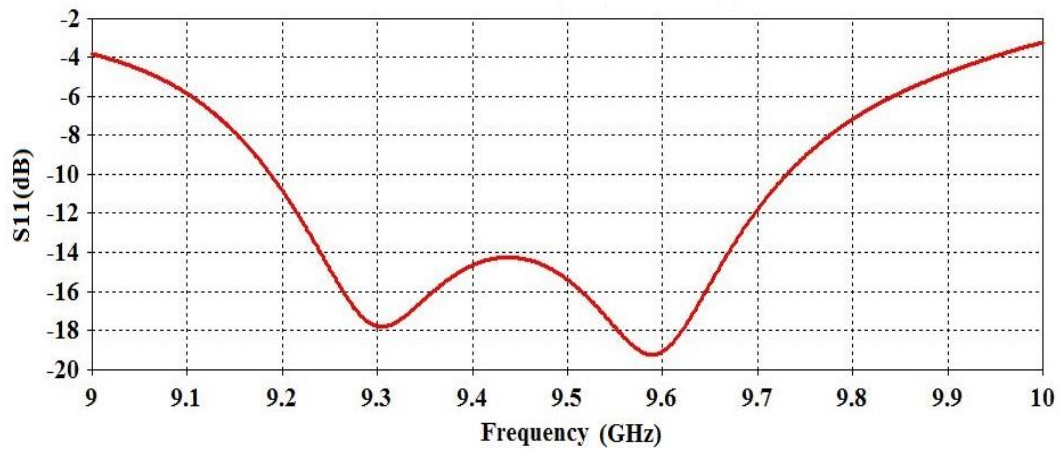
ابتدا ساختار آنتنی مطابق با شکل ۲-۳ به منظور ایجاد قطبش دایروی در باند فرکانسی X طراحی گردید. شکل ۲-۳ و جدول ۲-۳ نشان دهنده شکل ساختار و ابعاد آن می باشند. همان طور که در شکل ۳-۳ دیده می شود در فرکانس ۹/۳۶-۹/۴۹ GHz قطبش آنتن دایروی چپ گرد است.

جدول ۲-۳ ابعاد آنتن پیشنهادی دایروی قطبش دایروی (mm)

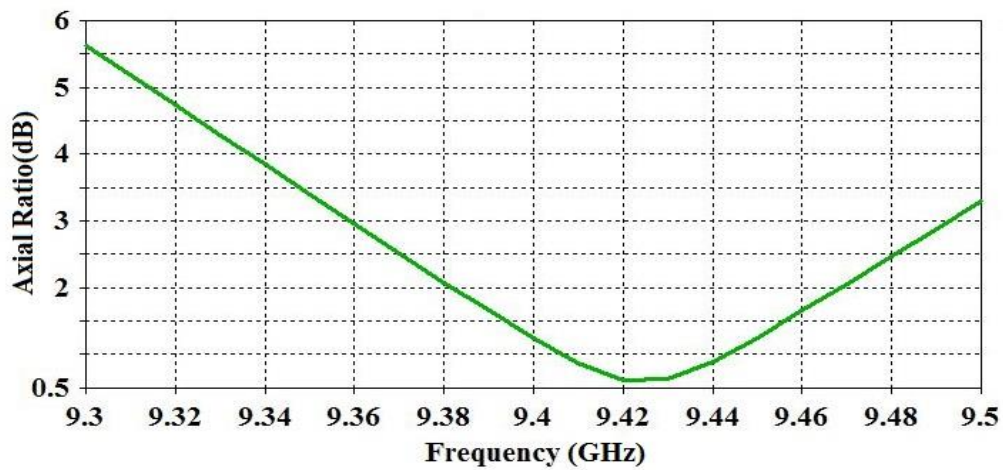
L	Ls	Ws	S
۷/۸۳	۴/۳	۰/۲	۲/۷



شکل ۲-۳ آنتن پیشنهادی با پلاریزاسیون دایروی با شکاف در میانه پچ بدون استفاده از گرافن



الف



ب

شکل ۳-۳ الف) پهنای باند امپدانسی آنتن با پلاریزاسیون دایروی ب) نسبت مد محوری آنتن

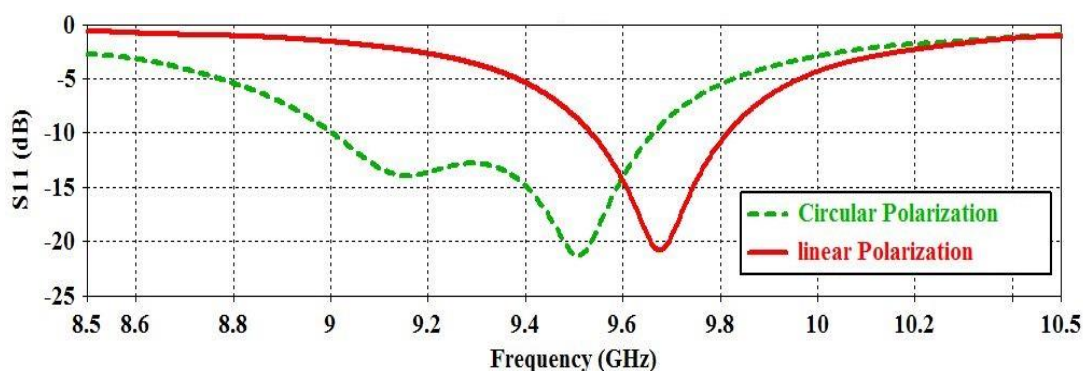
در مرحله بعدی شکاف میانی پیچ با ماده گرافن جایگزین گردید. مقدار امپدانس سطحی گرافن بر اساس آنچه در ابتدای همین بخش توضیح داده شده است تعریف گردید. جهت شبیه‌سازی گرافن، بایاس گرافن به‌گونه‌ای تعیین گردید که بتوان با اعمال دو ولتاژ DC متفاوت در فرکانس کاری آنتن بتوان بین دو حالت On و Off سوئیچ نمود. امپدانس سطحی گرافن در محدوده عملکرد آنتن به‌طور تقریبی مقادیر ذکر شده در

جدول ۳-۳ است؛ بنابراین با انتخاب حالت On آنتن (تعریف ماده‌ای با امپدانس سطحی متغیر با فرکانس به ازای ولتاژ بایاس ۵ ولت) دارای قطبش خطی و در حالت Off (تعریف ماده‌ای با امپدانس سطحی متغیر با فرکانس به ازای ولتاژ بایاس ۰/۰۳ ولت) قطبش آن دایروی راست گرد است.

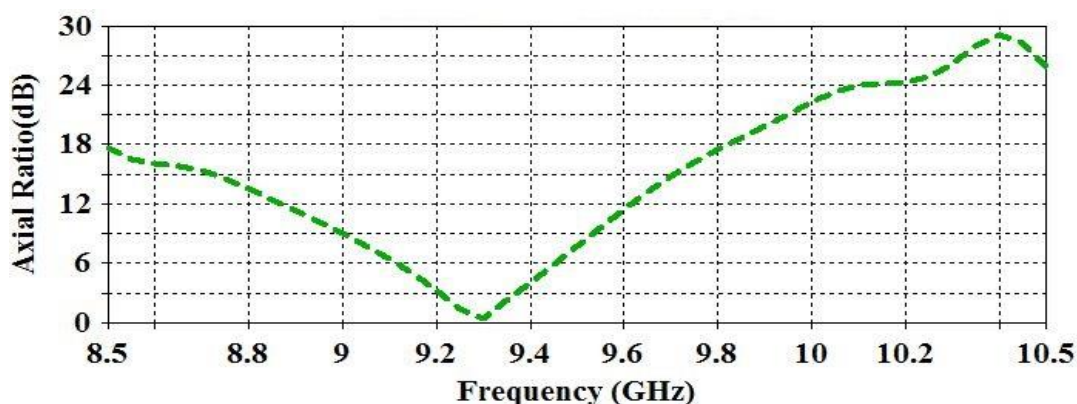
جدول ۳-۳ مشخصات گرافن در دو حالت روشن و خاموش

حالت	روشن (فعال)	خاموش (غیرفعال)
ولتاژ بایاس DC (ولت)	۵	۰/۰۳
رسانایی سطحی $\sigma_s$	$(0/045 - j0/025)$	$(416 - j1/9) \times 10^{-6}$
امپدانس سطحی $R_s$	$1/3j + 22/3$	$11/4j + 2400$

همان‌طور که در جدول ۳-۳ دیده می‌شود با توجه به امپدانس متفاوت شیپار گرافنی نسبت به شیپار معمول، اختلاف‌فازی که این شیپار بین دو مد انتشاری ایجاد می‌کند برای دو ساختار متفاوت است لذا به منظور ایجاد قطبش دایروی با استفاده از شیپار گرافنی در ولتاژ بایاس ۰/۰۳ ولت، طول شیپار باید به ۲/۲ میلی‌متر تغییر کند.



(الف)



(ب)

شکل ۳-۴ الف) پهنای باند امیدانسی در دو قطبش خطی و دایروی (ب) نسبت محوری در قطبش دایروی

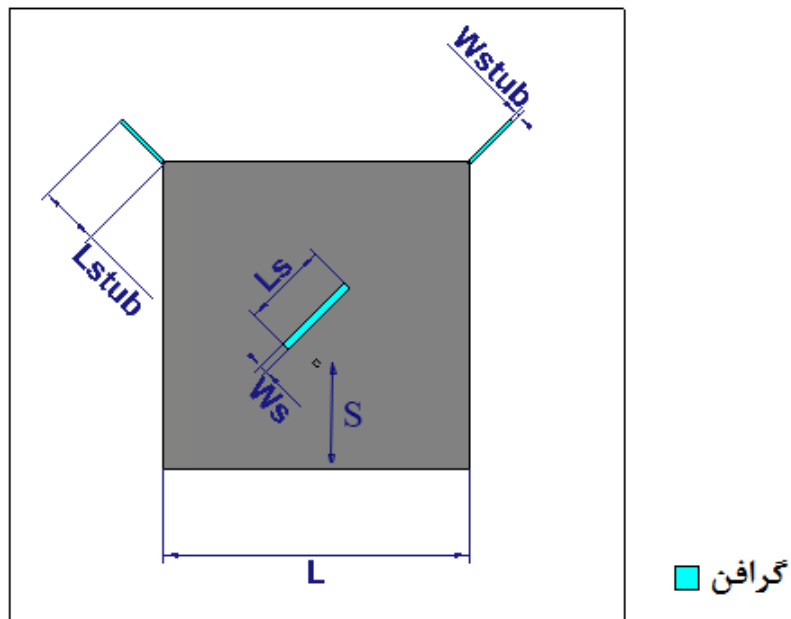
همان‌طور که شکل در ۳-۴ مشهود است پهنای باند مشترک میان دو قطبش دایروی و خطی GHz ۹/۵۳-۹/۶۶ می‌باشد این در حالی است که در بازه فرکانسی GHz ۹/۲۰-۹/۳۷ نسبت مد محوری کمتر از ۳ dB است که در این پژوهش معیار مورد قبول برای اطمینان از دایروی بودن قطبش آنتن است. لذا برای ایجاد هم‌پوشانی بین دو بازه فوق باید راهکاری استفاده نمود که فرکانس رزونانس آنتن در دو قطبش و فرکانسی که در آن اختلاف فاز دو مد انتشاری متعامد ۹۰ درجه می‌گردد منطبق گردد. اختلاف فاز دو مد متعامد به طول و امیدانس شیار بستگی دارد این در حالی است که تنها با تغییر پارامترهای شیار به دلیل تغییر امیدانس فرکانس رزونانس هم‌زمان تغییر می‌کند و این هم‌پوشانی قابل دستیابی نیست. با توجه به این نکته که تغذیه پراب در راستای طولی پچ است نه قطری لذا مدهای متعامد در راستای قطرها منتشر می‌شوند پس با تغییر طول الکتریکی در این راستا می‌توان بدون برهم خوردن شرایط قطبش دایروی (اختلاف فاز ۹۰ درجه دو مد متعامد) فرکانس رزونانس آنتن را تغییر داد؛ بنابراین به‌طور هم‌زمان با توجه به توزیع جریان در پچ مربعی دو شاخک اتصال باز در دو گوشه پچ می‌توان اضافه کرد طوری که بدون تغییر در توزیع جریان، طول الکتریکی طوری تغییر یابد که فرکانس رزونانس در دو قطبش و بازه فرکانسی مد



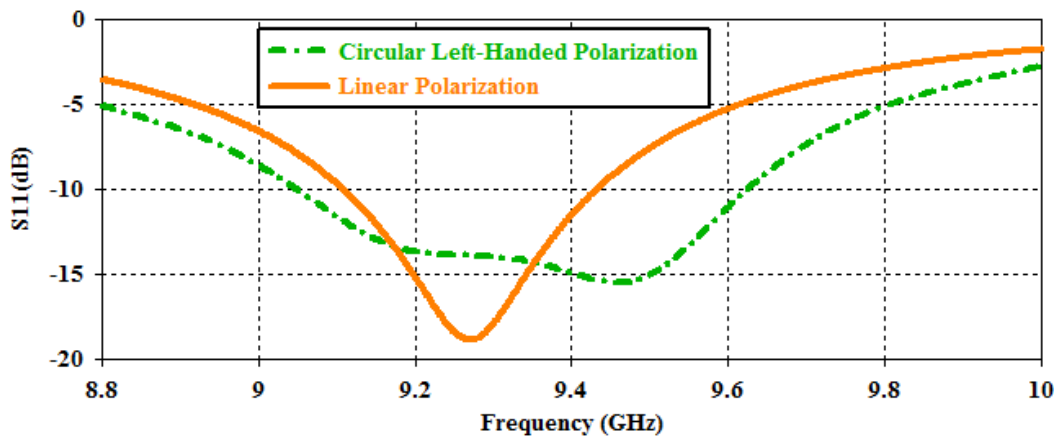
محوری هم‌پوشانی داشته باشند. ساختار نهایی با پیاده با تغییر طول شیار و افزودن شاخک‌های اتصال باز و پهنای باند مشترک دو قطبش خطی و دایروی در شکل ۳-۵ نشان داده شده است. ابعاد آنتن با دو قطبش خطی و دایروی چپ‌گرد در جدول ۳-۴ آمده است.

جدول ۳-۴ ابعاد آنتن طراحی شده با دو قطبش خطی و دایروی چپ‌گرد

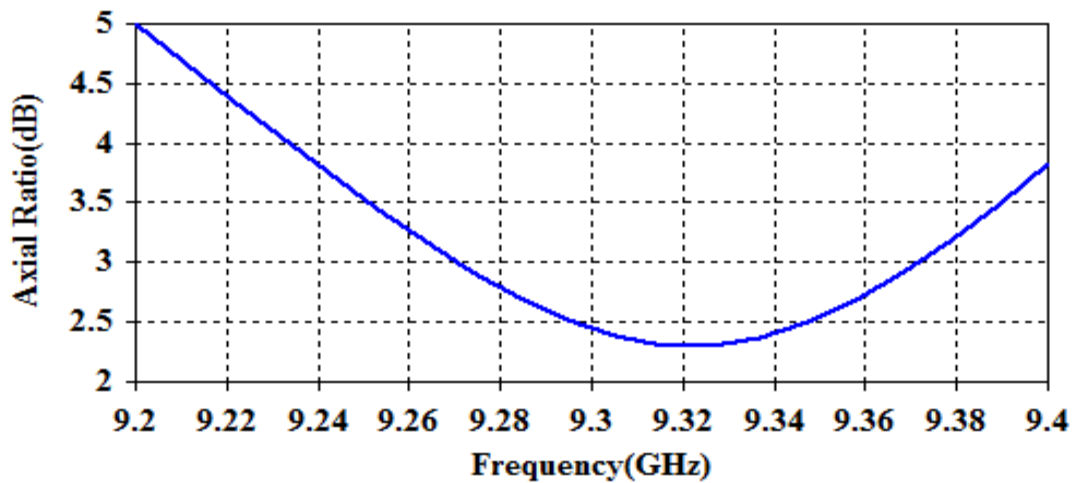
L	Ls	Ws	S	Wstub	Lstub
۷/۸	۲/۲	۰/۲	۲/۷	۰/۱	۱/۵



شکل ۳-۵ آنتن با دو قطبش دایروی چپ‌گرد و خطی



(الف)



(ب)

شکل ۳-۶ الف) پهنای باند امیدانسی آنتن پیشنهادی در دو قطبش خطی و دایروی چپ گرد ب) نسبت محوری

آنتن در قطبش دایروی چپ گرد

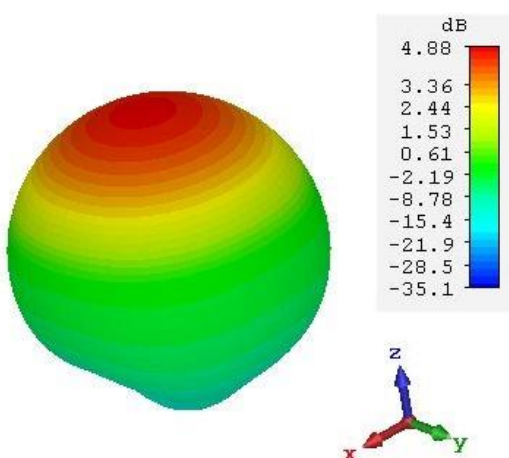
مطابق آنچه در شکل ۳-۶ دیده می شود، در بازه فرکانسی ۹/۲۷-۹/۳۷ GHz می توان با انتخاب ولتاژ

بایاس ۰/۰۳ یا ۵ ولت به قطبش دایروی چپ گرد یا خطی دست یافت. بازه فرکانسی قطبش خطی و دایروی

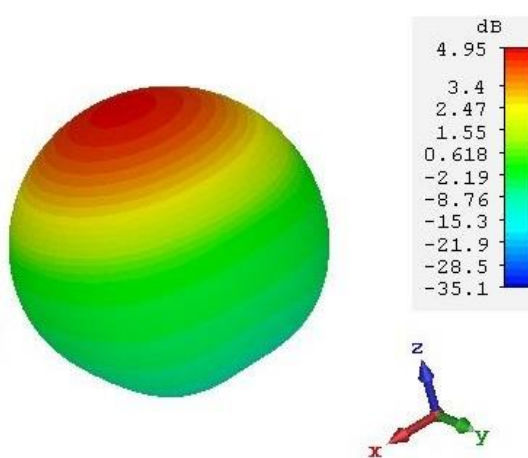
راست گرد در جدول ۳-۵ آمده است.

جدول ۵-۳ بازه عملکرد آنتن پیشنهادی در شکل ۵-۳

حالت	هر سه سطح گرافنی خاموش	هر سه سطح گرافنی روشن
نوع قطبش	دایروی راست گرد	خطی
پهنای باند فرکانسی (S11 < -10dB)	۹/۰۵-۹/۶۲ GHz	۹/۱۱-۹/۴۳ GHz
پهنای باند فرکانسی قطبش	۹/۲۷-۹/۳۷ GHz	۹/۱۱-۹/۴۳ GHz
مقدار نسبت محوری	کمتر از ۳ دسی بل	بیشتر از ۴۰ دسی بل



(ب)



(الف)

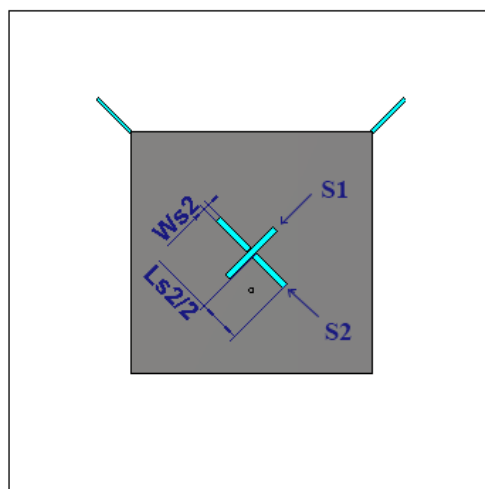
شکل ۷-۳ پترن تشعشعی آنتن در فرکانس ۹/۳۴ GHz الف) قطبش دایروی راست گرد ب) قطبش خطی

یکی از نکات قابل تامل در این طراحی عدم تاثیر مخرب شیار میانی پیچ بر روی شکل پترن می باشد

(شکل ۷-۳). در مرحله بعد با افزودن دو شیار عمود بر شیار مرکز پیچ آنتن شکل ۵-۳ با ابعاد  $2/8 \text{ mm}$  Ls2

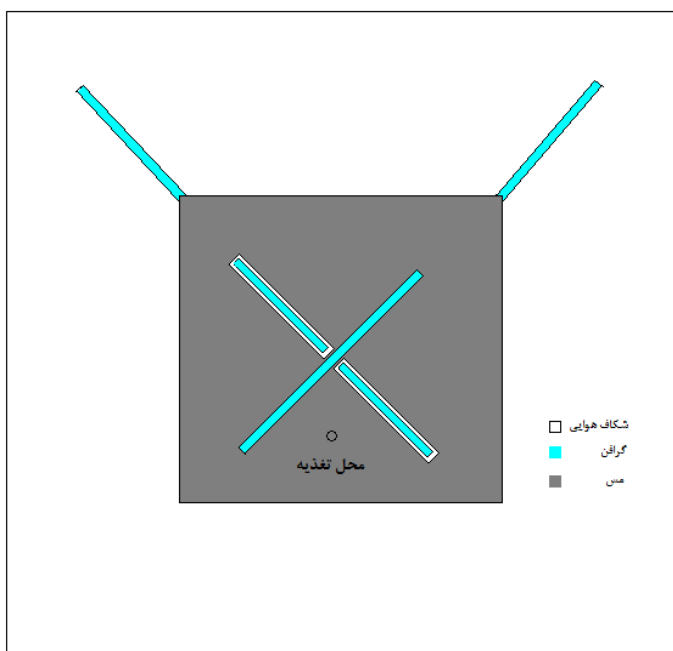
و  $W_s2 = 0/2 \text{ mm}$  می توان قطبش یک آنتن را در یکی از سه حالت خطی، دایروی راست گرد و دایروی

چپ گرد را تنظیم نمود.

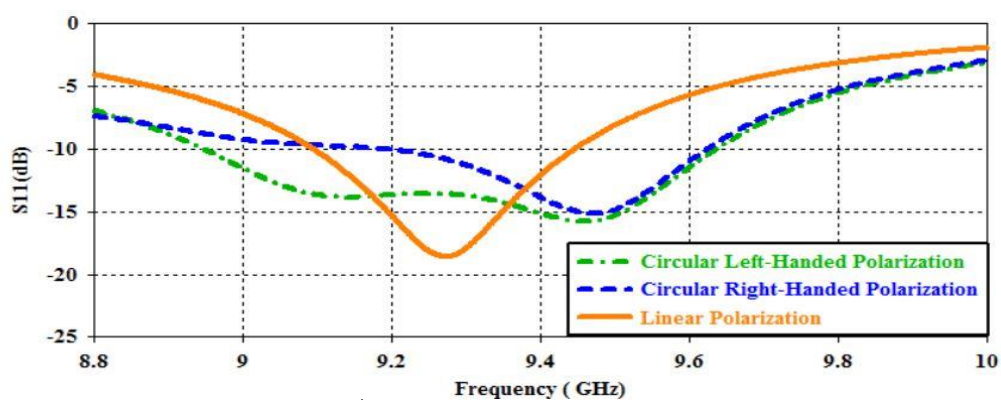


■ گرافن

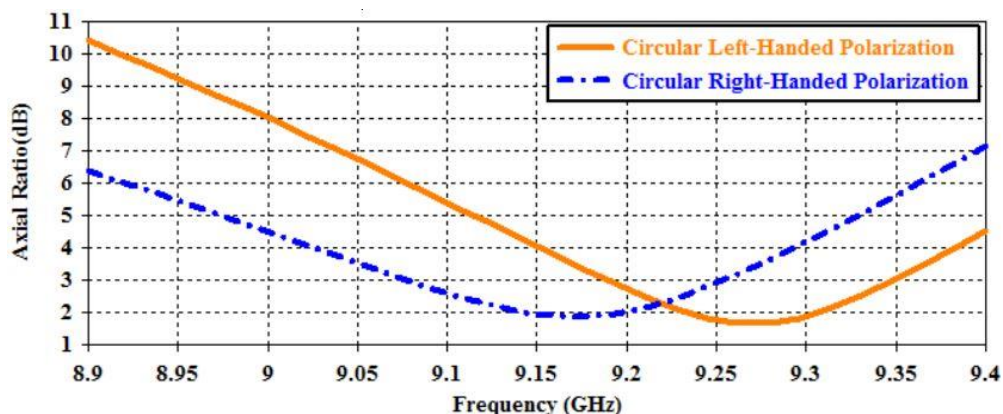
شکل ۳-۸ آنتن پیشنهادی با سه قطبش دایروی چپ‌گرد، دایروی راست‌گرد و خطی باید توجه داشت دو لایه عمود بر هم گرافنی در مرکز پچ مربعی در شکل ۳-۸ هیچ اتصالی با یکدیگر ندارند و در واقع بین این دو لایه یک شیار نازک (با عرض  $0.1$  میلی‌متر) وجود دارد (شکل ۳-۹). دلیل این انتخاب آن است که با توجه به نوع قطبش دایروی راست‌گرد و چپ‌گرد، در هر مرحله تنها یکی از این لایه‌های گرافنی در میانه پچ فعال است (جدول ۳-۶ مشاهده شود) لذا برای تحقق ولتاژ DC تحریک، لازم است دو لایه گرافن به یکدیگر اتصال الکتریکی نداشته باشند. با توجه به توضیحات فوق، در ۳-۸ می‌توان به‌طور هم‌زمان دو سطح ولتاژ متفاوت را به دو لایه گرافن در مرکز پچ اعمال کرد. پهنای باند فرکانسی و پهنای باند نسبت محوری این آنتن در شکل ۳-۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۹-۳ آنتن پیشنهادی با سه قطبش دایروی چپ‌گرد، دایروی راست‌گرد و خطی با شکاف هوایی



(الف)



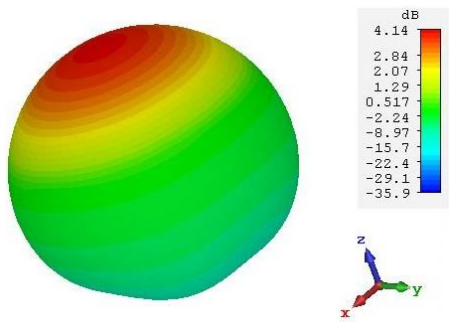
(ب)

شکل ۳-۱۰ الف) پهنای باند امپدانسی آنتن پیشنهادی در سه قطبش خطی و دایروی چپ‌گرد و دایروی راست‌گرد ب) مد محوری آنتن در قطبش دایروی چپ‌گرد و دایروی چپ‌گرد

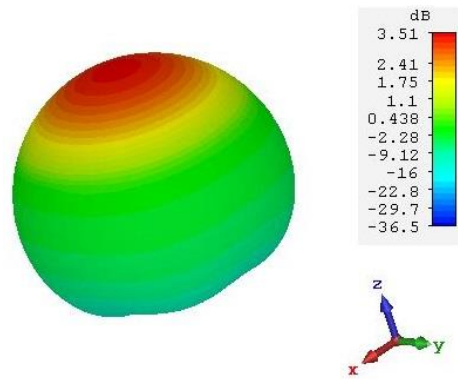
جدول ۳-۶ بازه عملکرد آنتن پیشنهادی در شکل ۳-۶

حالت	سطح گرافنی S2 روشن، مابقی سطوح گرافنی خاموش	سطح گرافنی S1 روشن، مابقی سطوح گرافنی خاموش	تمام سطوح گرافنی روشن
نوع قطبش	دایروی چپ‌گرد	دایروی راست‌گرد	خطی
پهنای باند فرکانسی ( $S_{11} < -10\text{dB}$ )	۸/۹۵-۹/۶۳ GHz	۹/۱۹-۹/۶۲ GHz	۹/۱-۹/۴۴ GHz
پهنای باند فرکانسی قطبش	۹/۱۹-۹/۳۵ GHz	۹/۰۸-۹/۲۵ GHz	۹/۱-۹/۴۴ GHz
مقدار نسبت محوری	کمتر از ۳ دسی‌بل	کمتر از ۳ دسی‌بل	بیشتر از ۴۰ دسی‌بل

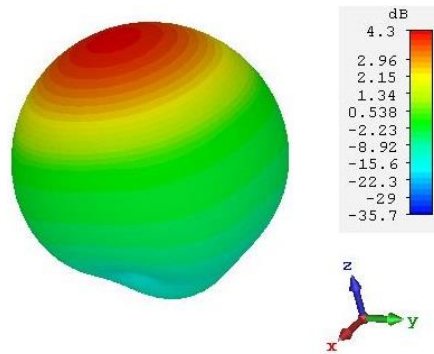
همان‌طور که در شکل ۳-۱۱ دیده می‌شود در فرکانس ۹/۲۲ که هر سه قطبش خطی، دایروی راست‌گرد، دایروی چپ‌گرد قابل دستیابی است شکل پترن تشعشعی تخریب نشده است.



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۳-۱۱ پترن تشعشی آنتن در فرکانس ۹/۲۲ GHz الف) قطبش دایروی چپ‌گرد ب) قطبش دایروی راست‌گرد ج) قطبش خطی

### ۳-۴ ویژگی‌های آنتن طراحی شده

در ساختار آنتن‌های ارائه شده در این پژوهش با استفاده از گرافن امکان تنظیم قطبش در دو یا سه حالت مختلف فراهم شد. از جمله مزیت‌های آنتن پیشنهادی عدم پیچیدگی زیاد شبکه تغذیه و صفحه‌ای بودن ساختار آنتن در مقایسه با سایر نمونه‌ها است. نکته حائز اهمیت دیگر در آنتن پیشنهادی عدم نیاز به

ولتاژ تحریک بالا برای لایه‌های گرافن در مقایسه با سایر کارهای قبلی است [۱۶]. نتایج شبیه‌سازی نشان داد استفاده از گرافن جهت تنظیم قطبش آنتن، بر سایر پارامترهای تشعشی از جمله تلفات بازگشتی، تأثیر مخربی نداشته است. البته باید توجه داشت که در آنتن طراحی شده پهنای باند مشترک سه پلاریزاسیون کم می‌باشد که این کاستی را با استفاده از تکنیک‌های پهن باند نمودن آنتن‌های ریزنواری می‌توان مرتفع نمود.



# فصل چهارم

کاهنده سطح مقطع ریلاری گرافتر

باقابلیت تنظیم فرکانس

## ۴-۱ مقدمه

امروزه، با توسعه سریع فناوری اختفا، کاهش مقطع رادار<sup>۲۲</sup> (RCS) به سرعت تبدیل به یک موضوع جذاب برای تحقیقات شد. در این راستا، برخی از کارهای انجام شده برای معرفی ساختارهای جدید با هدف کاهش حساسیت RCS به زاویه یا قطبی شدگی موج برخوردی، افزایش پهنای باند و تنظیم بازه فرکانس عملکرد انجام شده است.

به طور کلی، کاهش RCS به دو روش، با استفاده از مواد جاذب راداری و با تغییر هندسه هدف برای تغییر مسیر موج انعکاسی در جهتی دور از جهت برگشت موج بازتاب به دست می آید. یکی از رایج ترین جاذبها برای کاهش RCS، صفحه سالیسبوری با پهنای باند باریک است [۲۵]. ساخت و استفاده از این ساختار با توجه به ضخامت بالا آن در فرکانسهای پایین غیرعملی است. با استفاده از سطوح لمینیت می توان پهنای باند این جاذب را بهبود بخشید، با این حال ساختار سنگین و حجیم مانند جاذب Jaumann خواهد بود [۲۶]. در این مورد، سطوح فرکانس گزین (FSSs) برای کاهش حجم و ضخامت جاذب استفاده می شود [۲۷].

در سالهای گذشته، مطالعات بسیاری انجام شده است تا پهنای باند کاهش RCS را افزایش دهد. در [۲۸، ۲۹]، جوهر و نانو پلاکت های گرافن برای افزایش پهنای باند با ایجاد چند رزونانس مورد استفاده قرار گرفته است. در [۳۰] حداکثر پهنای باند با چیدمان سلول های جدید بر اساس الگوریتم های خاص به دست می آید؛ مانند ساختار معرفی شده در [۳۱] استفاده از عناصر غیرفعال می تواند پهنای باند را افزایش دهد. برای رسیدن به جذب باقابلیت فرکانس تنظیم، ضخامت زیرلایه را می توان تغییر داد [۳۲]. با ترکیب

---

<sup>22</sup> Radar Cross Section

عناصر فعال و سطوح انتخابی فرکانس، یک جاذب قابل تنظیم در [۳۳] ارائه شده است. به تازگی، تحقیقات گسترده‌ای روی طراحی جذب‌های قابل تنظیم با مواد نوین مانند گرافن [۳۰، ۳۵، ۳۴] انجام شده است. کاربرد گرافن فراتر از این حد است، به طوری که برای طراحی و ساخت جاذب سبک شفاف [۳۶، ۳۴] استفاده می‌شود.

از جنبه‌ی اصلاح هندسه هدف، باید اشاره کرد که هم‌زمان با کاهش RCS، کارایی آیرودینامیکی کاهش نمی‌یابد. برای این منظور، سطوح امپدانس مصنوعی استفاده می‌شود که بدون تغییر در ساختار هدف، موج برگشتی را در جهتی دور از مسیر برگشت منعکس می‌کنند، بنابراین RCS را کاهش می‌دهند. در این ساختار اختلاف‌فاز بین میدان بازتابی دو سلول ساختار ۱۸۰ درجه می‌باشد. شکل و ترتیب سلول‌های روی صفحه در تعیین میزان پهنای باند RCS مؤثر است. در ساختار داده‌شده در [۳۷]، با استفاده از یک سلول رسانای مغناطیسی<sup>۲۳</sup> (AMC) و سلول الکترومغناطیسی کامل (PEC) در چیدمان شطرنجی، RCS در پهنای باند باریک کاهش یافته است. پهنای باند را می‌توان با استفاده از دو AMC به جای سلول‌های AMC و PEC افزایش داد. در بیشتر تحقیقات قبلی، مطالعات بر روی شکل عناصر AMC صورت گرفته است [۳۸]. علاوه بر این، تغییر چیدمان دو سلول AMC در ساختار موجب بهبود پهنای باند کاهش RCS شده است. در [۳۹، ۴۰] با تغییر چیدمان سلول‌های AMC، سازه‌های فوق پهن باند پیشنهاد شده‌اند.

در این کار، با استفاده از هدایت قابل تنظیم سطح گرافن در محدوده فرکانس مایکروویو، قابلیت تنظیم فرکانس به ساختار ارائه شده در [۳۹] اضافه شده است که ویژگی‌هایی مانند پهنای باند و زاویه گسترده دارد. هدف اصلی این مطالعه بررسی توانایی گرافن در طراحی ساختارهای کاهش RCS با فرکانس قابل تنظیم است.

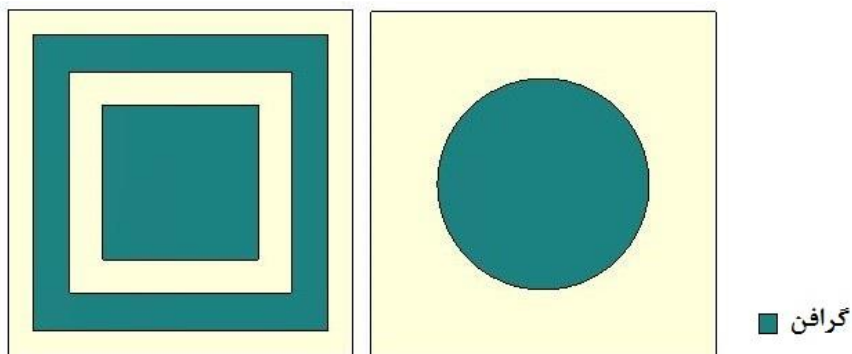
---

<sup>23</sup> Artificial Magnetic Conductor

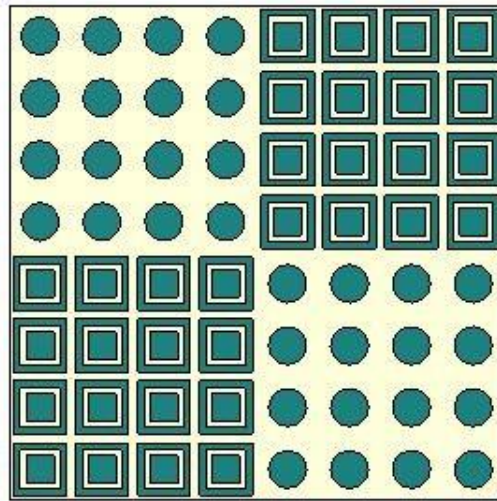
## ۲-۴ طراحی کاهش سطح RCS قابل تنظیم و نتایج شبیه‌سازی شده

همان‌طور که در شکل ۱-۴ و ۲-۴ دیده می‌شود ساختار پیشنهادی شامل دو نوع سلول‌های AMC است که با چیدمان شطرنجی مرتب می‌شوند. در این پژوهش از زیرلایه RT / duroid-5880 dielectric با ضخامت ۶/۳۵ میلی‌متر و ثابت دی‌الکتریک ۲/۲ استفاده می‌شود. در این ساختار، سلول‌های AMC از گرافن نشان داده شده در شکل ۱-۲ با پارامترهای ذکر شده در جدول ۱-۳ ساخته شده‌اند. در شکل ۳-۴ اختلاف فاز بین دو سلول و پهنای باند کاهش RCS ساختار با سلول‌های AMC از جنس PEC نشان داده شده است.

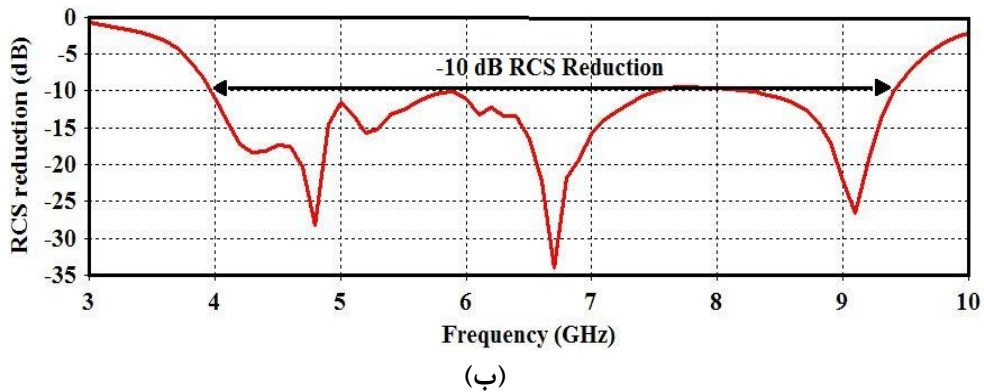
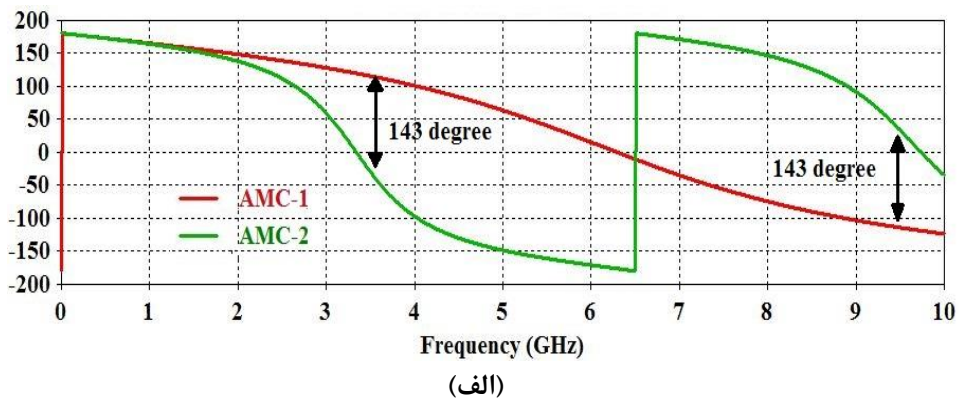
همان‌طور که در شکل ۴-۴ نشان داده شده است، تفاوت فاز این سلول‌ها در محدوده فرکانس ۳/۸۷ تا ۹/۱۶ جایی است که DC ولتاژ ۲۵ ولت است؛ بنابراین، RCS در این محدوده می‌تواند زیر ۱۰-dB کاهش یابد، همان‌طور که در شکل ۴-۴ (ب) نشان داده شده است.



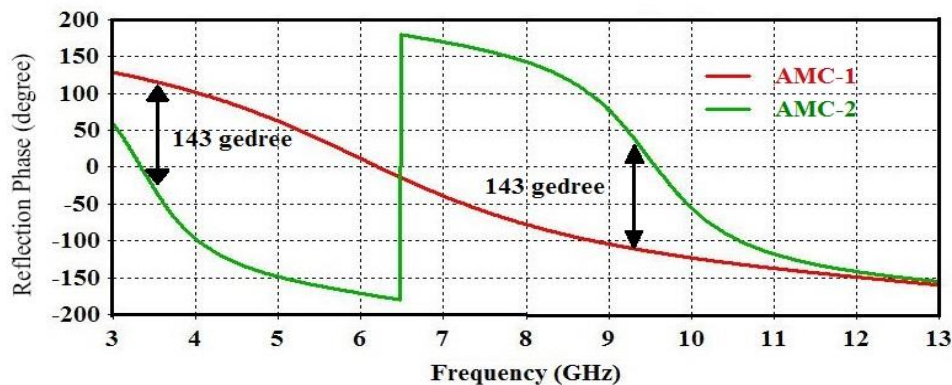
شکل ۱-۴ سلول‌های AMC-1 و AMC-2 ساختار پیشنهادی



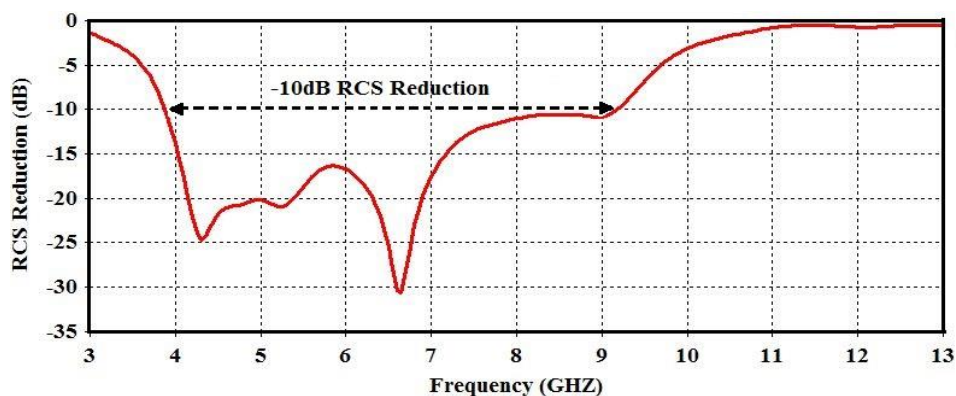
شکل ۴-۲ ساختار کاهنده RCS پیشنهادی



شکل ۴-۳ ساختار با سلول‌های PEC (الف) اختلاف فاز دو سلول AMC (ب) کاهش RCS



(الف)

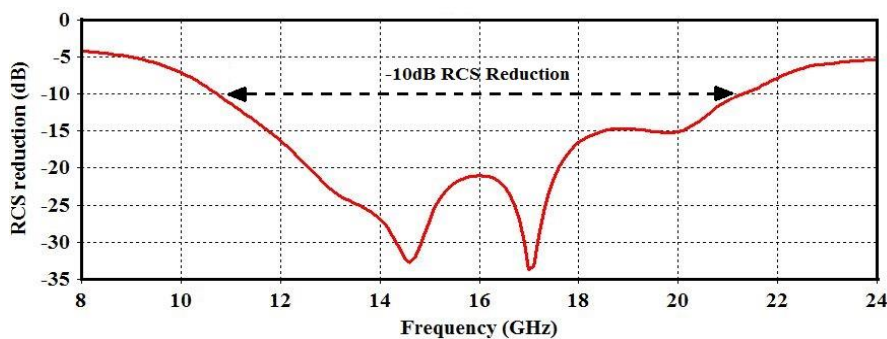


(ب)

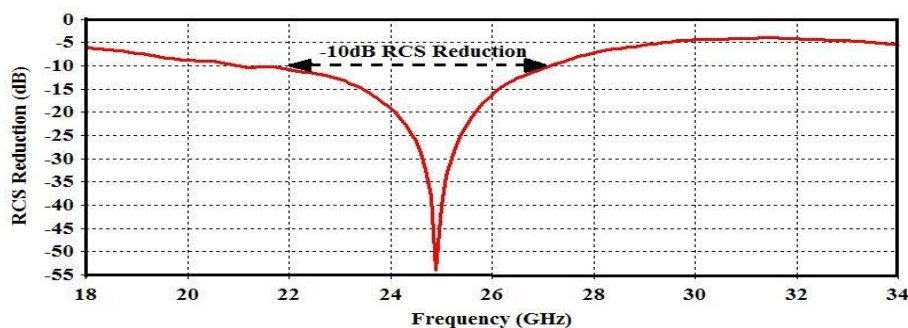
شکل ۴-۴ (الف) فاز برگشتی AMC-1 به عنوان تابعی از فرکانس RCS

(ب) کاهش ساختار پیشنهادی در برخورد مستقیم و ولتاژ بایاس ۲۵ ولت

امپدانس سطح هر یک از سلول‌های AMC بستگی به امپدانس سطح گرافن دارد. بر اساس معادلات (۳-۱) الی (۵-۱)، امپدانس سطحی مختلط گرافن با یک ولتاژ DC به صورت غیرخطی تغییر می‌کند. در این حالت، محدوده فرکانس کاهش RCS را می‌توان تغییر داد. شکل (۴-۵) کاهش RCS ساختار پیشنهادی را در شکل برای ولتاژهای مختلف DC نشان می‌دهد. در ولتاژ ۰/۱ ولت، فرکانس کاهش RCS به ۳/۲۱-۷۵/۱۰ و برای ولتاژ ۰/۸ ولت محدوده فرکانس به ۱۶/۲۷-۲۱ تغییر می‌کند.



(الف)

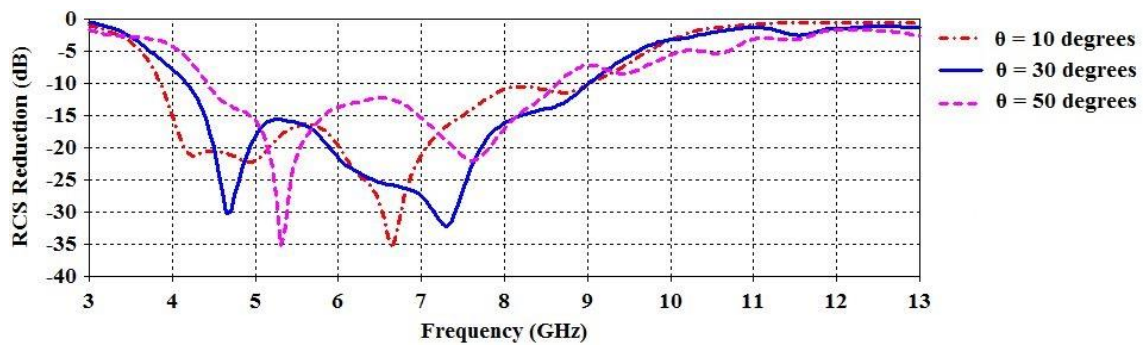


(ب)

شکل ۴-۵ کاهش RCS ساختار پیشنهادی در برخورد مستقیم الف) ولتاژ بایاس ۰/۱ ولت ب) ولتاژ بایاس ۰/۸ ولت

ولت

نتایج داده شده در شکل ۴-۴ و ۵-۴ نشان می دهد که ساختار مبتنی بر گرافن پیشنهاد شده می تواند محدوده فرکانس کاهش RCS را از ۴ تا ۲۷ گیگاهرتز تغییر دهد. تمام نتایج بالا برای برخورد نرمال است که در آن زاویه برخورد صفر درجه است. برای برخورد مورب، امپدانس سطح AMC ها و امپدانس موج ورودی به عنوان تابعی از زاویه برخورد تغییر می کنند [۳۹]. شکل ۴-۶ و جدول ۴-۱ پهنای باند کاهش RCS را برای زوایای مختلف حادثه در ولتاژ DC ثابت نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که پهنای باند کاهش RCS برای زوایای حادثه بالاتر کاهش می یابد.



شکل ۴-۶- کاهش RCS برای زوایای برخورد مختلف در ولتاژ بایاس ۲۵ ولت

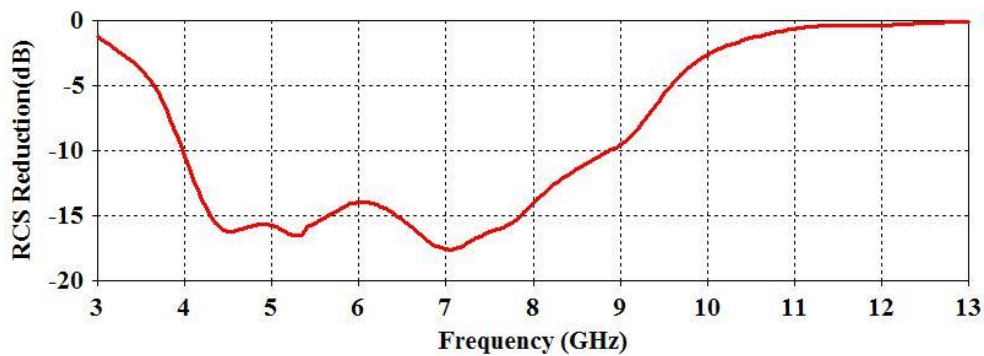
جدول ۴-۱- پهنای باند کاهش RCS برای زوایای برخورد مختلف در ولتاژ بایاس ۲۵ ولت

زاویه برخورد	پهنای باند کاهش RCS (%)
۱۰°	۷۹/۹
۲۰°	۸۰/۹
۳۰°	۷۳/۵
۴۰°	۶۶/۶
۵۰°	۶۴/۸
۶۰°	۵۰/۳

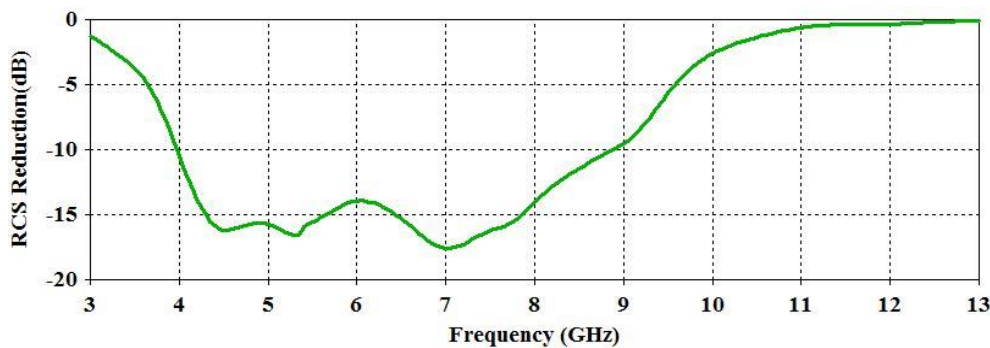
این ساختار در برابر امواج TE و TM به شکل مشابهی رفتار می‌کند. شکل ۴-۷ که کاهش RCS ساختار

برای مد TE و TM را نشان می‌دهد تائید کننده عدم حساسیت ساختار به قطبش موج برخوردی است.





(الف)



(ب)

شکل ۴-۷- کاهش RCS ساختار در ولتاژ بایاس ۲۵ ولت (الف) مد TE (ب) مد TM

## ۴-۳ ویژگی‌های ساختار پیشنهادی

در این پژوهش، یک ساختار AMC مبتنی بر گرافن برای کاهش RCS پیشنهاد شده است. به عنوان مزیت اصلی، محدوده فرکانس کاهش RCS را می‌توان با ولتاژ تعویض DC گرافن تنظیم کرد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که باند فرکانس تنظیم فرکانس ۴ گیگاهرتز تا ۲۷ گیگاهرتز برای ساختار پیشنهاد شده است. تأثیر زوایای حادثه بر کاهش RCS در ساختار پیشنهادی در نظر گرفته شده است. شبیه به ساختار معمول AMC، پهنای باند کاهش RCS با افزایش زاویه حادثه کاهش می‌یابد. عملکرد ساختار برای قطبش‌های مختلف نیز یکسان می‌باشد.



# فصل پنجم

کاهنده سطح مقطع رولاری

گرفتن فوق پهنسباند

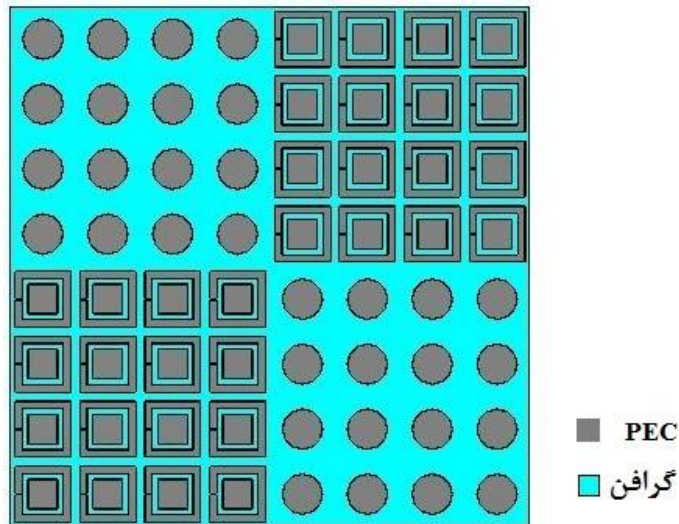
## ۵-۱ مقدمه

در فصل گذشته به تفصیل در زمینه انواع راهکارهای کاهش RCS توضیح داده شد. در این فصل به معرفی ساختاری با قابلیت کاهش سطح مقطع راداری در بازه فرکانسی ۰ تا ۶۰ گیگاهرتز می‌پردازیم.

## ۵-۲ ساختار کاهنده RCS فوق پهن باند

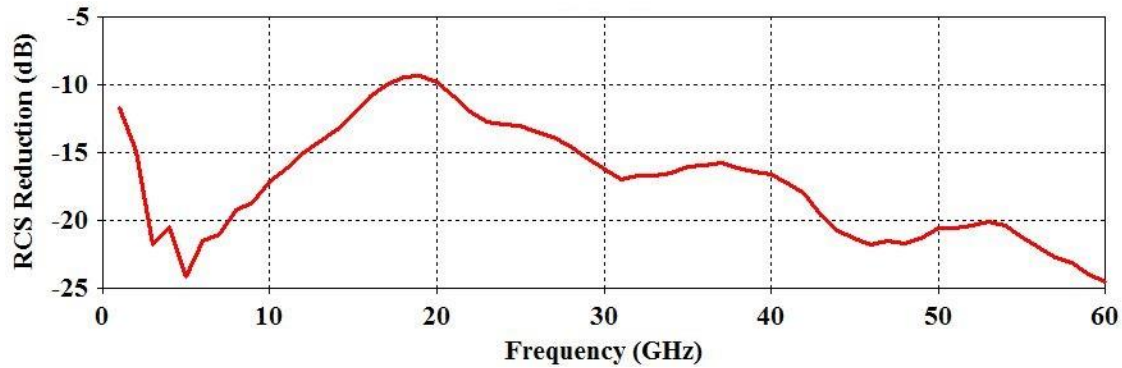
در ساختار ارائه شده در فصل ۴ با ساخت سلول‌های AMC از گرافن و کنترل ولتاژ DC آن توانستیم ساختاری با قابلیت تنظیم فرکانس ارائه دهیم. در این طرح به جای ساخت سلول‌ها از گرافن، یک لایه گرافن روی زیرلایه اصلی و به عنوان لایه زیرین سلول‌ها قرار داده شده است.

شکل ساختار در شکل ۵-۱ نشان داده شده است.



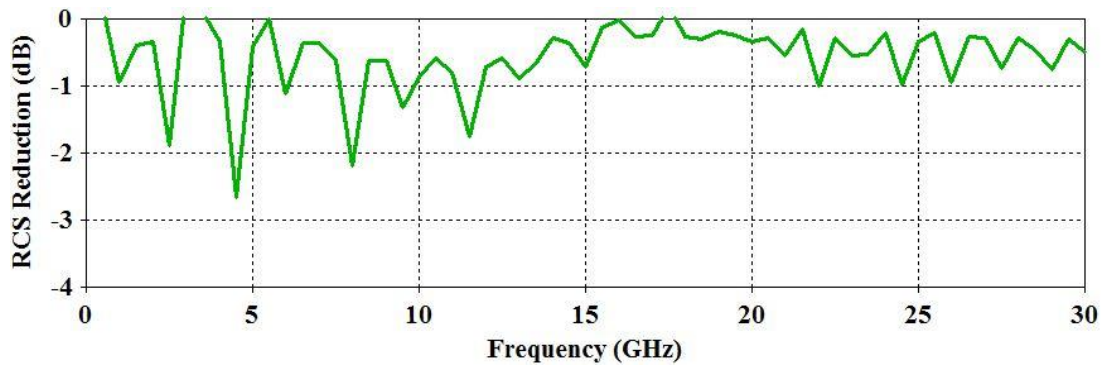
شکل ۵-۱ ساختار کاهنده RCS فوق پهن باند

با تنظیم ولتاژ بایاس گرافن بر روی ۰/۱ ولت رفتار سطح به صورت نمایش داده شده در شکل ۲-۵ می باشد و در فرکانس ۰ تا ۶۰ گیگاهرتز RCS کمتر از  $-10\text{ dB}$  می باشد.



شکل ۲-۵- کاهش سطح مقطع راداری در ساختار پیشنهادی در ولتاژ بایاس ۰/۱ ولت

این در حالی است که با اعمال ولتاژ ۲۵ ولت این ساختار مانند یک سطح PEC عمل می کند و همان طور که در شکل ۳-۵ دیده می شود مقدار کاهش RCS برابر با صفر است.



شکل ۳-۵- کاهش سطح مقطع راداری در ساختار پیشنهادی در ولتاژ بایاس ۲۵ ولت

## ۵-۳ ویژگی‌های ساختار پیشنهادی

در این طرح، یک ساختار فوق پهن باند مبتنی بر گرافن برای کاهش RCS پیشنهاد شده است. به عنوان مزیت اصلی، محدوده فرکانس کاهش RCS از صفر تا حداقل ۶۰ گیگاهرتز می‌باشد. تأثیر زوایای حادثه بر کاهش RCS در ساختار پیشنهادی در نظر گرفته شده است. عملکرد ساختار برای قطبش‌های مختلف نیز یکسان می‌باشد.

- [1] J. Ru Gong, (2011), “Graphene – Synthesis, Characterization, Properties and Applications”, InTech, Croatia,pp.4.
- [2] Andre U. Sokolnikov, (2017), “Graphene for Defense and Security”, CRC Press, UK.,pp.43-72.
- [3] V. P. Gusynin,S.G. Sharapov and J. P. Carbotte.(2006) "Magneto-optical conductivity in graphene," J. Phys. ,19, 2.
- [4] C. N. Alvarez, R. Cheung and J. S. Thompson (2017) “Performance Analysis Of Hybrid Metal-Graphene Frequency Reconfigurable Antennas In The Microwave Regime”IEEE Trans Antennas Propag,65,4,pp. 1558 - 1569
- [5] <http://nanoclub.ir>
- [6] M. Aliofkhaezai, N. Ali,W. I. Milne, Cengiz S. Ozkan,S. Mitura and J. L. Gervasoni, (2016),“GRAPHENE SCIENCE HANDBOOK”,Vol. 3,CRC Press, UK., pp. 19-25.
- [7] John Edward Proctor, Daniel Alfonso Melendrez Armada and Aravind Vijayaraghavan, (2017), “An Introduction to Graphene and Carbon Nanotubes”, CRC Press, UK., pp.151-161.
- [8] H. Zhang, Y. Jiang, J. Wang, W. Cao, X. Gao, X. Yu and L. Wang (2016) “A broadband Terahertz antenna using Graphene”, ISAPE, Guilin, China
- [9] B. Xu, Changqing. Gu, Z. Li, L. Liu and Z. Niu (2014) “A Novel Absorber With Tunable Bandwidth Based on Graphene”IEEE Antennas Wirel Propag Lett,13,pp. 822 – 825.
- [10] J. Ghosh and S. R. B. Chaudhuri (2018) “Design of Graphene Metasurface to Mitigate Mutual Coupling in Monopole antenna at Lower THz Frequency”, ICMAP, Dhanbad, India.
- [11] G. Moreno, H. M. Bernety and A. B. Yakovlev (2016) “Reduction of Mutual Coupling between Strip Dipole Antennas at Terahertz Frequencies with an Elliptically Shaped Graphene Monolayer” IEEE Antennas Wirel Propag Lett,15,pp. 1533 – 1536.

- [12] H. Giddens, L. Yang, J. Tian, and Y. Hao(2018) “Mid-Infrared Reflect-Array Antenna with Beam Switching Enabled by Continuous Graphene Layer” IEEE Photonics Technol Lett,30,8,pp. 748-751.
- [13] M. E. Morote, J. S. Gómez-D’iaz and J Perruisseau-Carrier (2014) “Sinusoidally Modulated Graphene Leaky-Wave Antenna for Electronic Beamscanning at THz” IEEE Trans Terahertz Sci Technol,4,1,pp. 116-122.
- [14] H. Chen, Z.G. Liu, W.B. Lu, A.Q. Zhang, X.B. Li and J. Zhang (2018) “Microwave Beam Reconfiguration Based on Graphene Ribbon” IEEE Trans Antennas Propag.
- [15] R. Yuan, Y. N. Jiang, S. M. Li, W. P. Cao, X. Gao, X. H. Yu, and Y. Wang (2015) “A bandwidth broadened pattern-reconfigurable antenna based on graphene”, ICCP, Guilin,China.
- [16] C. N. Alvarez, R. Cheung and J. S. Thompson (2015) “Polarization Reconfigurable Antennas Using Graphene for Microwave Applications”, ICUWB, Montreal, QC, Canada.
- [17] X. Zhang, G. Auton, K. Pan, E. Hill, H. Ouslimani and Z. Hu (2017) “On the Study of Monolayer Graphene Resonator and Antenna for Wireless Applications”, IMWS AMP, Pavia, Italy.
- [18] K. Xu, Y. Xie, H. Xie, Y. Liu, Y. Yao, J. Du, Z. He and Q. Song (2018) “High-Speed Traveling-Wave Modulator based on Graphene and Microfiber” J Lightwave Technol, 99,pp. 1-6.
- [19] B. Wu, Y. Zhang, Y. Zhao, W. Zhang and L. He (2018) “Compact Nine-Way Power Divider With Omnidirectional Resistor Based on Graphene Flake” IEEE Microw Wirel Compon Lett.,99,pp. 1-3.
- [20] A.Q. Zhang, W.B. Lu, Z.G. Liu, H. Chen and B.H. Huang (2018) “Dynamically Tunable Substrate-Integrated Waveguide Attenuator Using Graphene”IEEE Trans Microw Theory Tech, 66,6,pp. 3081 - 3089.
- [21] A.Lamminen, K. Arapov, G. de With, S. Haque, H. G. O. Sandberg, H. Friedrich, and V. Ermolov(2017) “Graphene-Flakes Printed Wideband Elliptical Dipole Antenna for Low Cost Wireless Communications Applications” IEEE Antennas Wirel Propag Lett, 99.



- [22] X. Huang, K. Pan and Z. Hu (2016) “Experimental Demonstration of Printed Graphene Nano-flakes Enabled Flexible and Conformable Wideband Radar Absorbers” *Sci Rep.*,6,pp. 1-8.
- [23] D. Li and E.P. Li (2016) “A tunable antenna based on loaded graphene sheets for GHz application” *URSI AP-RASC*, South Korea, 21-25.
- [24] Naghdehforushha, G. Moradi(2017) “Design of plasmonic rectangular ribbon antenna based on graphene for terahertz band communication” *IET Microw Antennas Propag*,12,5,pp. 804-807.
- [25] L. Fante R. and T. McCormack M. (1988) “Reflection Properties of the Salisbury Screen” *IEEE Trans Antenna Propag*, 36,10,pp. 1443 - 54.
- [26] Du Toit L. J. (1994) “The design of Jauman absorber designs” *IEEE Antennas Propag Mag*, 36,6,pp. 17 – 25.
- [27] Singh D, M. Srivastava V. (2018) “Analysis of RCS for Dual Band Slotted Patch Antenna with a Thin Dielectric Using Shorted Stubs Metamaterial Absorber” *AEU - Int J Electron Commun*,90, pp. 53-62.
- [28] Chaoning G, Yannan J, Jun Z, Weiping C, Xi G, Xinhua Y, Jiao W (2016)“Graphene-based Wideband Absorbing Screen with Radar Cross Section Reduction” *ISAPE*, China.
- [29] Olszewska-Placha M, Salski B, Janczak D, R Bajurko PR, Gwarek W, Jakubowska M. (2015) “A Broadband Absorber With a Resistive Pattern Made of Ink With Graphene Nano-Platelets” *IEEE Trans Antennas Propag*, 63,2,pp. 565 – 72.
- [30] Torabi ES, Fallahi A, Yahaghi A.(2017) “Evolutionary Optimization of Graphene-Metal Metasurfaces for Tunable Broadband Terahertz Absorption” *IEEE Trans Antennas Propag*,65, 3,pp. 1464 – 7.
- [31] Zheng Q R, Yan Y M, Cao X Y, Yuan N C (2008) “High Impedance Ground Plane (HIGP) Incorporated with Resistance for Radar Cross Section (RCS) Reduction of Antenna” *Prog Electromagn Res*,84,pp. 307-19.
- [32] Heijun J, Manos MT, Sungjoon L. (2018) “Frequency-Tunable Electromagnetic Absorber by Mechanically Controlling Substrate Thickness” *Int J Antennas Propag*.

- [33] Xu W, He Y, Kong P, Li J, Xu H, Miao L, Bie S, Jiang J. (2015) “An ultra-thin broadband active frequency selective surface absorber for ultrahigh-frequency applications” *J Appl Phys*, 118,18.
- [34] Mingyue G, Binggang X, Sanshui X. (2018) “Tunable THz perfect absorber with two absorption peaks based on graphene microribbons” *IET Micro & Nano Letters*,13,5,pp. 631 – 5.
- [35] D’Aloia A G,D’Amore M, Sarto M S. (2016) “Adaptive Broadband Radar Absorber Based on Tunable Graphene” *IEEE Trans Antennas Propag*, 64,6, pp. 2527-31.
- [36] Rinaldi A, Proietti A, Tamburrano A, Sabrina Sarto M. (2018) “Graphene-Coated Honeycomb for Broadband Lightweight Absorbers” *IEEE Trans Electromagn Compat* ,60,5, pp. 1454-62.
- [37] Paquay M, Iriarte J-C, Ederra I, Gonzalo R,de Maagt P. (2007) “Thin AMC Structure for Radar Cross-Section Reduction” *IEEE Trans Antennas Propag*,55,12,pp. 3630-38.
- [38] Ameri E, Esmali S H, Sedighy S H (2018) “Wide Band Radar Cross Section Reduction by Thin AMC Structure” *AEU - Int J Electron Commun*, 93,pp. 150-3.
- [39] Y. Modi A,Balanis C A,R. Birtcher C, Shaman H (2017) “Novel Design of Ultra-Broadband Radar Cross Section Reduction Surfaces using Artificial Magnetic Conductors” *IEEE Trans Antennas Propag*,65,10,pp. 5406-17.
- [40] Edalati A, Saraband K. (2014) “Wideband, Wide Angle, Polarization Independent RCS Reduction Using Nonabsorptive Miniaturized-Element Frequency Selective Surfaces” *IEEE Trans Antennas Propag* , 62, 2,pp. 747-54.

## **Abstract**

In this study, four novel structures are introduced using graphene surfaces. Two new microstrip antenna with the capability of tuning polarization between linear, right-handed and left-handed polarization are proposed. The main idea in the proposed antennas structure is the use of several narrow graphene strips in the middle sections and edges of a common square patch. Graphene tapes are activated and deactivated by two different levels of DC voltage, depending on the change in graphene surface impedance. The simulation results show that the proposed antennas can change the polarization of radiation in two or three different modes in the X band. However, the change in graphene bias voltage does not have a damaging effect on other antenna parameters.

The third proposed structure is a radar cross-section reducer with adjustable working frequency. The main idea behind the design is to change the frequency of the broadband structure by changing the impedance of the AMC cells. This is accomplished by using the graphene conductivity controllability through the use of an electrical bias. Using three levels of bias voltage, the RCS can reduce the RCS value in 3.87 to 27.16 GHz to less than -10dB in three different bandwidths.

In forth proposed design, by using graphene as second substrate, an ultra-wideband structure in order to reduce RCS is designed that which can reduce the RCS in 0-60 GHz to at least -8dB. These structure is not sensitive to the angle of incident wave, and acts in both modes of transmission of TE and TM similarly .

### **key words:**

Graphene, Reduced radar cross-section, Adjustable, Synthetic magnet conductor, Broadband, Antenna, Linear polarization, Circular polarization.



**Shahrood University of  
Technology**

**Faculty of Electrical and Robotics Engineering  
M.Sc. Thesis in Electromagnetic Wave and Field Engineering**

# **Application of Graphene Surfaces on Design of Microstrip Antenna on Microwave band**

**By  
Afsaneh Sedighi**

**Supervisor  
Dr. J. Ghalibafan**

**November 2018**