

پایان نامه کارشناسی ارشد

رشته مهندسی برق گرایش مخابرات

عنوان پایان نامه :

طراحی و شبیه سازی تغییر دهنده قطبش

مبتنی بر فرا سطح ها

استاد راهنما :

نگارش :

با تقدیر و سپاس از استاد مهربان و دلسوزم

که با صبر و حوصله زیاد در انجام این پروژه مرا یاری کردند .

چکیده

قطبش امواج رادیویی یکی از مباحث بنیادین در بررسی عملکرد امواج انتشار یافته از یک آنتن فرستنده در داخل یک خط انتقال محدود با فضای آزاد میباشد. در یک ارتباط رادیویی هر گونه تغییری در قطبش موج در مسیر انتشار، کاهش سطح سیگنال دریافتی گیرنده را در پی خواهد شد. لذا شناخت مفاهیم مقدماتی قطبش، انواع مختلف آن و نحوه ایجاد قطبش های مختلف و نیز بررسی تغییرات شکل آن در هنگام عبور، انعکاس و پراکندگی در محیط های مختلف بسیار ضروری است. نظر به وجود چندین نوع پلاریزاسیون و مزایا و معایب هر کدام باید به دنبال راهکاری برای تغییر و تبدیل انواع پلاریزاسیون به همدیگر وجود داشته باشد. در این پایان نامه، امکان تبدیل پلاریزاسیون امواج EM در بازه 4-20 GhZ مورد بررسی قرار گرفته است. روش تبدیل پیشنهادی، استفاده از فراسطح ها میباشد. همچنان یک طرح و یا به عبارتی ساختاری از یک فراسطح در این پایان نامه معرفی میگردد که در محیط نرم افزار Cst Studio 2022 شبیه سازی شده و نتایج آن مورد تحلیل و بررسی قرار خواهد گرفت.

فهرست مطالب

| | |
|----|--|
| ۱ | فصل اول : مقدمه..... |
| ۲ | ۱-۱ قطبش امواج الکترومغناطیسی..... |
| ۳ | ۱-۱-۱ قطبش خطی..... |
| ۳ | ۱-۱-۲ قطبش دایروی..... |
| ۴ | ۱-۱-۳ قطبش بیضوی |
| ۵ | ۱-۲-۱-۲ فرا موادها |
| ۵ | ۱-۲-۱ تاریخچه |
| ۶ | ۱-۲-۲ مبانی فیزیکی فراسطحی |
| ۶ | ۱-۲-۳ فناوری پلاسمونیک..... |
| ۸ | ۱-۳-۱-۳ قانون اسنل..... |
| ۹ | ۱-۳-۱-۱ قانون اسنل در فراسطحها..... |
| ۱۱ | ۱-۳-۲ کاربردهای مختلف فراسطح ها..... |
| ۱۲ | فصل دوم : انواع تغییر قطبش |
| ۱۲ | ۲-۱ مقدمه |
| ۱۲ | ۲-۲ تبدیل قطبی متقابل |
| ۱۳ | ۲-۳ تبدیل قطبش دایروی به خطی |
| ۱۴ | فصل سوم : طراحی و ساختار فراسطحها..... |

| | | |
|----|-------|--------------------------|
| ۱۵ | | ۳-۱ مقدمه |
| ۱۵ | | ۳-۲ نوسانگرهای حلقه شکاف |
| ۱۹ | | ۳-۲-۱ مدار معادل SRR |
| ۲۱ | | فصل چهارم : شبیه سازی |
| ۲۲ | | ۴-۱ طرح پیشنهادی |
| ۲۵ | | ۴-۲ شبیه سازی |
| ۳۱ | | مراجع |

شکلها

- شکل (۱-۱) نمودار شماتیک قطبش خطی ۳
- شکل (۱-۲) نمودار شماتیک قطبش دایروی ۴
- شکل (۱-۳) نمودار شماتیک قطبش بیضوی ۴
- شکل (۱-۴) عملکردهای مختلف فراسطحها ۸
- شکل (۱-۵) قانون اسنل ۹
- شکل (۱-۶) تابش نور به فراسطح ۱۰
- شکل (۲-۱) قطبش در فراسطحها ۱۳
- شکل (۲-۲) نمودار مفهومی فراسطح ها برای تبدیل پلاریزاسیون ۱۳
- شکل (۳-۱) نمونه یک نوسانگر حلقه شکاف ۱۶
- شکل (۳-۲) مدار معادل انواع نوسانگر حلقه شکاف ۱۷
- شکل (۳-۳) SRR دو حلقه ای ۱۸
- شکل (۴-۱) طرح پیشنهادی برای فراسطح ۲۲
- شکل (۴-۲) ابعاد نوسان کننده حلقه شکاف ۲۳
- شکل (۴-۳) پیاده سازی در محیط cst ۲۳
- شکل (۴-۴) تنظیم پارامترهای Background ۲۴
- شکل (۴-۵) تعریف شرایط مرزی ۲۴
- شکل (۴-۶) میدان الکتریکی تابشی در فرکانس ۴ گیگاهرتز ۲۵

- شکل (۴-۷) میدان الکتریکی منعکس شده در فرکانس ۴ گیگاهرتز ۲۶
- شکل (۴-۸) میدان الکتریکی تابشی در فرکانس 20 GHZ ۲۶
- شکل (۴-۹) میدان الکتریکی منعکس شده در فرکانس 20 GHZ ۲۷
- شکل (۴-۱۰) میدان الکتریکی تابشی در فرکانس 12GHZ ۲۷
- شکل (۴-۱۱) میدان الکتریکی منعکس شده در فرکانس 12 GHZ ۲۸
- شکل (۴-۱۲) تغییر قطبش در زوایای مختلف ۲۹
- شکل (۴-۱۳) جریانهای سطحی در فرکانس 4GHZ ۲۹
- شکل (۴-۱۴) جریانهای سطحی در فرکانس 12 GHZ ۳۰

فصل ١ - مقدمه

۱.۱ قطبش امواج الکترومغناطیسی

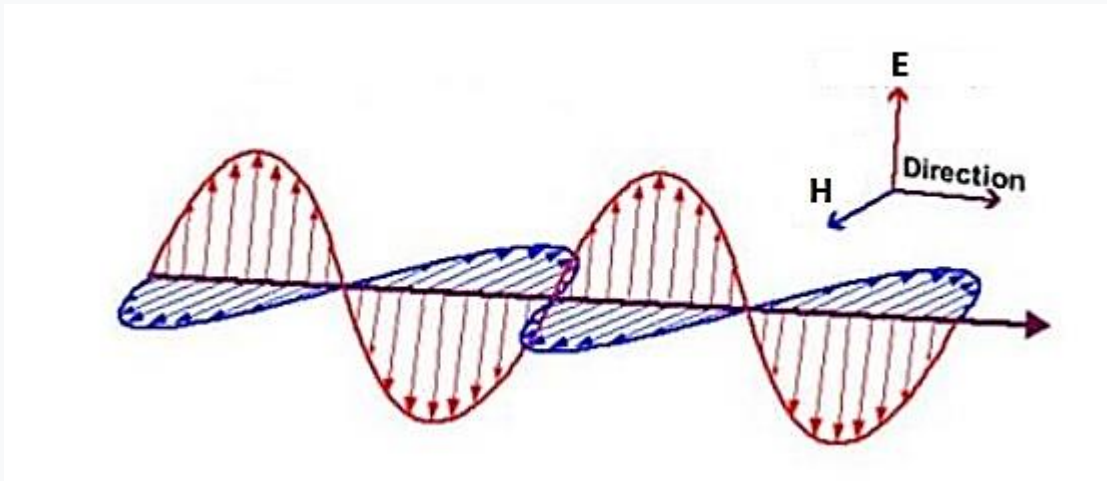
همانطور که میدانید ، امواج الکترومغناطیسی ، ترکیبی از امواج الکتریکی و مغناطیسی عمود بر هم هستند که قابلیت انتشار با سرعت نور در خلاء را دارند. از دیدگاه کوانتومی ، امواج الکترومغناطیسی از طریق فوتون ها منتشر می شوند و ذراتی هستند که با سرعت نور در خلاء حرکت می کنند. فوتون که معمولاً با نماد γ نمایش داده میشود، یک ذره بنیادی است. فوتون یک کوانتوم یا به عبارتی کمترین مقدار قابل اندازه گیری در یک میدان الکترومغناطیسی مانند تابش الکترومغناطیسی ، نور و امواج رادیویی محسوب می شود و همچنین در نقش حامل نیرو برای نیروی الکترومغناطیس نیز عمل می کند. فوتون ها فاقد جرم هستند و اگرچه سرعت فوتون به محیط بستگی دارد اما در محیط خلأ، همواره با سرعتی معادل $299'792$ کیلومتر بر ثانیه که بسیار نزدیک به سرعت نور است ، حرکت می کنند.

قطبش یک آنتن ، متناسب با جهت میدانهای الکتریکی تشعشع شده توسط آنتن میباشد. یک دو قطبی نیم-طول موج را فرض کنید که به صورت عمودی در بالای زمین قرار دارد. این دو قطبی میدان های تشعشع شده ای در میدان دور تولید خواهد کرد و این میدانهای الکتریکی تشعشع شده به صورت $E_{\theta}(\theta, \varphi)$ خواهد بود در این مورد قطبش دو قطبی ، قطبش عمودی نام دارد. از سویی دیگر ، اگر یک دو قطبی نیم طول موج به صورت افقی در بالای زمین قرار گیرد ، میدانهای الکتریکی تشعشع شده آنتن در میدان دور $E_{\varphi}(\theta, \varphi)$ میشوند. قطبش آنتن نیز در اینصورت ، قطبش افقی نام خواهد داشت. هم قطبش افقی و هم عمودی ، قطبش های خطی هستند. آنتن های قطبش خطی اغلب در ارتباطات بی سیم زمینی مورد استفاده قرار میگیرند. به منظور ایجاد قطبش دایروی ، دو مولفه متعامد میدان الکتریکی در ناحیه میدان دور مورد نیاز می باشد. میدان الکتریکی تشعشع شده توسط آنتن را میتوان به صورت زیر نوشت: [2]

$$\vec{E}(\theta, \varphi) = \vec{\theta} E_{\theta}(\theta, \varphi) e^{j\phi_1} + \vec{\varphi} E_{\varphi}(\theta, \varphi) e^{j\phi_2} \quad (1-1)$$

۱.۱.۱ قطبش خطی

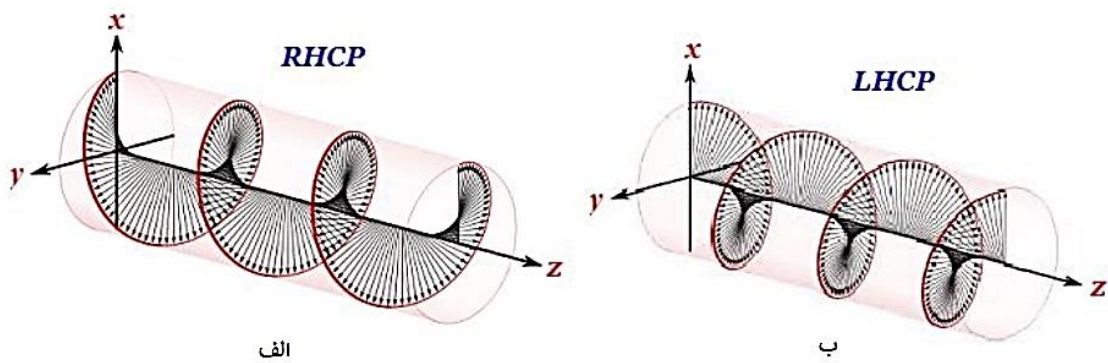
اگر در یک موج الکترومغناطیسی در حال انتشار، نوک بردار میدان الکتریکی (یا بردار میدان مغناطیسی) همواره یک خط مستقیم باشد و در واقع همیشه با محور انتشار، زاویه 90° درجه بسازد، در این صورت این موج دارای قطبش خطی است. شکل ۱.۱، بردار میدان الکتریکی و مغناطیسی را در یک چرخه کامل برای قطبش خطی نشان میدهد.



شکل ۱.۱. نمودار شماتیک قطبش خطی

۱.۱.۲ قطبش دایره ای (راست گرد و چپ گرد)

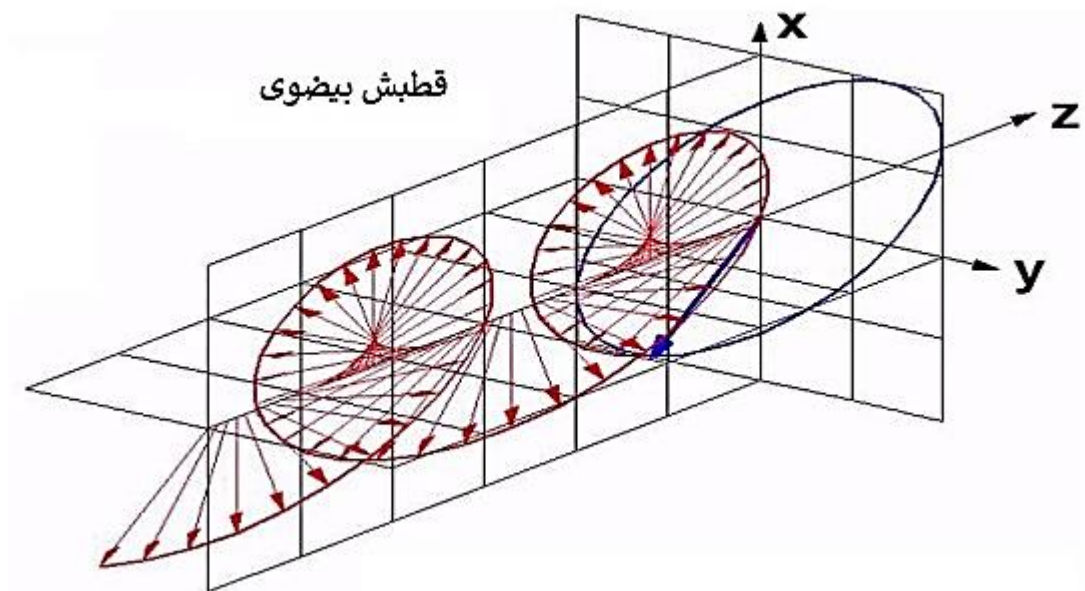
اگر بردار میدان الکتریکی نسبت به محور انتشار امواج، از نگاه یک ناظر که در دور دست و در امتداد مسیر انتشار امواج الکترومغناطیسی قرار گرفته، در جهت حرکت عقربه های ساعت چرخش داشته باشد، گفته میشود که موج، قطبش دایروی راست گرد (RHCP) دارد و اگر این چرخش، در جهت خلاف عقربه های ساعت باشد، چپ گرد (LHCP) نامیده میشود.



شکل ۱.۲. نمایش شماتیک (الف) قطبش دایره ای راست دست و (ب) چپ دست.

۱.۱.۳ قطبش بیضوی

اگر بردار حرکت میدان الکتریکی برای یک دوره تناوب ، تشکیل یک بیضی را بدهد و یا به عبارتی به صورت بیضوی بچرخد در اینصورت قطبش بیضوی خواهیم داشت.



شکل ۱.۳ نمایش شماتیک قطبش بیضوی.

۱.۲- فراموادها:

فرامواد به موادی گفته میشود که مهندسی شده اند و خواص آنها ممکن است در طبیعت یافت نشود. این مواد ویژگیهای خود را از ساختارشان (که به دقت طراحی شده) به دست آورده اند و نه فقط از ترکیباتشان. فرامود معمولاً از ساختارهای متناوب فلزی ساخته شده اند و تناوب ساختار، بسیار کوچکتر از طول موج است و بنابراین به آنها ضریب گذردهی و نفوذپذیری موثر نسبت می دهیم که ساختارشان این مقدار موثر را تعیین می کند. در واقع میتوان اینگونه تصور کرد که هر یاخته واحد (Unit Cell) از ساختار، معادل است با یک فرا اتم که نقش اتم را در مواد معمولی بازی میکند. با طراحی مناسب این فرا-اتم، میتوان مشخصات الکتریکی و مغناطیسی فراماده را تنظیم کرد. در این بخش ابتدا تاریخچه کوتاهی از فرامواد ارائه میدهم.

۱.۲.۱- تاریخچه

در سال ۱۹۶۸ وسلاگو اولین بار کار نظری درباره ماده ای با ضریب شکست منفی ($\epsilon, \mu < 0$) را ارائه داد [1]. وی این مواد را مواد چپ دست نامید زیرا در آنها-جهت بردار سرعت فاز بر خلاف جهت بدست آمده از ضرب خارجی میدان های الکتریکی و مغناطیسی است. به تعبیر دیگر، در این مواد جهت سرعت فاز در خلاف جهت سرعت انتقال توان (یا سرعت گروه) است. چنین ماده ای در طبیعت یافت نمی شود بنابراین میتوان گفت جرقه نظری فرامواد با کار برجسته وسلاگو زده شد.

کار وسلاگو چندان مورد توجه قرار نگرفت زیرا همانطور که ذکر شد در طبیعت مواد با ضریب شکست منفی یافت نمی شود. اما در سال ۱۹۹۶ پندری نشان داد با استفاده از آرایه ای از سیم های فلزی میتوان به صورت مصنوعی ماده ای با ضریب گذردهی منفی ساخت (۲). البته در طبیعت برخی از فلزات مانند نقره، طلا و آلومنیوم در فرکانسهای نوری ضریب گذردهی منفی دارند، اما پندری توانست ساختاری طراحی کند که در هر فرکانس مورد نظر (حتی مایکروویو) ضریب گذردهی منفی داشته باشد.

حلقه مفقوده در ساخت مواد با ضریب شکست منفی ماده ای با نفوذپذیری منفی بود. در سال ۱۹۹۹ پندری و همکارانش توانستند با استفاده از آرایه ای از مشددهای حلقه ای چاکدار (Split-Ring

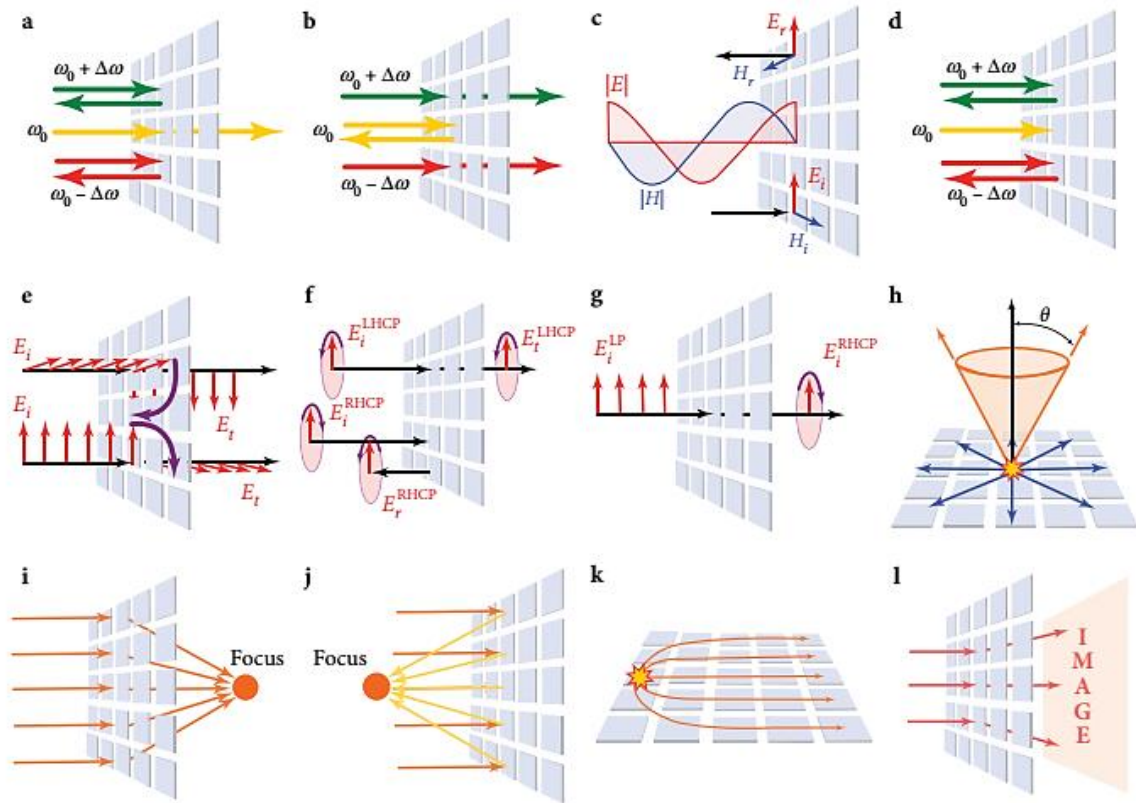
Resonators) موادی با نفوذپذیری مغناطیسی موثر منفی در محدوده فرکانسی مایکروویو تا تراهرتز طراحی کنند. (۳) ایده اصلی از این حقیقت ناشی شده است که اعمال میدان مغناطیسی سبب القاء جریان الکتریکی در یک حلقه فلزی (طبق قانون فارادی) میشود و یک حلقه معمولی که معادل یک سلف است به دلیل قانون لنز با میدان مغناطیسی اعمالی مخالفت می کند و در نتیجه خاصیت دیامغناطیسی (کاهش نفوذ پذیری) از خود نشان می دهد. در حالت عادی این کاهش نفوذ پذیری بسیار ناچیز است اما در SRR به دلیل وجود خاصیت خازنی بین دو حلقه، این کاهش نفوذپذیری به صورت نوسان (حاصل از نوسان سلف و خازن) میتواند رخ دهد و مقدار نفوذپذیری را منفی کند.

۱.۲.۲ مبانی فیزیکی فراسطحی

قبل از معرفی و پیدایش فراسطح ها، دانشمندان تحقیقات خود را بر روی فرامواد متمرکز کرده بودند، ادامه تحقیقات، دانشمندان را به سمت سیستم های فراماده ای مسطح تر حرکت داد که امروزه به عنوان فراسطح شناخته می شوند. فراموادها چند ایراد اساسی دارند که موجب شد تا دانشمندان به سمت مواد فراسطح بروند. فرامواد حجیم قادر به کنترل دقیق امواج الکترومغناطیسی برای طیف امواج نوری و امواج مایکروویو نیستند. به همین دلیل، استفاده از آنها عملاً محدود است. همچنین ساخت فرامواد به صورت عمده دشوار است زیرا معمولاً آنها به صورت پرپودیک و یا آرایه های سه بعدی ساخته میشوند (به خصوص برای نور مرئی). مشخصه ضخامت آنها بسیار زیاد است به طوری که عملکرد آنها در زمان انتشار موج در مسافت های طولانی با تلفات ذاتی و قابل توجه مواجه است. در کل، فراموادها ذاتاً حجیم هستند و بنابراین حتی الامکان سعی میشود از آنها در کاربردهایی نظیر فرالنازها استفاده نشود. در عوض، فراسطح ها توانایی خود را به عنوان جایگزینی مناسب برای فرامواد حجیم با بسیاری قابلیت های دیگر نشان داده اند. [1]

۱.۲.۳- فناوری پلاسمونیک

در سال ۲۰۰۷ موسسه فناوری کالیفرنیا از فناوری جدیدی به نام پلاسمونیک رونمایی کرد. پیش‌بینی می‌شد این فناوری جدید منجر به تولید آشکارسازهای بسیار حساس زیستی شود. در دهه بعد طیف وسیعی از فناوری‌های پلاسمونیکی مورد بررسی قرار گرفت که از مرحله آزمایشگاهی به مرحله تجاری‌سازی رسیدند. این فناوری وابسته به کنترل برهمکنش بین میدان الکترومغناطیسی و الکترون‌های آزاد بر روی یک فلز (معمولاً از جنس طلا و نقره) است؛ در واقع این برهمکنش به رسانندگی فلز و خواص اپتیکی بستگی دارد. الکترون‌های آزاد در سطح فلز پس از برخورد نور با آنها به صورت دسته جمعی نوسان می‌کنند. به این پدیده پلاسمون‌های سطحی می‌گویند. زمانی که نور به یک قطعه فلز با ابعاد بزرگ برخورد می‌کند، میزان زیادی از نور بازتاب داده می‌شود؛ اما اگر ابعاد فلز به کار رفته در حد چند نانومتر باشد، الکترون‌های آزاد فلز محدود شده و تغییرات فرکانسی ناشی از ارتعاش الکترون‌های آزاد محبوس شده در فلز ایجاد می‌شود. میزان تغییرات فرکانسی به اندازه نانوذررات فلزی بستگی دارد. این تغییرات فرکانسی را نوسان می‌نامند. پلاسمون‌ها تنها زمانی می‌توانند با نور فرودی جفت شوند که فرکانس نور فرودی با فرکانس نوسان پلاسمون‌ها هم فرکانس باشد. پدیده نوسان پلاسمون‌های سطحی در طراحی نانواختن‌ها، سلول‌های خورشیدی و غیره کاربرد دارد.

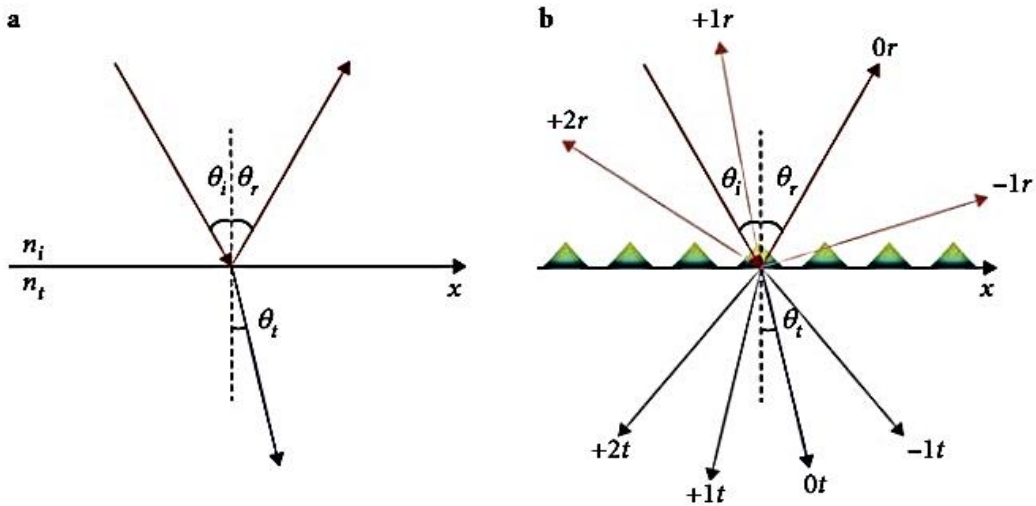


شکل ۱.۴. عملکردهای انتخابی فراسطح ها: (a) سطح انتخابی فرکانس باند، (b) انتخابی فرکانس باند توقف سطح، (c) سطح امپدانس بالا، (d) جاذب کامل باریک، (e) قطبش کننده پیشگی، (f) سطح انتخابی فرکانس قطبش دایره ای راست، (g) مبدل قطبش خطی به دایره، (h) دو موج نشتی ابعادی آنتن با الگوی پرتو مخروطی، (i) آرایه انتقال فوکوس، (j) آرایه بازتابی فوکوس، (k) لنز مسطح Luneburg، (l) هولوگرام.

۳-۱- قانون اسنل

قانون اسنل، در اپتیک، رابطه ای بین مسیر طی شده توسط نور در عبور از مرز یا سطح جدایی بین دو ماده در تماس و ضریب شکست هر یک را شامل می شود. این قانون در سال ۱۶۲۱ توسط ستاره شناس و ریاضیدان هلندی ویلبرورد اسنل (که اسنلیوس نیز نامیده می شود) کشف شد [1]. شرح قانون اسنل تا زمان ذکر آن توسط کریستیان هوگنس در رساله نور منتشر نشد. در شکل ۵-۱، n_i و n_t نشان دهنده شاخص های شکست برای دو محیط هستند و θ_i و θ_t زوایای فرود و شکستی هستند که پرتو تابشی با محور عمودی در مرز ایجاد می کند. قانون اسنل بیان می کند که:

$$\frac{\sin(\theta_i)}{\sin(\theta_t)} = \frac{n_i}{n_t} \quad (1-2)$$



شکل ۱.۵. قانون اسنل (a) رفتار بازتاب کلاسیک برخورد نور به سطح مشترک بین دو محیط با ضریب شکست متفاوت (قانون اسنل)؛ (b) وضعیت مشابه زمانی که ساختار، به طور دوره ای موجدار است

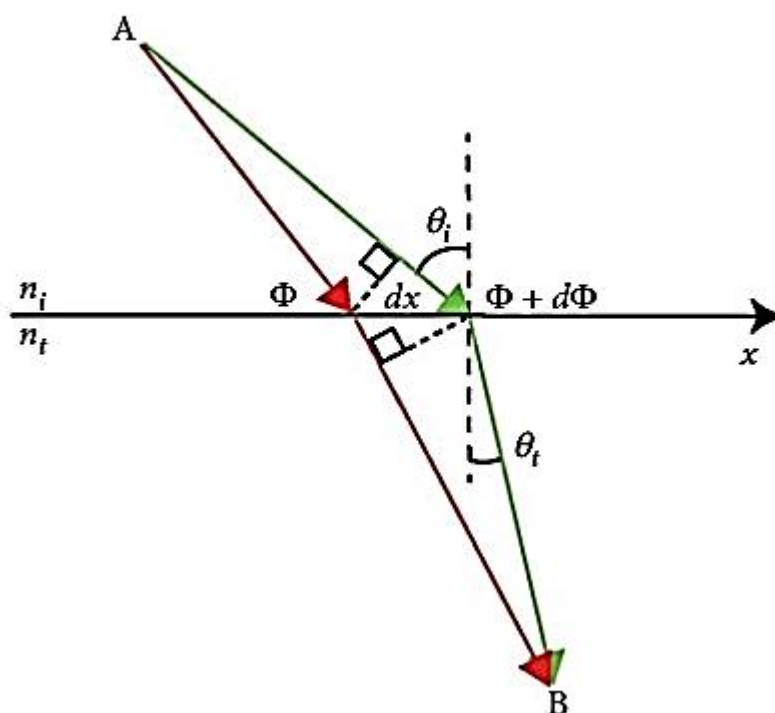
هنگامی که نور به یک صفحه موجدار دوره‌ای تابیده میشود، شکل (1-5b) وضعیت بلافاصله تغییر میکند. در این مورد رفتار نوری به دوره تناوب این موجها (Λ) بستگی خواهد داشت. اگر Λ قابل مقایسه با طول موج نور ورودی ($\Lambda \approx \lambda$)، باشد، همانند این است که نور به یک صفحه توری شکل برخورد کرده باشد و امواج در جهات مختلف منتقل و منعکس میشوند و رابطه قبلی اسنل به صورت زیر اصلاح میگردد [1].

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t + \frac{m\lambda}{\Lambda} \quad (1-3)$$

که در آن m یک عدد صحیح است که مرتبه خاص پراش را نشان می دهد.

۱.۳.۱-قانون اسنل در فراسطح ها

با در نظر گرفتن تابش نور بر یک فراماده که از مجموعه ای از Unit Cells تشکیل شده است وضعیت بازتاب و انتقال امواج نوری به طور چشمگیری تغییر خواهد کرد زیرا در این حالت ، شرایط مرزی بستگی خواهد داشت به تحریک نوسان جریان در نوسان کننده ها. به عنوان مثال، زمانی که نوسان کننده ها از عناصر پلاسمونی تشکیل شده باشند، (مانند نانوسیلندرها یا طلا (Au))، وضعیت امواج منعکس و منتقل شده به شکل هندسی نوسان کننده ها ، مانند تناوب، ارتفاع ، شعاع و سایر ابعاد بستگی پیدا خواهد کرد و به همین دلیل هندسه نوسان کننده طراحی شده نقش اصلی را در برآورده شدن اهداف ما از یک فراسطح خواهد داشت. برخی از هندسه ها برای تغییر قطبش ، برخی دیگر برای تغییر فاز و برخی هم میتوانند به عنوان جاذب فاز خوب عمل کنند. قانون اسنل در فراسطح ها بر اساس شکل ۶-۱:



شکل ۶-۱- تابش نور به فراسطح

از رابطه زیر به دست می آید که به عنوان قانون اسنل تعمیم یافته شناخته میشود [1]:

$$\begin{cases} n_i \sin \theta_i = n_r \sin \theta_r - \frac{\lambda}{2\pi} \frac{d\Phi}{dx}, \\ n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t - \frac{\lambda}{2\pi} \frac{d\Phi}{dx}. \end{cases} \quad (1-4)$$

این رابطه ، رابطه اصلی اسنل را نقض نمی کند. زیرا در مواد عادی (غیر فراسطحها) تغییر ناگهانی فاز در طول

را نخواهیم داشت و بنابراین مولفه $\frac{d\phi}{dx}$ برابر صفر شده و رابطه قبلی اسنل به دست می آید [1].

۱.۳.۲- کاربردهای مختلف فراسطح ها

از فراسطح ها به جز تغییر قطبش، استفاده های دیگری هم میشود که برخی از آنها عبارتند از:

تغییر فاز ، ساخت هولوگرام و تحریک پلاسمون سطحی ، نمان سازها

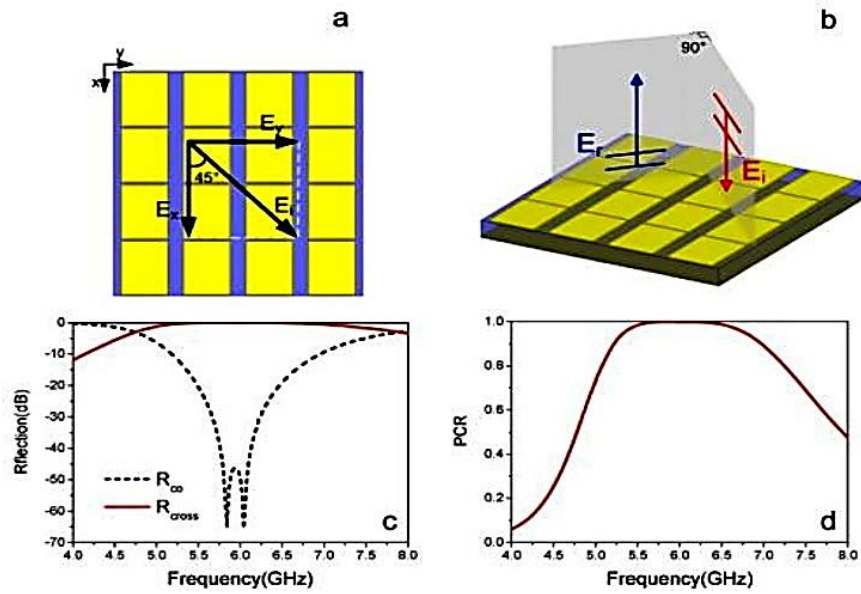
فصل دوم: انواع تغییر قطبش

۲.۱-مقدمه

تکنیک های مرسوم برای تبدیل قطبش ضمن اینکه از اندازه حجیم رنج می برند، پاسخ زاویه ای و پهنای باند مناسب هم ندارند. برای غلبه بر این محدودیت ها، دانشمندان ساختارهایی مصنوعی به نام فراسطح را برای تغییر قطبش پیشنهاد کردند. از مزایای آنها میتوان به پهنای باند بالا و پایداری زاویه ای خوب به همراه امکان ساخت آسان تر و هزینه کمتر اشاره کرد.

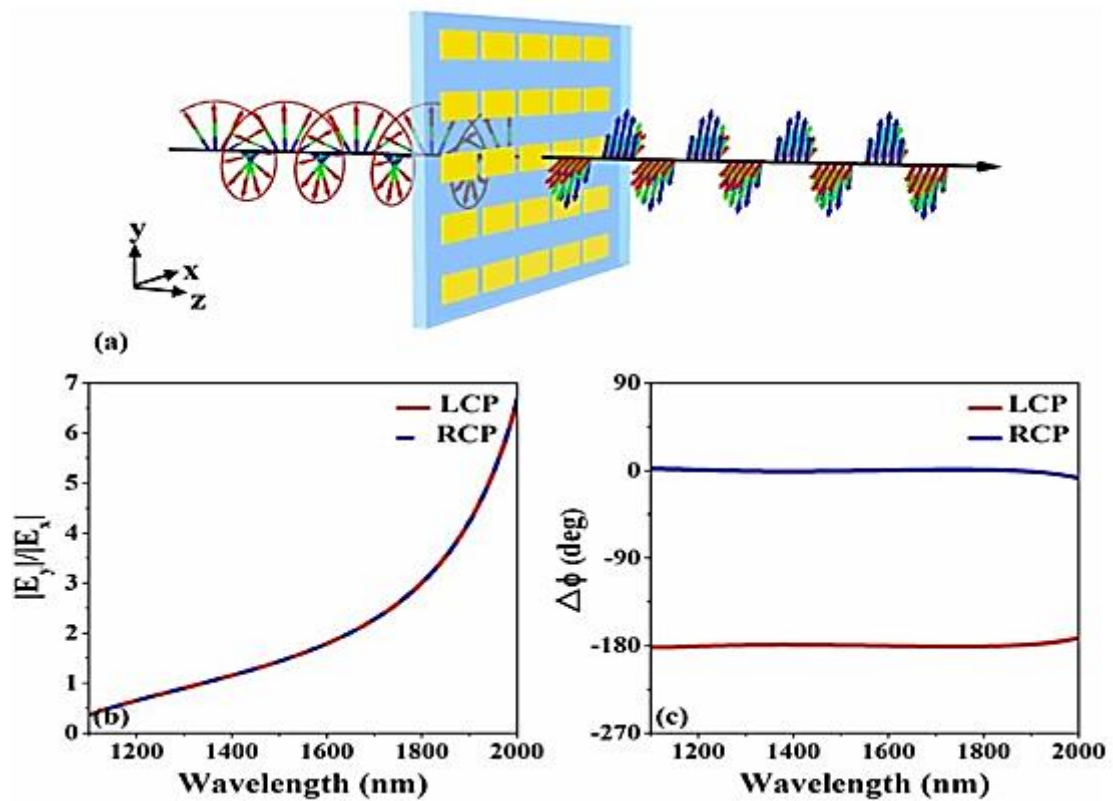
۲.۲ تبدیل قطبی متقابل-Cross Polarization Conversion

در تبدیل قطبش متقاطع، موج EM برخوردی (با قطبش خطی یا دایره ای) هنگام بازتاب، به قطبش متعامد متناظر خود تبدیل می شود. یک تبدیل قطبی متقابل با فراسطح، یک موج قطبش در راستای محور X را به یک موج قطبش قطبی در محور Y و موج، با قطبش راستگرد را به چپگرد تبدیل میکند. شکل زیر.



شکل ۲.۱. (a) فراسطح CPC (b) مدل معادل CPC (c) بازتاب هم قطبی و متقاطع ضرایب (d) نسبت تبدیل قطبی

۲.۳ تبدیل قطبش دایره ای به خطی



شکل ۲.۲. (الف) نمودار مفهومی فراسطح برای تبدیل CP به LP (ب) نسبت اجزای متعامد موج LP (ج)

اختلاف فاز

فصل سوم: طراحی و

ساختار فراسطحها

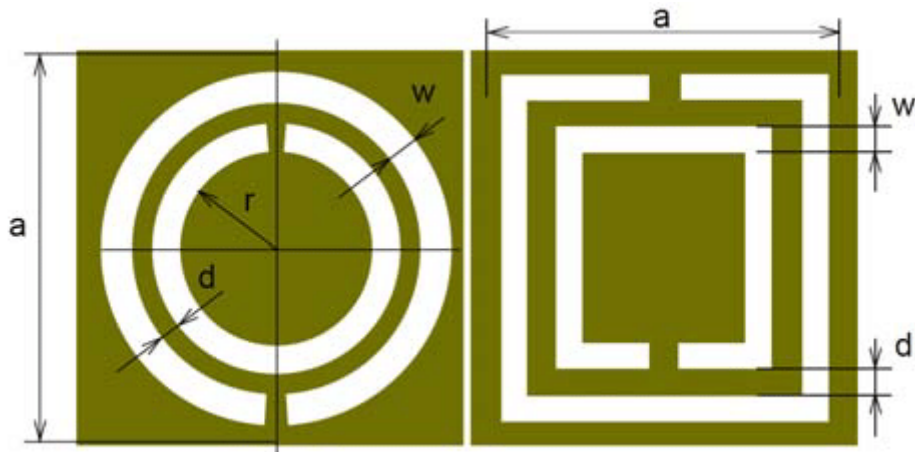
۳.۱- مقدمه

در این فصل درباره چند عنصر مغناطیسی توسعه یافته که در طی چند سال اخیر در حوزه تحقیقات فرامواد به طور گسترده استفاده شده اند بحث خواهد شد. این ساختارها شامل نوسانگرهای حلقه-شکاف (SRR) ، آرایه های عمودی فلزی ، نانومیله های تزویج شده ، نانو صفحات و نانو نوار هاست. پاسخ مغناطیسی در این ساختارها در چندین دهه از طیف الکترومغناطیسی ، از فرکانسهای میکروویو تا بخش آبی از طیف نور مرئی گسترده شده است.

ساختاری که در این پایان نامه برای استفاده در فراسطح ، استفاده شده ، مبتنی بر نوسانگرهای حلقه شکاف است. بنابراین لازم است اساس کار این نوسانگرها مورد بررسی قرار گیرد.

۳.۲- نوسانگرهای حلقه شکاف

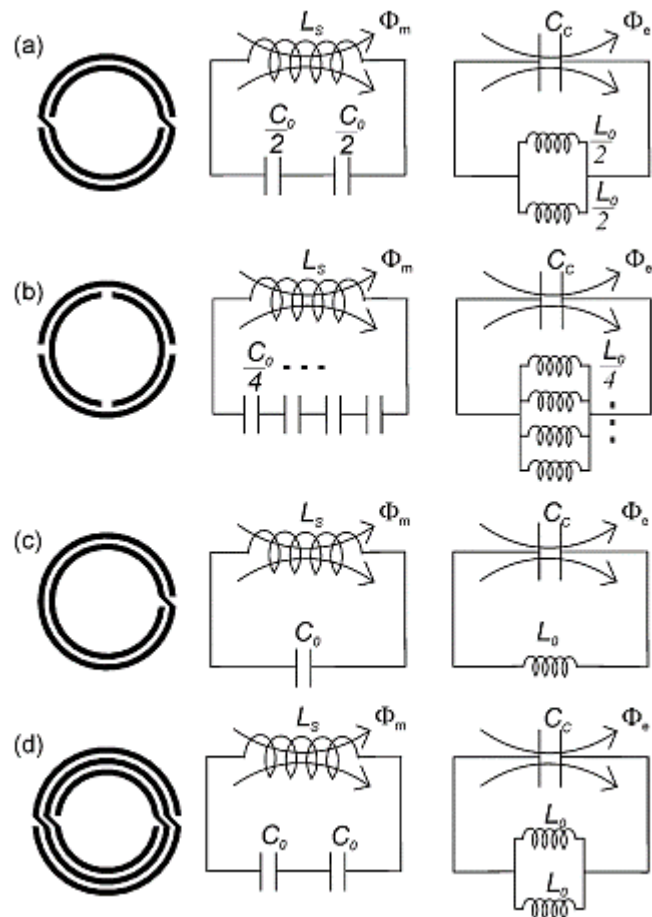
شکل زیر یک نمونه هایی از نوسانگر حلقه شکاف را نشان میدهند:



شکل ۱-۳- نمونه یک نوسانگر حلقه شکاف

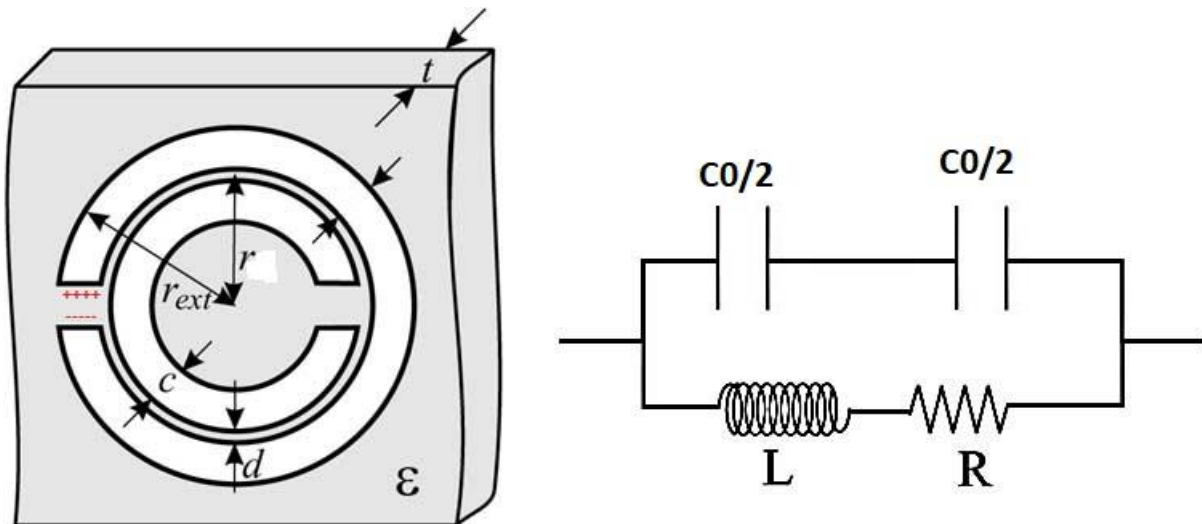
این نوسان کننده ها معمولا از یک یا دو حلقه (حلقه میتواند مربعی ، یا دایروی و یا اشکال دیگر باشد) به همراه یک شکاف ساخته میشوند. ساختار هندسی این نوسان سازها در عملکرد تغییر قطبش یک فراماده بسیار مهم است.

در محدوده مایکروویو ، برای اولین بار پندری ، پیشنهاد استفاده از یک زوج نوسانگر حلقه شکاف هم مرکز (SRR) با ابعاد زیر طول موج و در جهت مخالف یکدیگر (همانند شکل فوق) را پیشنهاد کرد که تراوایی مغناطیسی موثر بزرگتر از واحد داشت. در حقیقت ، عبارت SRR خیلی قبل تر از کار پندری استفاده شده بود. در اوایل سال 1980 هاردی از ساختاری مشابه استفاده کرد و این عبارت را برای توصیف فلزات استوانه ای تو خالی با برش خطی که نوسان مغناطیسی را در حدود فرکانس 1GHZ نشان میداد استفاده کرد. پندری و همکاران ، ساختار را به شکل جدید دوباره طراحی کردند. طراحی که الگویی خوب برای بسیاری از مواد فرامغناطیسی در تحقیقات امروزه فرامواد شده است. طرح کلی ساختار نمونه هایی از SRR ها در شکل زیر نشان داده شده است: [3]



شکل ۲-۳- مدار معادل انواع نوسانگر حلقه شکاف

از آنجا که ساختار SRR اولین فرا اتم مغناطیسی است و هنوز نقش غالب را در مغناطیس پذیری مصنوعی در فرکانسهای مایکروویو بازی می کند ، درک شهودی از ساختار آن مفید است. ابتدا به صفحه فلزی دایره ای که در میدان موج الکترومغناطیسی نوسانی با قطبش نرمال به سطح هموار قرار گرفته است، توجه شود.



شکل ۳-۳-۳ دو حلقه ای SRR

آیا صفحه فلزی در این حالت از لحاظ مغناطیسی فعال است؟ پاسخ مثبت است، اما بسیار ضعیف است. میدان مغناطیسی نوسانی، جریانی دایره ای را در اطراف صفحه ایجاد می کند که باعث به وجود آمدن شار مغناطیسی در خلاف جهت میدان مغناطیسی خارجی میشود. در حقیقت ، میتوان به آن به عنوان نمونه ساده ای از قانون لنز نگاه کرد. بنابراین صفحه فلز به میزان کمی کم تر از واحد را نشان میدهد. از آنجا که جریان دایروی به طور عمده در محیط خارجی تحدید شده است، میتوان از بخش داخلی صفحه صرف نظر کرد و صفحه را به صورت حلقه در نظر گرفت. پاسخ حلقه فلزی به میدان مغناطیسی خارجی به طور کامل القایی و غیر نوسانی است. برای معرفی رفتار نوسان و تقویت پاسخ مغناطیسی ، باید خازنی را به ساختار اضافه کرد. همانطور که در شکل فوق دیده میشود ، شکاف موجود در هر حلقه مانع شکل گیری جریان دایروی کامل میشود و بارهای الکتریکی در شکاف انباشته میشوند. با داشتن سلف و خازن ، SRR همانند یک عنصر نوسان کننده رفتار می کند. وقتی حلقه ها هم مرکز و شکاف آنها در جهات مختلف یکدیگر باشد ، خازن ایجاد شده در ساختار موثرتر خواهد بود. این یکی از دلایلی است که SRR دوتایی به SRR تکی در طراحی فرامواد ترجیح داده میشود. توجه شود که هر دو حلقه در ساختار SRR دوتایی همانند فراتم عمل می کنند. دلیل دیگر که چرا ساختار SRR دوتایی به SRR تکی ارجحیت دارد ، به حداقل رساندن قطبیدگی الکتریکی در سیستم است. در SRR تکی

، بارهای انباشته شده اطراف شکاف ، گشتاور دو قطبی الکتریکی مشخصی را ایجاد میکند که گشتاور دو قطبی مغناطیسی مطلوب را تحت الشعاع قرار میدهد. در ساختار SRR دوتایی شکل فوق ، گشتاورهای دو قطبی الکتریکی نهایی دو حلقه یکدیگر را حذف می کنند و در نتیجه گشتاور دو قطبی مغناطیسی غالب خواهد بود. در نتیجه ، اغلب از ساختار SRR دو تایی استاندارد در طراحی های فرامواد مبتنی بر SRR استفاده میشود.[5]

۳.۲.۱- مدار معادل SRR

لازم است توجه شود که هدف از طراحی ، ایجاد اتم های مغناطیسی مصنوعی در فرامواد است. بنابراین اندازه هر SRR باید بسیار کوچکتر از طول موج فضای آزاد در محدوده فرکانسی مطلوب باشد. از نقطه نظر مدار معادل ، هر SRR همانند یک مدار LC در پاسخ به میدان خارجی رفتار می کند، همانطور که در شکل فوق هم نشان داده شده است. تخمین دقیق مقادیر L,C در تعیین فرکانس نوسان در ساختار SRR که به عنوان فرامواد مغناطیسی عمل می کند، مفید خواهد بود. حلقه همانند یخس سلفی عمل می کند که اندوکتانس آن معادل $L \sim 2\mu_0 r^2$ است. محاسبه خازن بسیار پیچیده تر است. زیرا خازن ناشی از فاصله بین دو حلقه و همچنین شکاف موجود در هر حلقه است.[5]

۳.۲.۲- تحلیل مدار معادل SRR

تحلیل شارش جریان و توزیع بار نشان میدهد که خطوط جریان (جریان هدایتی بعلاوه جریان جابجایی) تحریک شده توسط میدان مغناطیسی خارجی مسیر پیچیده ای را در دو حلقه طی می کنند که از یک حلقه به حلقه دیگر از طریق شکافتگی بین آنها طی میشود. بنابراین خازن بین دو حلقه ، منبع غالب در خازن کل است و خازن ناشی از شکاف در هر حلقه در مقایسه با آن بسیار کوچک است. توجه شود که خازن کل بین دو الکتروود حلقه ای شکل ، $C_0 \sim \frac{2\pi r \epsilon_0 (c+t)}{d}$ معادل خوبی برای خازن معادل نیست زیرا خازن کل SRR دوتایی باید به صورت اتصال سری دو خازن جدا از هم در نظر گرفته شود که هریک نصفی از SRR دوتایی را با مقدار $\frac{C_0}{2}$ نشان میدهند. از اینرو خازن معادل برای محاسبه فرکانس نوسان ، تقریباً برابر $\frac{C_0}{24}$ است. اگر

تلفات اهمی در ساختار نیز در نظر گرفته شود ، عنصر مقاومتی هم که تقریبا برابر $\frac{\pi r}{c\sigma\delta}$ است باید به صورت RLC به مدار اضافه شود که σ, δ به ترتیب عمق پوستی و رسانایی فلز را نشان می دهند. با در نظر گرفتن

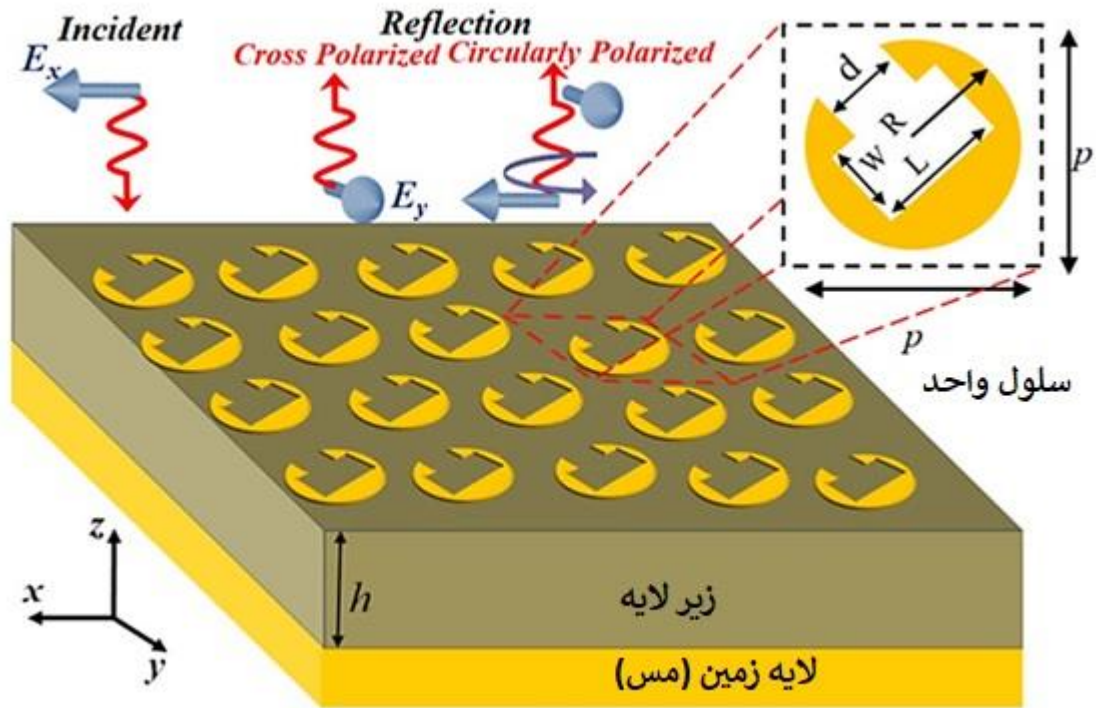
تمام این شرایط، فرکانس نوسان مغناطیسی SRR های دوتایی را میتوان به صورت
$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{\left(L + \frac{R}{j\omega_0}\right)C}}$$

تخمین زد. توجه شود که تحلیل بر اساس مدل مدار معادل ، در بدترین شرایط است. با وجود این ، مدل عنصر فشرده درک شهودی از فیزیک مربوط به SRR های دوتایی استاندارد را فراهم می کند و ابزاری سریع برای تخمین دقیق محدوده فرکانس نوسان پیشنهاد می دهد. علاوه بر این ، این قبیل مدل ها کمک می کند تا پیش بینی کنیم که چگونه فرکانس نوسان با توجه به پارامترهای هندسی تغییر می کند.

فصل ۴: شبیه سازی

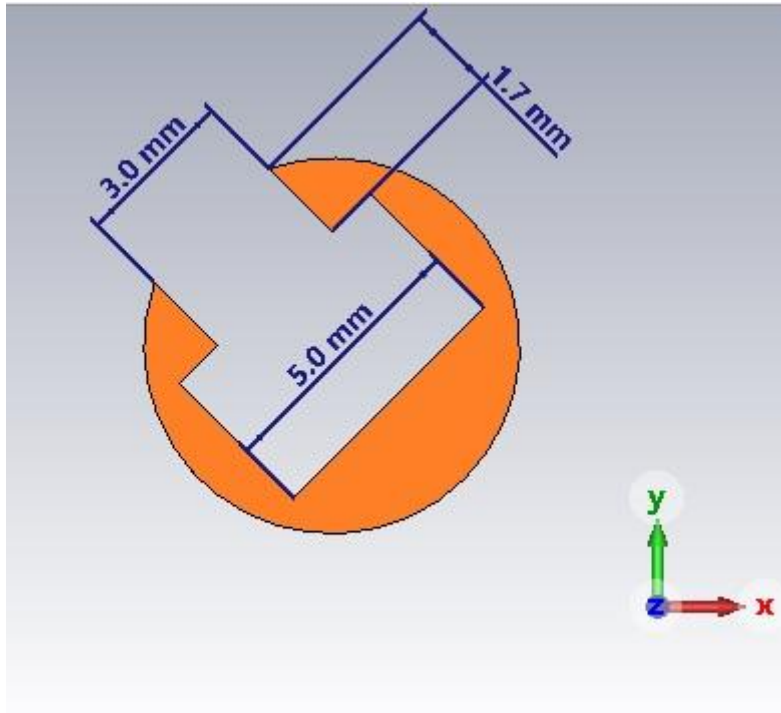
۴.۱- طرح پیشنهادی

طرح پیشنهادی ما برای این پایان نامه به صورت زیر است: [7]



شکل ۴-۱- طرح پیشنهادی در این پایان نامه

که در آن ابعاد و اندازه لایه مسی به صورت زیر است:

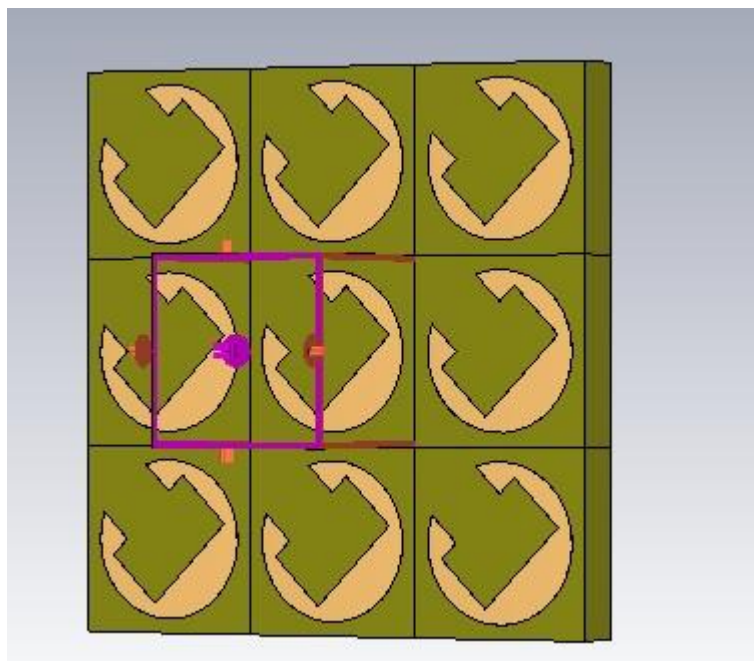


شکل ۲-۴-ابعاد نوسان کننده حلقه شکاف

زیر لایه از جنس FR-4 با ضریب دی الکتریک ۴.۳ و تانژانت تلفات 0.025 و ضخامت زیر لایه 2.4mm در نظر گرفته شده است. این ساختار را در محیط CST شبیه سازی می کنیم و نتایج آن را در خصوص نحوه تبدیل قطبش، مورد بررسی قرار می دهیم.

۴.۲-شبیه سازی

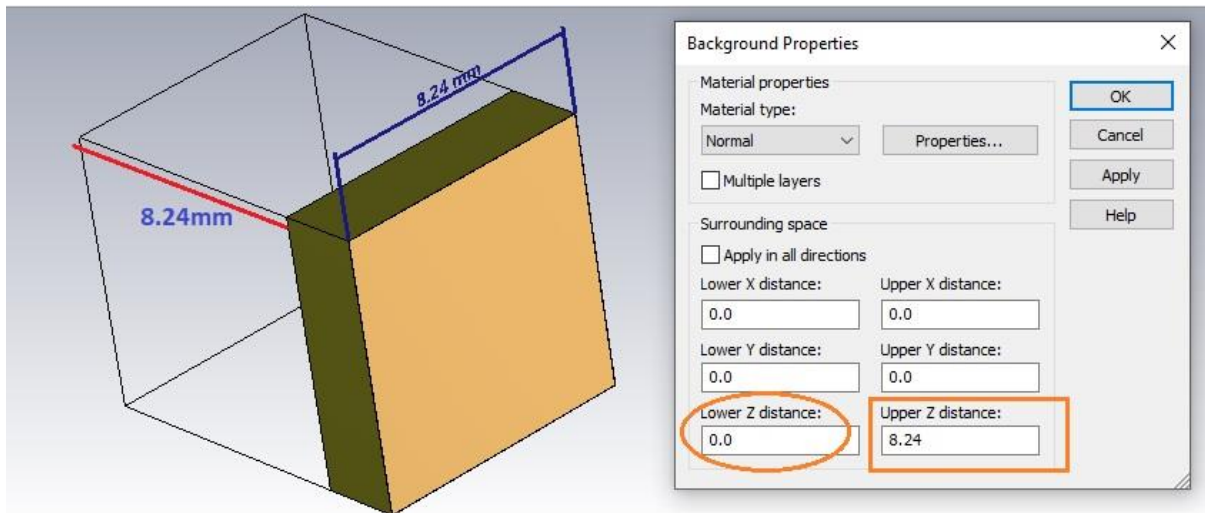
ساختار مورد نظر را در محیط CST 2022 پیاده می کنیم:



شکل ۳-۴- پیاده سازی در محیط CST

پس از طراحی اولیه سراغ تنظیمات آن می رویم.

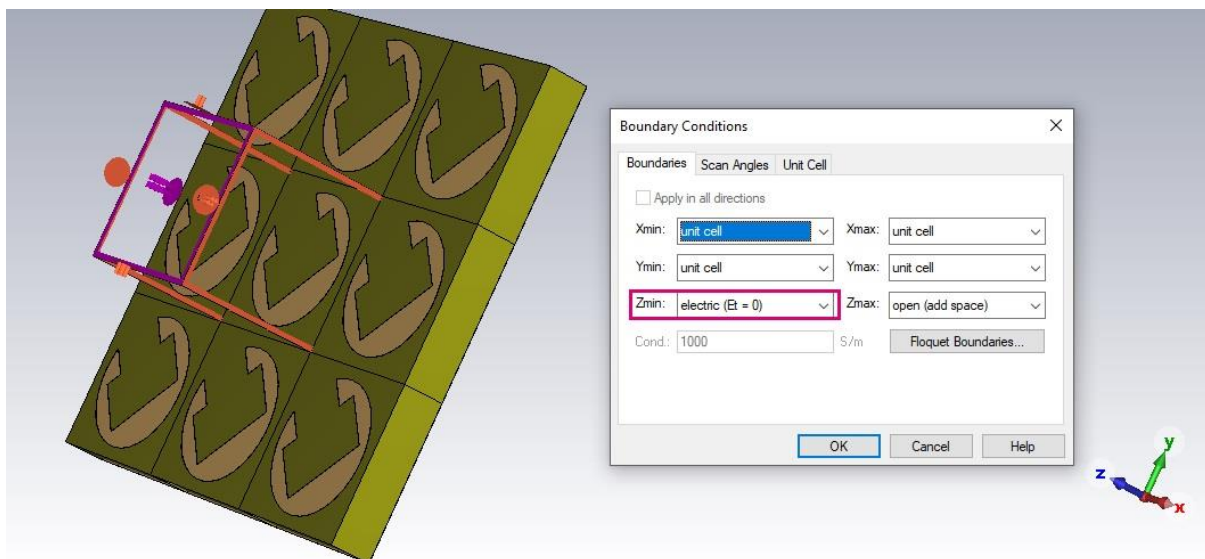
ابتدا از قسمت Background فاصله Z_{max} را 8.24mm که هم اندازه ابعاد یونیت سل مربعی است قرار میدهیم. همچنین $Z_{min}=0$ قرار میدهیم. چونکه تابش امواج الکترومغناطیسی فقط از سمت فوقانی Unit Cell است و از قسمت زیرین که Ground است، تابشی نخواهیم داشت:



شکل ۴-۴ - تنظیم پارامترهای background

بازه فرکانسی را از 2-20 GHz تعریف می کنیم.

در مرحله بعدی سراغ شرایط مرزی رفته و Z_{min} را از لحاظ الکتریکی صفر در نظر میگیریم:

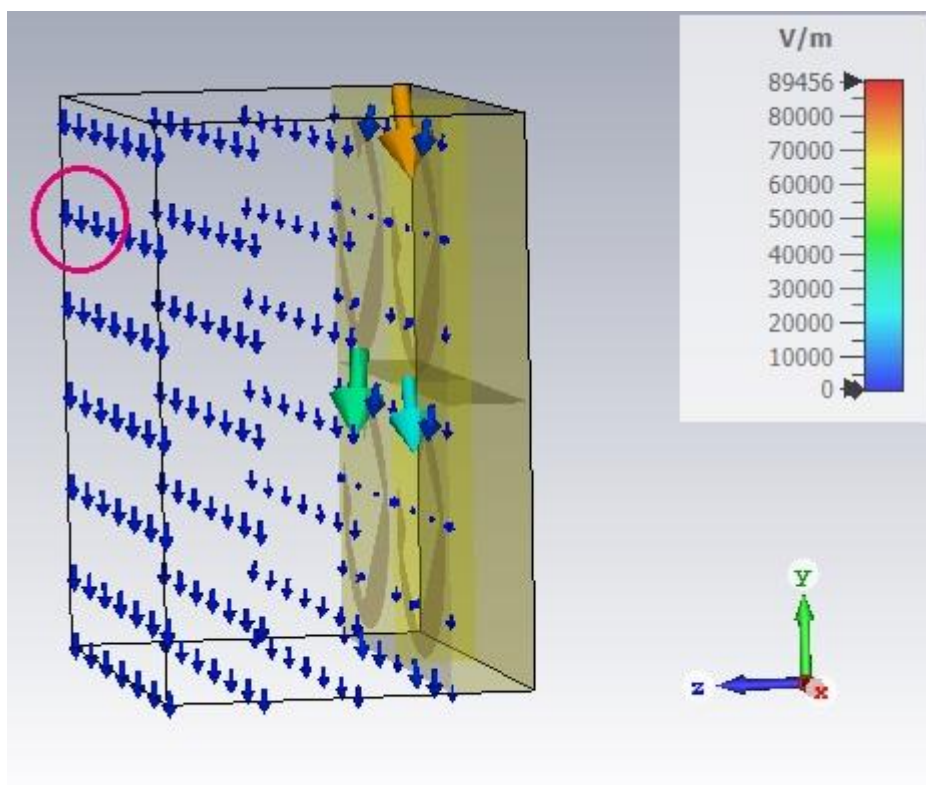


شکل ۴-۵- تعریف شرایط مرزی

اکنون شبیه سازی را انجام می‌دهیم و منتظر پایان آن می‌مانیم. نتایج شبیه سازی در بخش Result به طور خودکار ثبت می‌شود.

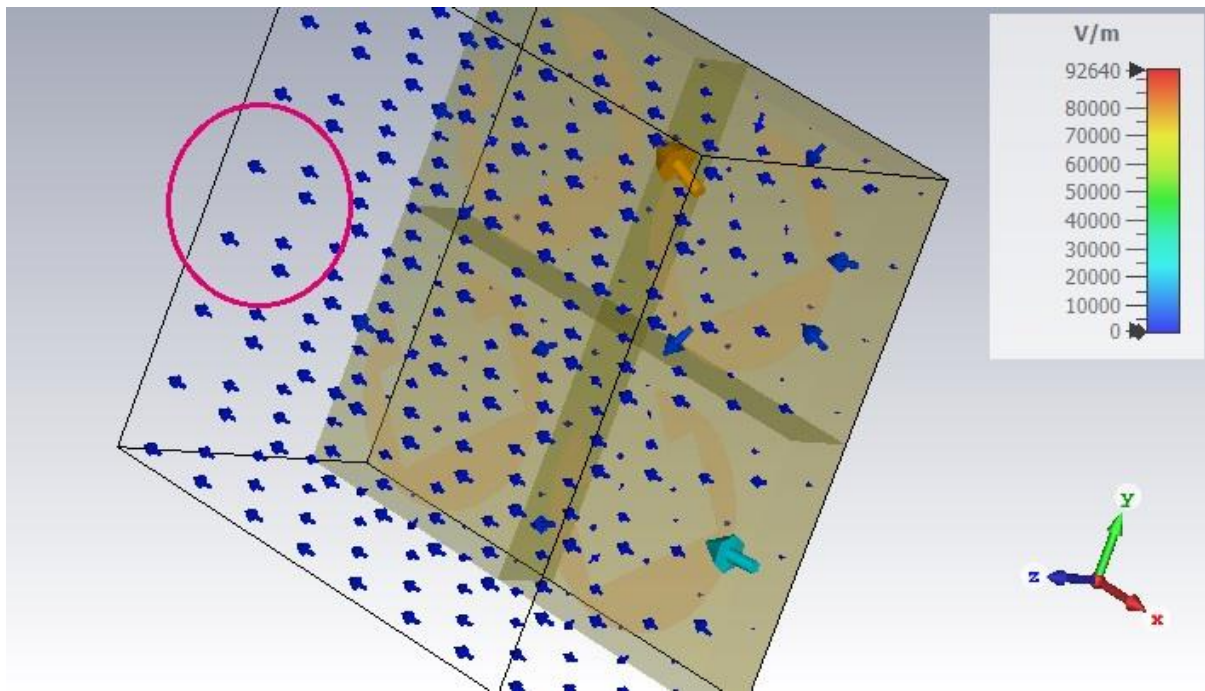
۴.۳- نتایج شبیه سازی

میدان الکتریکی امواج تابشی در فرکانس 4GHz به صورت زیر است که در آن ، میدانها در راستای محور y- قرار دارند:



شکل ۴-۶- میدان الکتریکی تابشی در فرکانس 4GHz

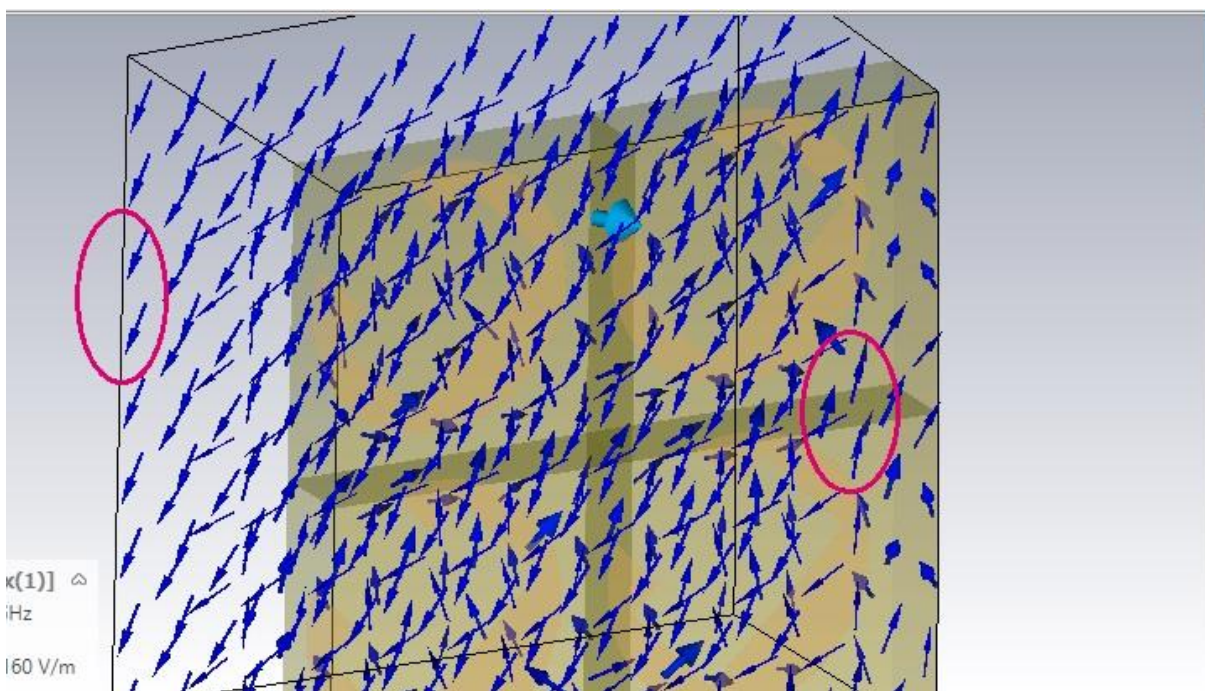
در همین فرکانس، میدان های الکتریکی بازتابش شده را هم مشاهده می کنیم:



شکل ۷-۴- میدان الکتریکی منعکس شده در فرکانس 4GHz

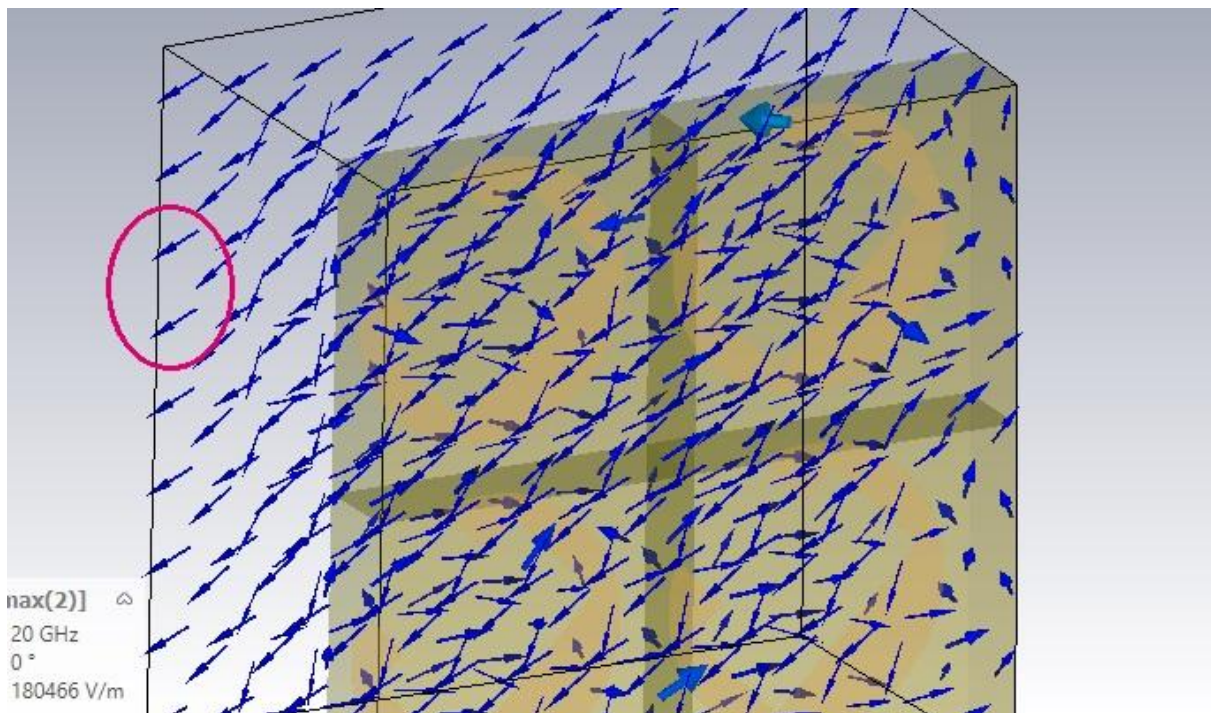
میبینیم که امواج برگشتی دچار چرخش شده و در راستای محور X - قرار دارد و بنابراین یک تغییر قطبش Cross Polarization Conversion رخ داده است.

در فرکانس 20GHz امواج تابشی دارای قطبش دایروی هستند:



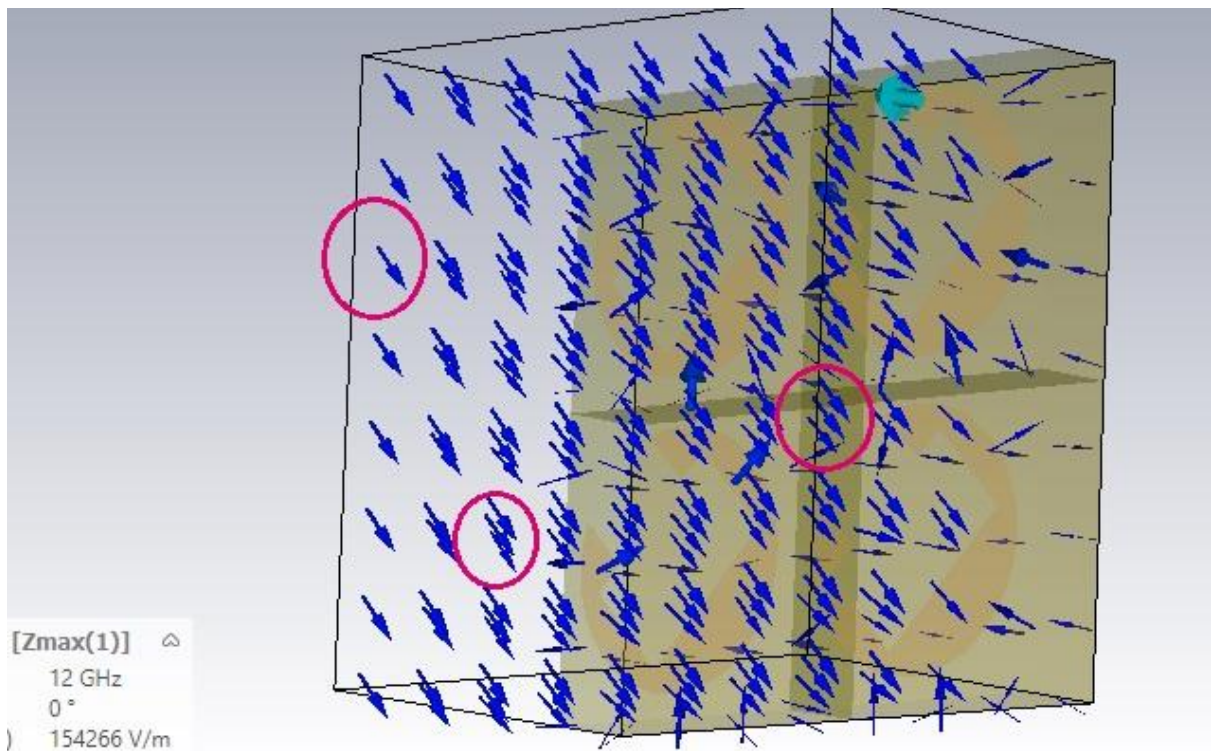
شکل ۸-۴- میدان الکتریکی تابشی در فرکانس 20GHz

و در همین فرکانس ، امواج برگشتی همچنان دارای قطبش دایروی هستند و فقط زاویه بردارها کمی تغییر کرده است:



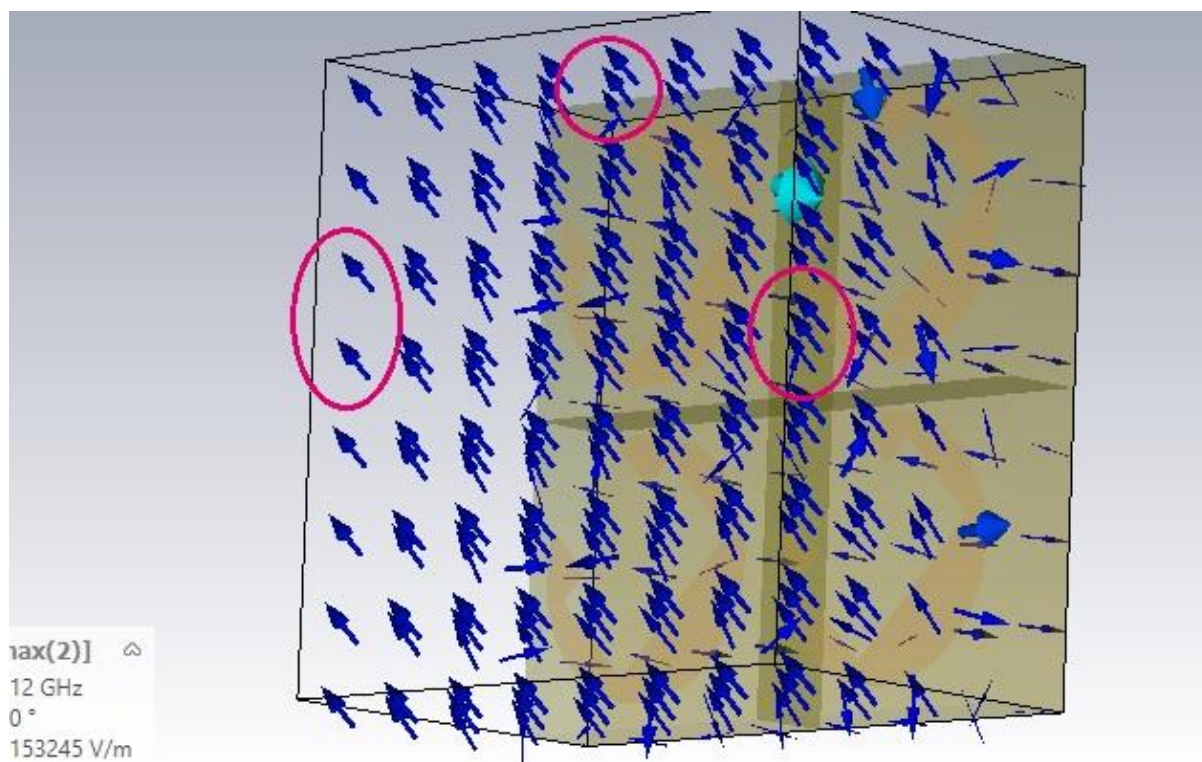
شکل ۹-۴- میدان الکتریکی منعکس شده در فرکانس 20GHz

در فرکانس 12GHz قطبش امواج تابشی ، خطی است ولی در راستای هیچکدام از محورهای مختصات نیست:



شکل ۱۰-۴- میدان الکتریکی تابشی در فرکانس 12GHz

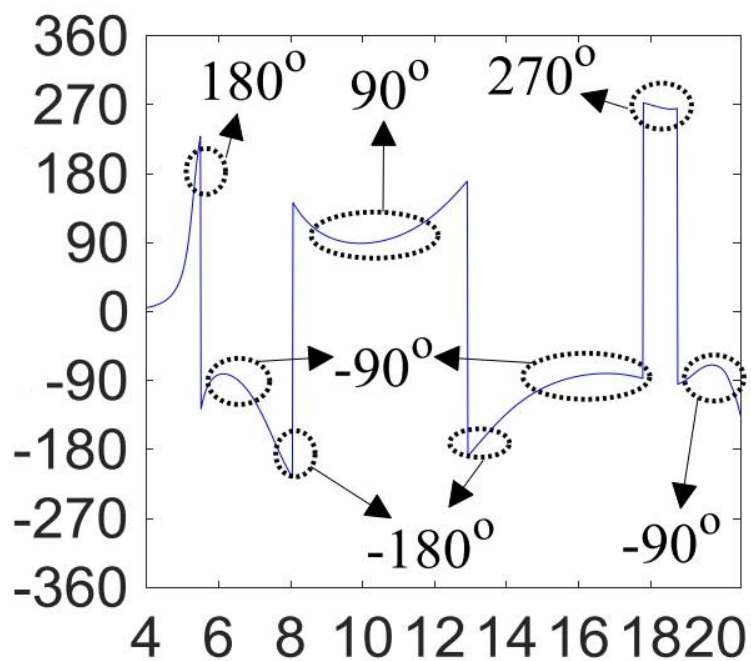
در این حالت ، امواج بازگشتی به صورت زیر هستند:



شکل ۱۱-۴- میدان الکتریکی منعکس شده در فرکانس 12GHz

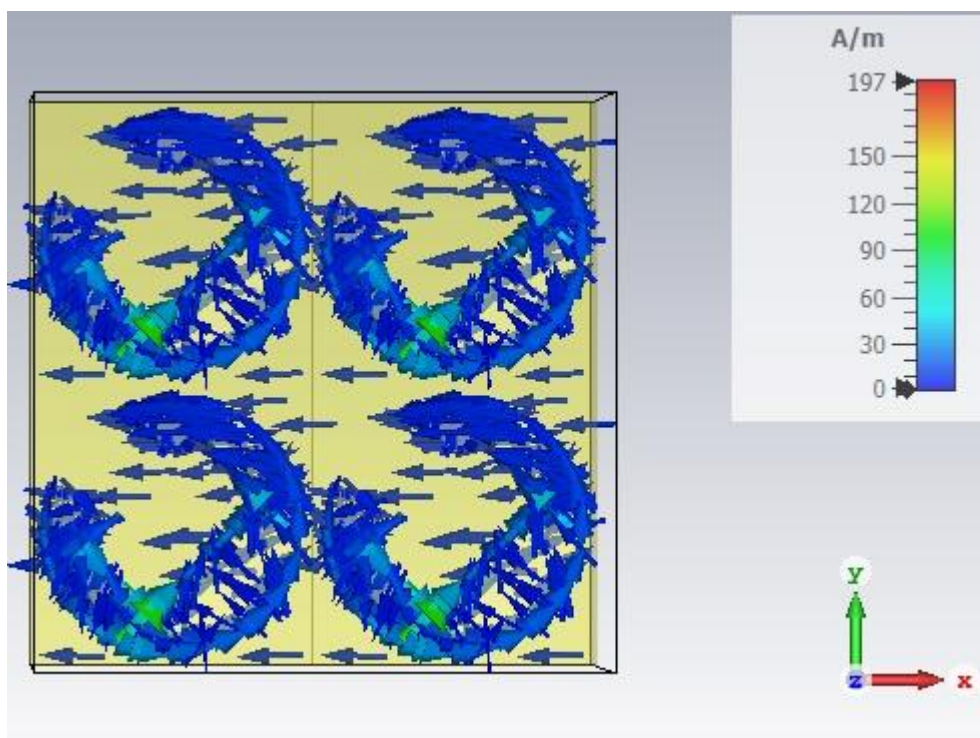
که چرخش قطبش 180- درجه را نشان میدهد.

اگر تغییرات قطبش امواج برگشتی را نسبت به امواج تابشی ، در یک نمودار و برای چند فرکانس مهم مورد بررسی قرار دهیم، نموداری همانند نمودار زیر به دست خواهد آمد که تاثیر فرکانس و به عبارتی طول موج را بر نحوه تغییر قطبش نشان میدهد:

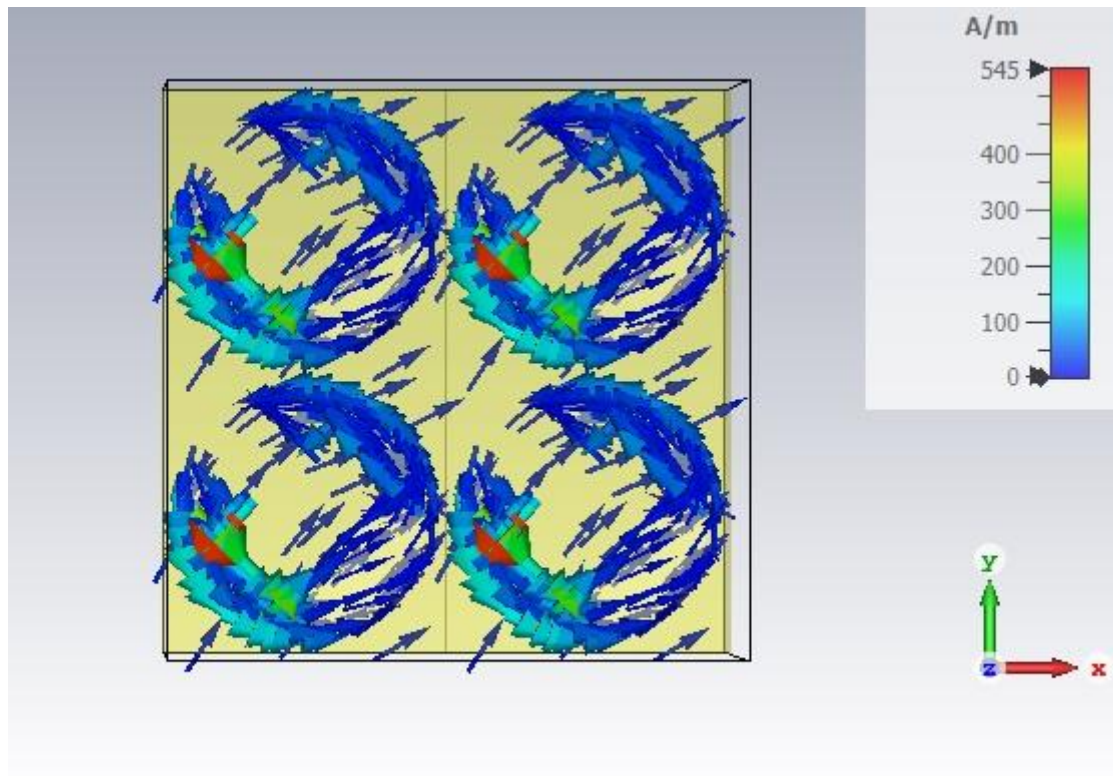


شکل ۱۲-۴- تغییر قطبش در زوایای مختلف

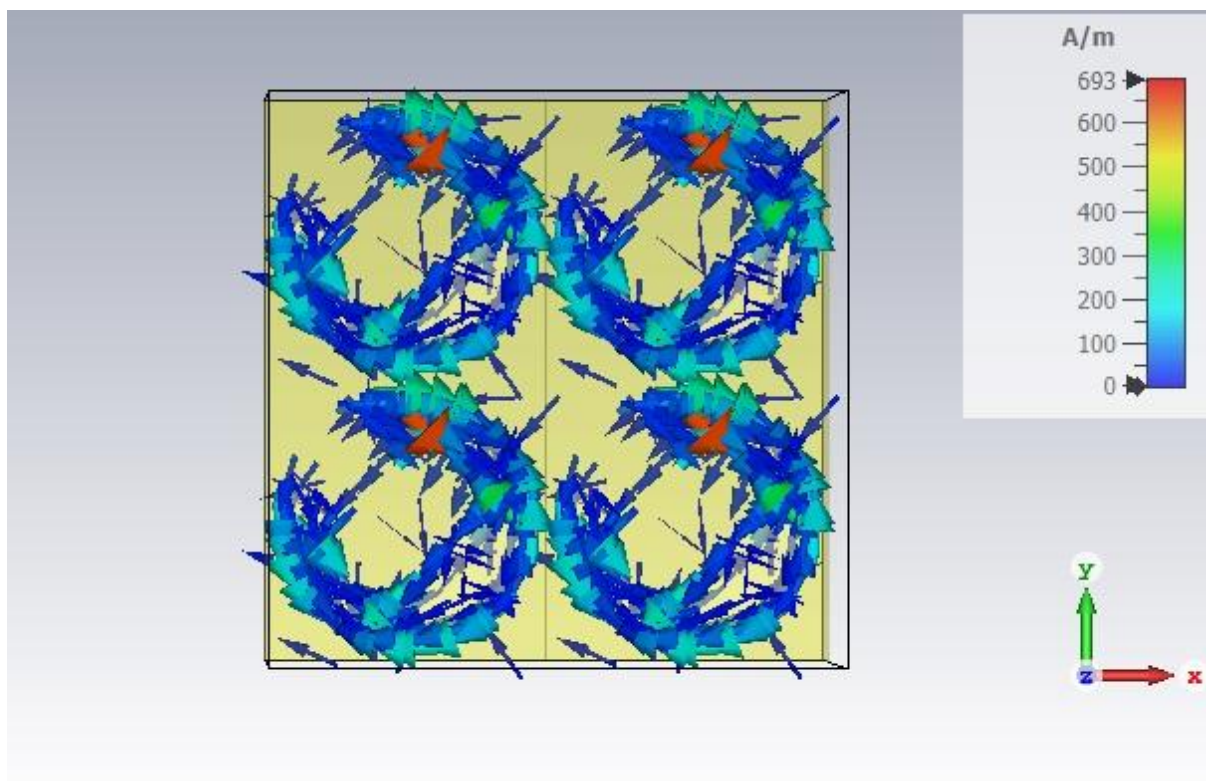
وضعیت جریان های سطحی هم در فرکانسهای 4-12-20 گیگاهرتز نیز در شکل های زیر نشان داده شده است:



۴-۱۳- جریان های سطحی در فرکانس 4Ghz



شکل ۱۴-۴- جریان های سطحی در فرکانس 12GHz



شکل ۱۵-۴- جریان های سطحی در فرکانس 20GHz

References:

- [1]- "Meta-surfaces Theoretical Basics and Application Overview "by Roberto Caputo and Antonio Ferraro AIP Publishing, Melville, New York, 2021, pp. 1-1-1-20.
- [2]-" [BOOK] Circularly polarized antennas" SS Gao, Q Luo, F Zhu – 2014
- [3]- "Equivalent-Circuit Models for Split-Ring Resonators and Complementary Split-Ring Resonators Coupled to Planar Transmission Lines" Juan Domingo Baena-IEEE 2005
- [4]- "A Multifunctional Polarization Transforming Metasurface for C-, X-, and K-Band Applications", Fahad Ahmed. IEEE 2021
- [5]- اصول و کاربردهای فرامواد نوری-دکتر محمود صیفوری-نشر دانشگاه تربیت مدرس رجایی-سال ۱۳۹۷
- [6]-"Design and Analysis of Metasurfaces for Polarization Conversion of Electromagnetic Waves" , MUHAMMAD ISMAIL KHAN, 2018
- [7]- "A Multifunctional Polarization Transforming Metasurface for C-, X-, and K-Band Applications",Fahad Ahmed,IEEE-2021