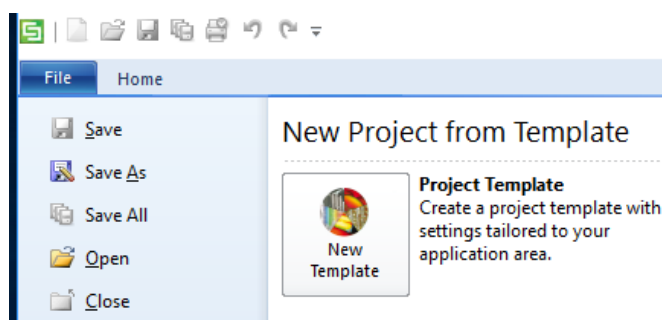


طرح مسأله: بلور فوتونی دوبعدی به صورت میله‌هایی با سطح مقطع چهارگوش به ابعاد ۱۸۰ در ۱۸۰ نانومتر و بلندی ۵۰۰ نانومتر از جنس گالیوم آرسناید (GaAs) با ضریب شکست ۳/۴ و این میله‌ها با ثابت شبکه ۷۶۰ نانومتر به شکل شبکه مربعی در بستر هوا (Air) چیده شده‌اند. این شبیه‌سازی را توسط نرم‌افزار CST Studio 2017 انجام می‌دهیم. کلیه تصاویر این بخش از خود نرم‌افزار تهیه شده‌است. مراحل زیر را یک‌به‌یک طی می‌کنیم:

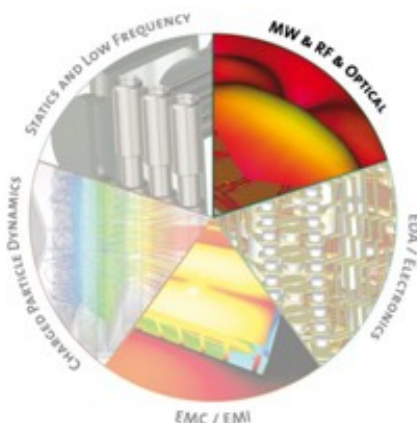
۱. برنامه CST studio suite 2017 را اجرا می‌کنیم.

۲. در پنجره اصلی دکمه New Template را می‌زنیم.



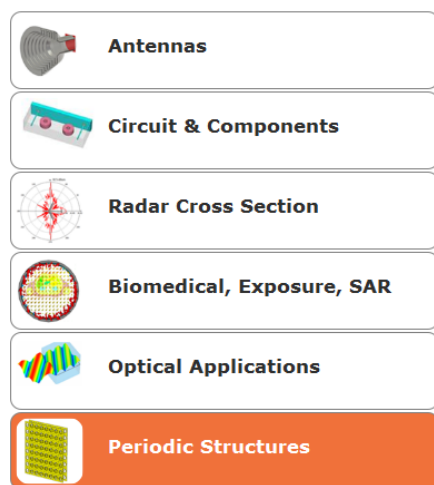
شکل (۳ - ۴): دکمه New Template

۳. بخش MW&RF&OPTICAL را انتخاب می‌کنیم.



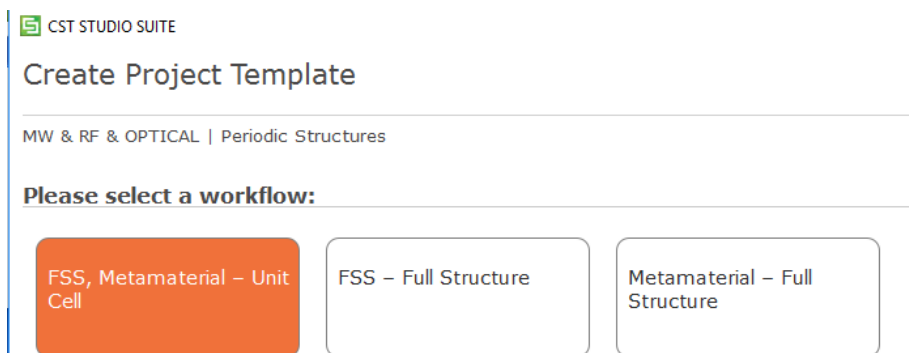
شکل (۳ - ۵): MW&RF&OPTICAL

۴. سپس Periodic structures را انتخاب و دکمه Next را می‌زنیم.



شکل (۳ - ۶): Periodic structures

۵. FSS, Metamaterial – Unit Cell را انتخاب و دکمه Next را می‌زنیم.



شکل (۳ - ۷): FSS, Metamaterial – Unit Cell

۶. به پنجره انتخاب واحدها می‌رسیم. ابعاد را به نانومتر (nm)، بسامد را به تراهرتز (THz) و زمان را نانو ثانیه (ns) تغییر داده و Next را می‌زنیم.

۷. بازه بسامدی (یا طول موج) و میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی (E – Field, H – Field) را علامت زده و بسامدهای خاص مورد نظرمان را مشخص و جهت محاسبه انعکاس، عبور و جذب، آخرین علامت را نیز مانند شکل (۳ - ۸) می‌زنیم.

Please select the Settings

Define using Frequency Wavelength

Frequency Min.: THz

Frequency Max.: THz

Monitors: E-field H-field Farfield Power flow Power loss

Define at THz
Use semicolon as a separator to specify multiple values.
e.g. 20;30;30.1;30.2;30.3

Calculate reflectance, transmittance and absorbance

شکل (۳ - ۸): انتخاب بازه بسامد، میدان‌ها و نوع محاسبات

۸. در این قسمت باید طرح را ایجاد کنیم. مسیر زیر را می‌رویم:

Modeling → Shapes → Brick
جنس آن را باید مشخص کنیم. بهتر است ابعاد را به جای اعداد ثابت به صورت پارامتری تعیین نماییم که بعداً بتوانیم هر مقدار دلخواه را به آن‌ها بدهیم. مثلاً طول x را از صفر تا x و پهنا را از صفر تا y و عمق را از صفر تا z تعیین می‌کنیم.

Component: Component1

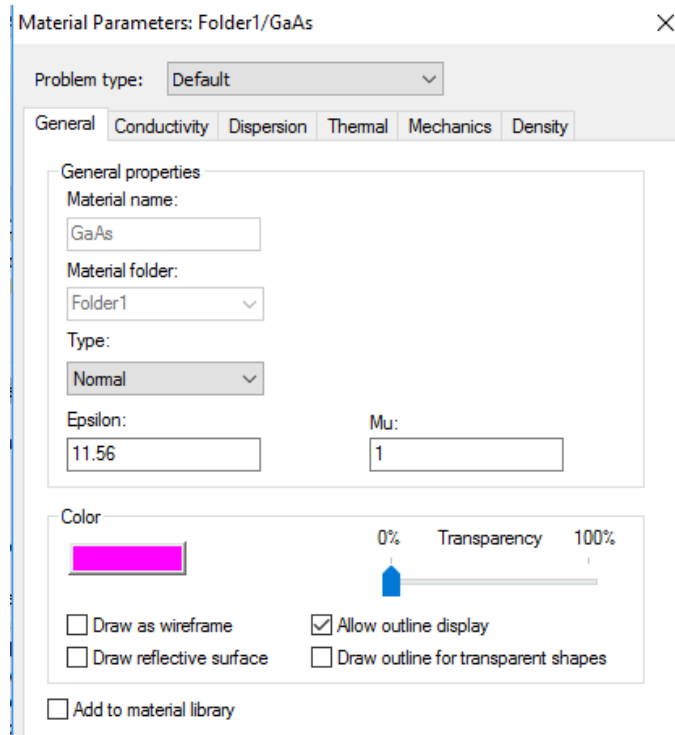
Material: New Material

و حالا پنجره شکل (۳ - ۹) برای تعریف جنس ماده باز می‌شود. مطابق اطلاعات مسئله فرم را پُر کرده و Ok را می‌زنیم. برای پیدا کردن مقدار ضریب گذر دهی الکتریکی طبق فرمول باید ضریب شکست را به توان ۲ برسانیم:

$$n = 3/4$$

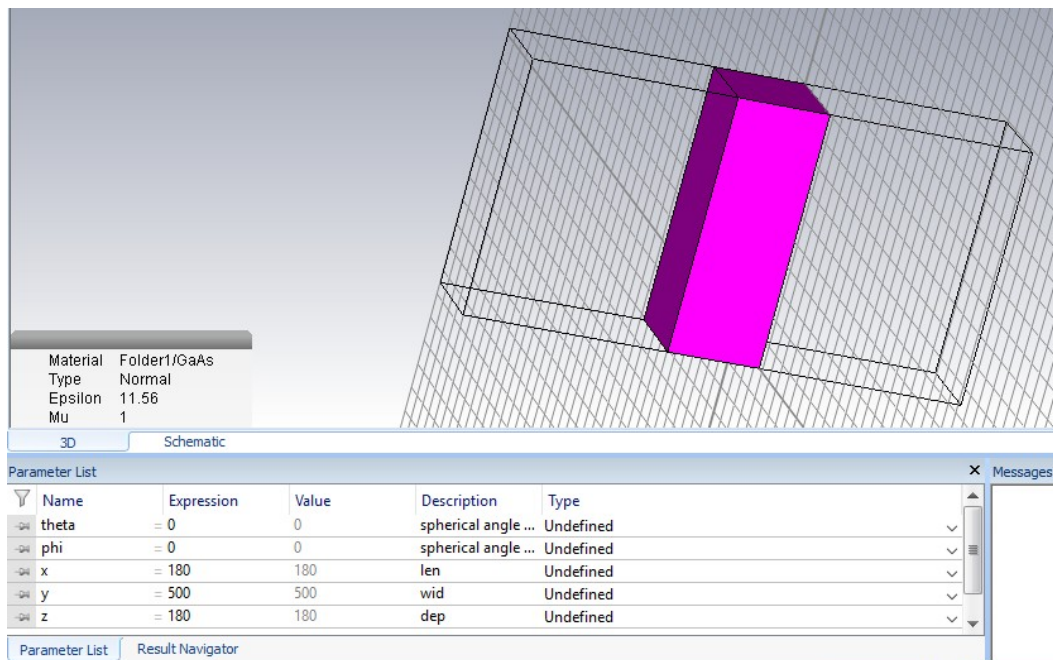
$$\varepsilon = n^2$$

$$\varepsilon = 11/56$$



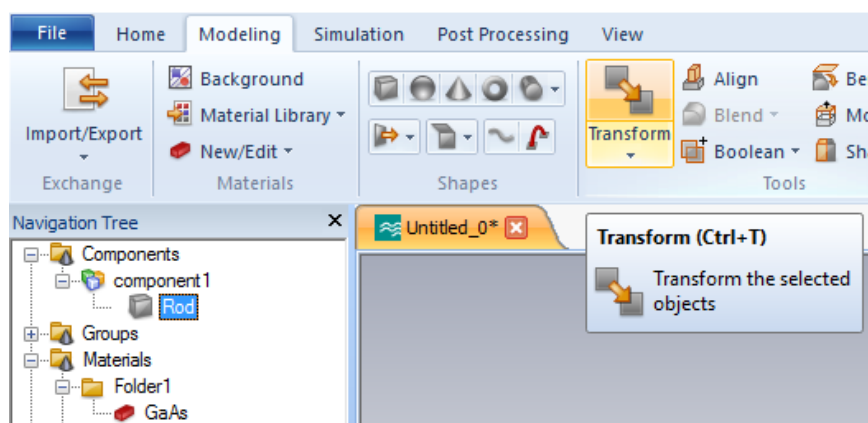
شکل (۳-۹): تعریف جنس ماده و مشخصات آن

۹. تا کنون طرح ما به شکل زیر درآمده است. تا این جا فقط یک میله ساخته ایم و باید آنرا تکرار کنیم تا به بلور فوتونی برسیم.

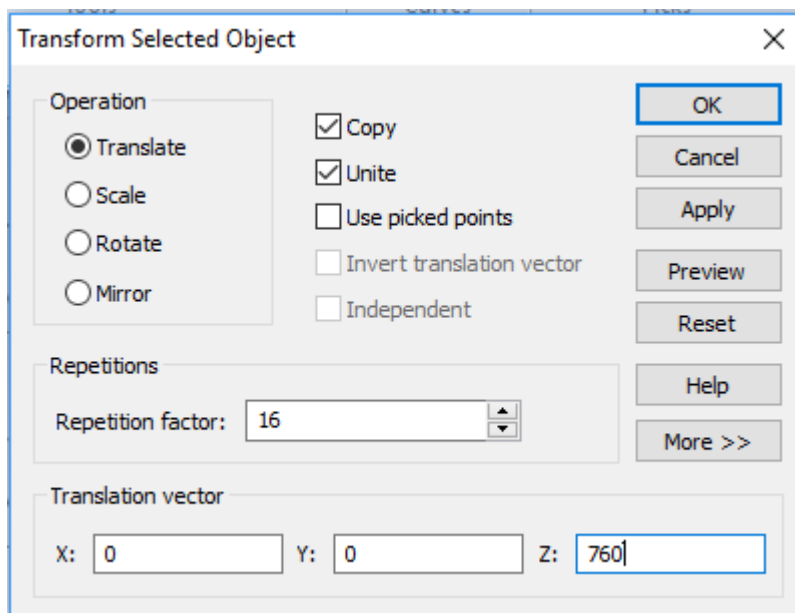


شکل (۳-۱۰): یک میله طراحی شده

برای تکرار ساختار از منوی درختی سمت چپ component ساخته شده را انتخاب و سپس از منوی modeling در قسمت tools دکمه transform را زده و مانند شکل (۳ - ۱۲) فرم را تکمیل می‌کنیم.



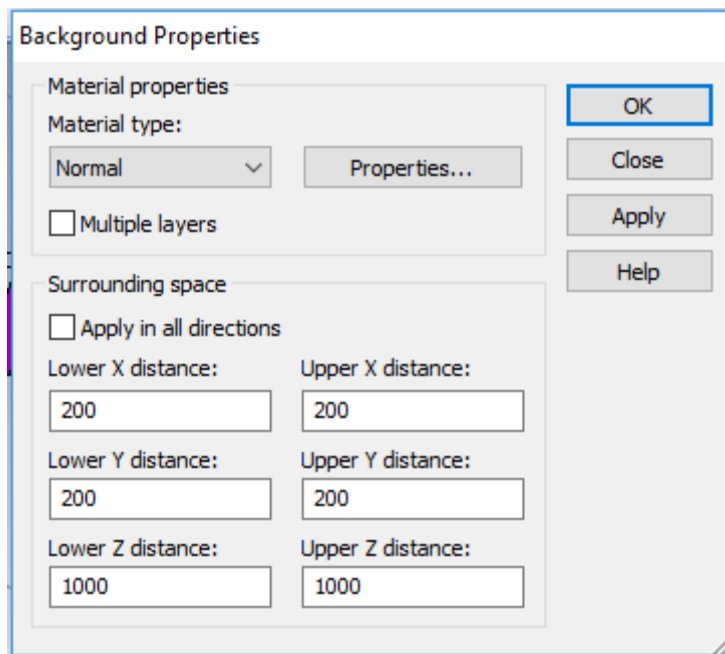
شکل (۳ - ۱۱): انتخاب ساختار برای تکرار



شکل (۳ - ۱۲): فرم تکرار ساختار

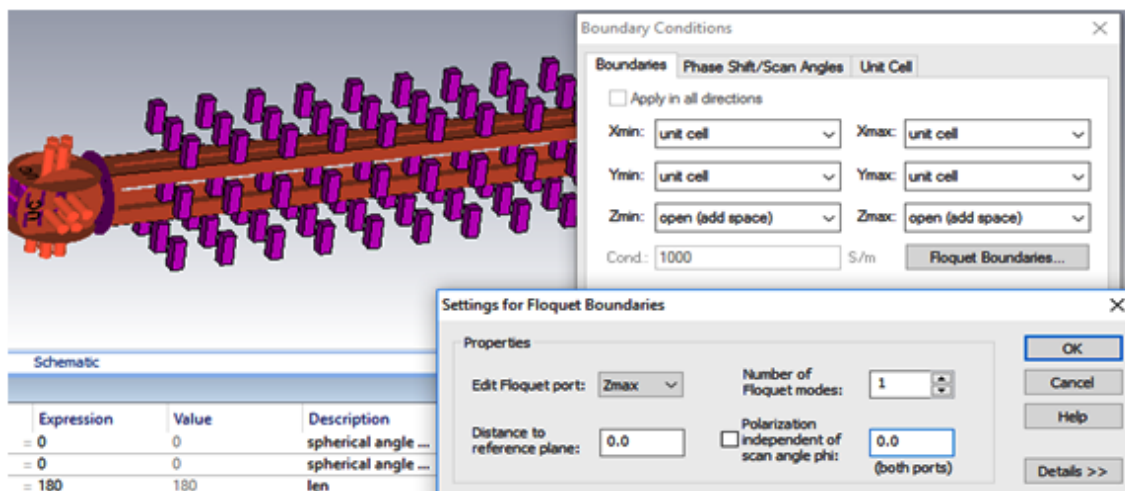
عدد ۷۶۰ نانومتر برای z، ثابت شبکه بلور فوتونی و عدد ۱۶ تعداد تکرار را مشخص می‌کند.

۱۰. حالا برای شبیه‌سازی آماده هستیم و باید مقدمات آن را فراهم کنیم. به منوی Simulation رفته و Background را می‌زنیم و حدود را مشخص می‌کنیم شکل (۳-۱۳).



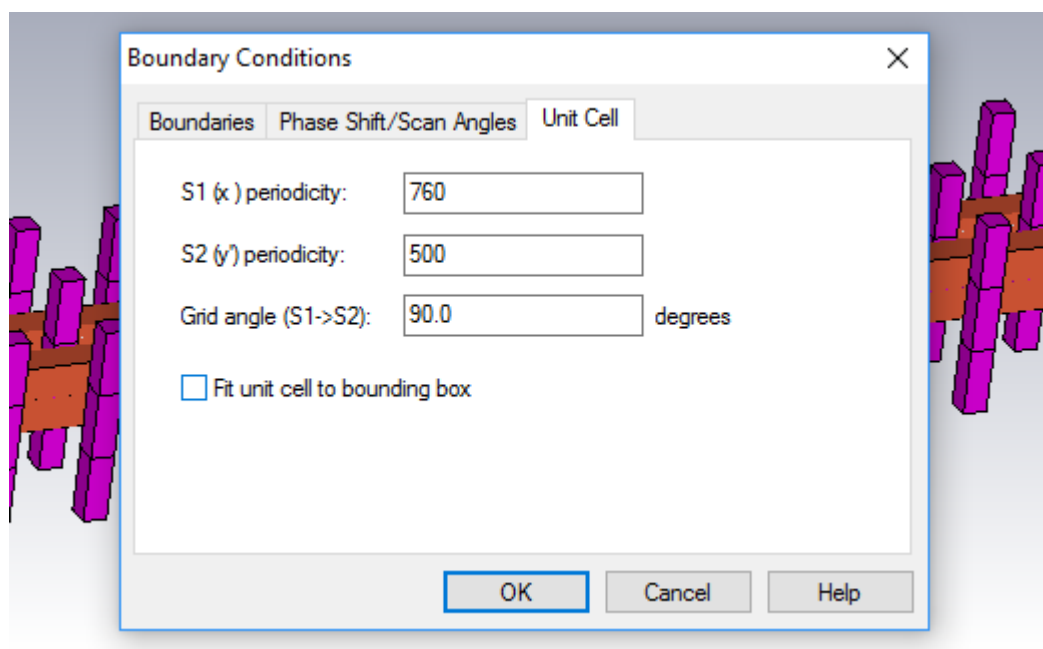
شکل (۳-۱۳): مشخص نمودن حدود

۱۱. شرایط مرزی: از منوی Simulation، Boundaries را می‌زنیم. دیده میشود که خود برنامه Unit Cell را انتخاب کرده است. دکمه Floquet Boundaries را زده و مقادیر Zmin و Zmax را برابر با یک قرار داده و فرم را Ok می‌کنیم شکل (۳-۱۴).



شکل (۳-۱۴): مشخص نمودن شرایط مرزی

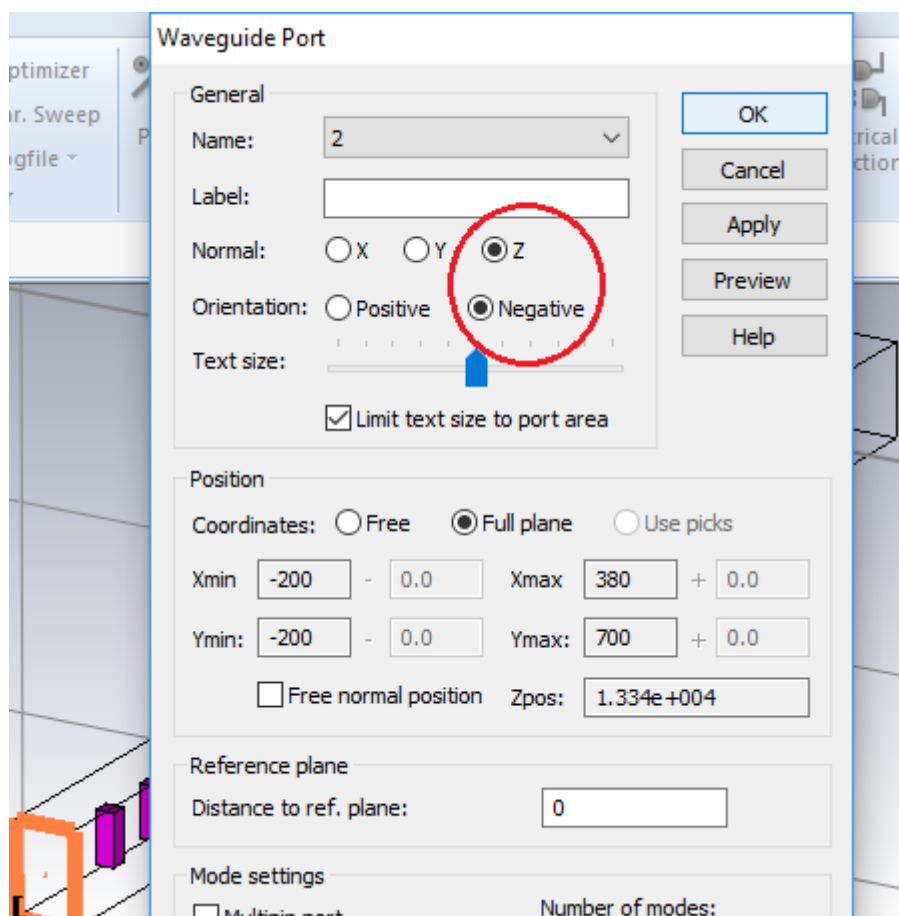
حالا به برگه Unit Cell رفته و علامت Fit unit cell to bounding box را برداشته و مقدار $S1(x)$ را برابر ۷۶۰ و $S2(y')$ را ۵۰۰ قرار داده و فرم را Ok می‌کنیم شکل (۳ - ۱۵).



شکل (۳ - ۱۵): ادامه شرایط مرزی

۱۲. اکنون دو منبع نور را در دوطرف ساختار تعریف می‌کنیم. از منوی Simulation از قسمت Sources and Loads دکمه Waveguide port را می‌زنیم. از فرم باز شده Z و Positive را انتخاب و Ok می‌کنیم. پورت یک ایجاد می‌شود. مجدداً فرم را باز کرده و این بار Z و Negative را انتخاب و Ok می‌کنیم. پورت دو نیز ایجاد می‌شود شکل (۳ - ۱۶).

اکنون تمام مقدمات فراهم شده و نرم‌افزار آماده شروع محاسبات شبیه‌سازی است. مدت زمان شبیه‌سازی وابسته به میزان داده‌هایی است که از آن خواسته‌ایم. این زمان می‌تواند از چند دقیقه تا چندین ساعت به طول انجامد. این شبیه‌سازی قرار است میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی را در بسامدهای مختلف (۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ تراهرتز) و همچنین نمودارهای انعکاس، عبور و جذب را به عنوان خروجی بدهد.



شکل (۳ - ۱۶): تعریف منابع نور

۳-۴-۶ شروع شبیه‌سازی

جهت آغاز روند شبیه‌سازی به منوی Home رفته و از قسمت Simulation دکمه Start

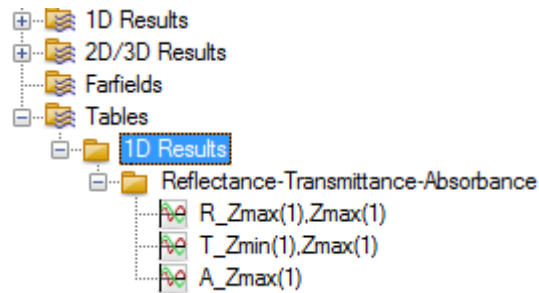
Simulation را انتخاب می‌کنیم، پس از باز شدن پنجره Excitation list دکمه Ok را می‌زنیم. پس از

اتمام شبیه‌سازی که در این نمونه حدوداً ۳۰ دقیقه طول می‌کشد، نتایج آماده مشاهده هستند.

۳-۴-۷ مشاهده نتایج شبیه‌سازی

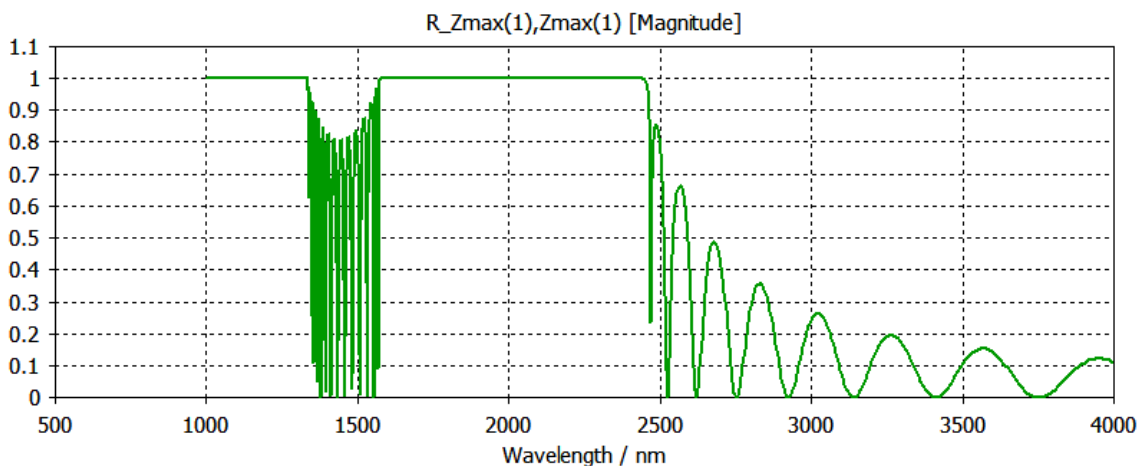
- مشاهده نمودارها

جهت مشاهده نمودارها از منوی Home قسمت منوی درختی (Navigation tree) در سمت چپ صفحه Tables را انتخاب و باز می‌کنیم. سپس 1D – Result و بعد زیر شاخه آن را باز می‌کنیم. در این جا نمودارهای انعکاس، عبور و جذب قابل مشاهده هستند شکل (۳ – ۱۷).

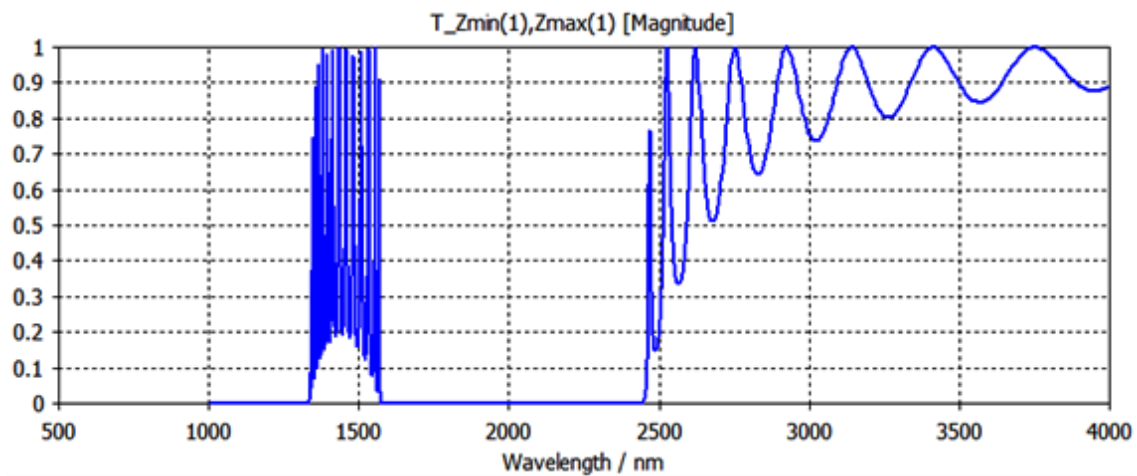


شکل (۳ – ۱۷): نمودار درختی برای مشاهده نتایج

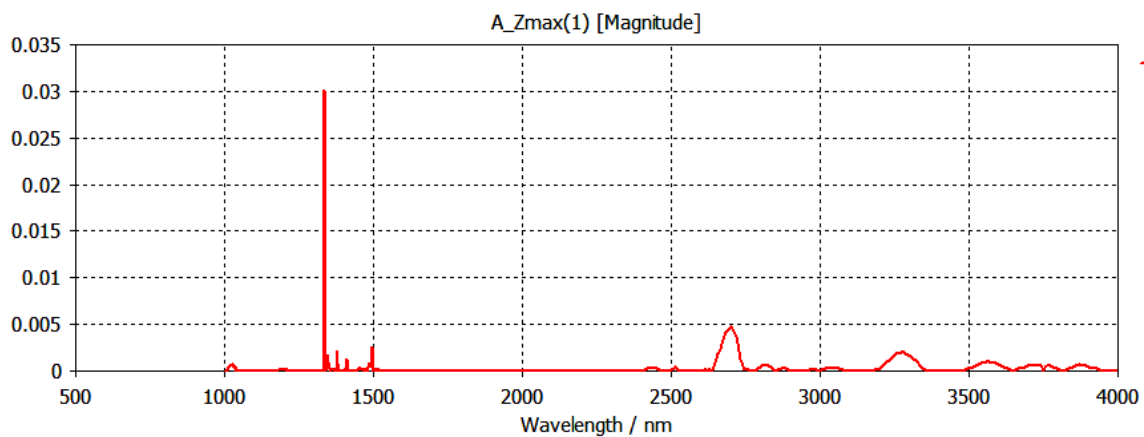
در شکل‌های (۳ – ۱۸) الی (۳ – ۲۰) به ترتیب نمودارهای انعکاس، انتقال (عبور) و جذب بلور فوتونی طراحی شده قابل مشاهده هستند.



شکل (۳ – ۱۸): نمودار انعکاس بلور فوتونی

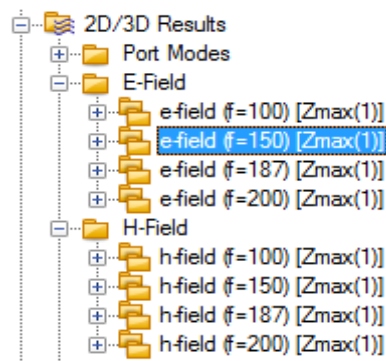


شکل (۳ - ۱۹): نمودار انتقال بلور فوتونی

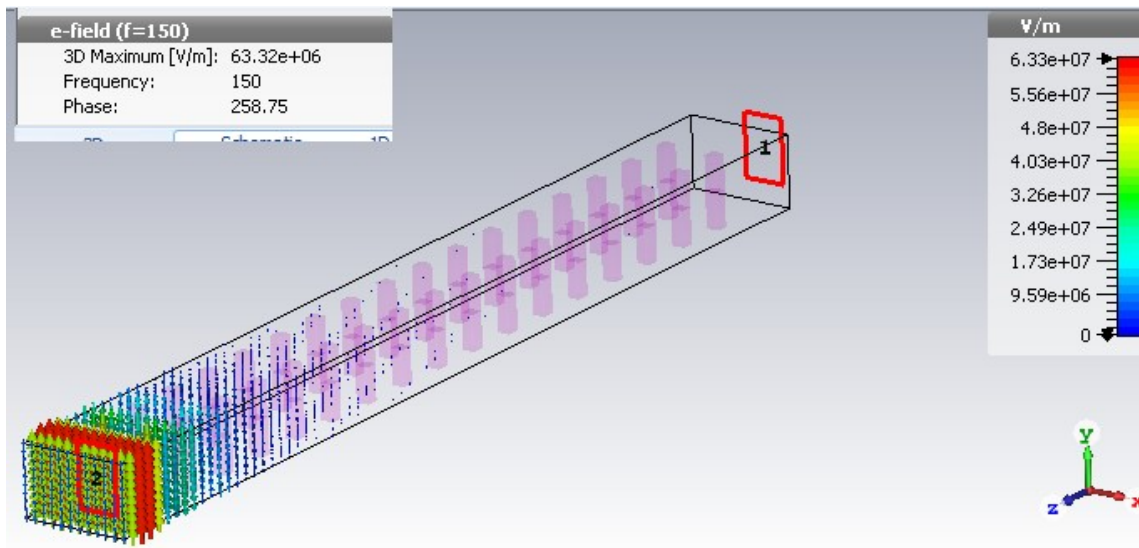


شکل (۳ - ۲۰): نمودار جذب بلور فوتونی

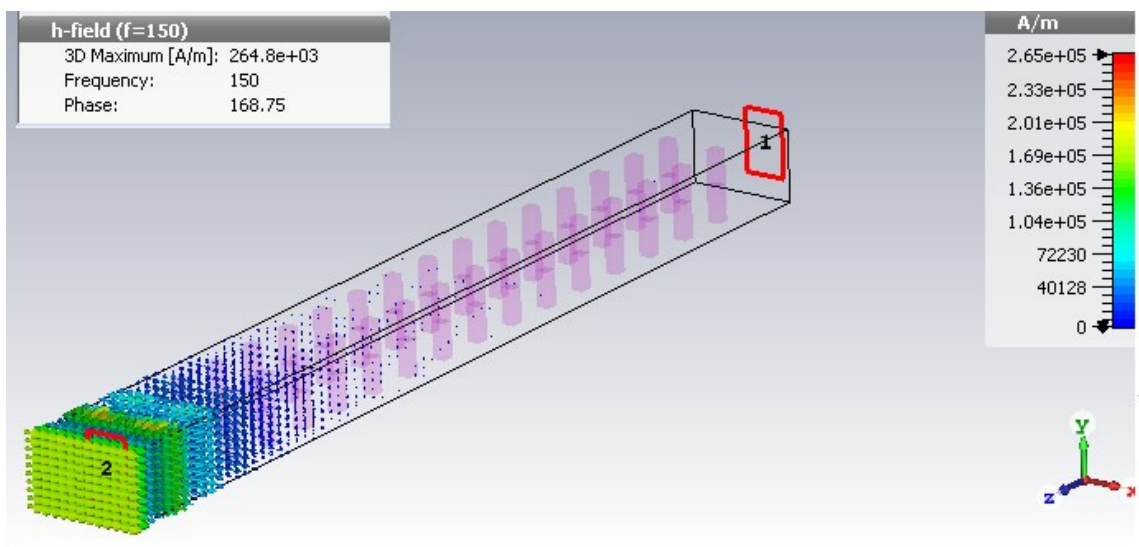
جهت مشاهده میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی نیز از نمودار درختی 2D/3D Results و پس از آن بسامد مورد نظر را انتخاب می‌کنیم شکل‌های (۳ - ۲۱) تا (۳ - ۲۳).



شکل (۳ - ۲۱): نمودار درختی برای مشاهده میدان‌ها



شکل (۳ - ۲۲): مشاهده میدان الکتریکی در بسامد ۱۵۰ تراهرتز



شکل (۳ - ۲۳): مشاهده میدان مغناطیسی در بسامد ۱۵۰ تراهرتز

این فصل را همین جا به پایان برده و توضیحات تکمیلی و تحلیل نمودارها را ضمن ادامه این

تحقیق در فصل بعد خواهیم آورد.

فصل چهارم

طراحی و شبیه‌سازی آینه بلور

فوتونی دوبعدی پیشنهادی و

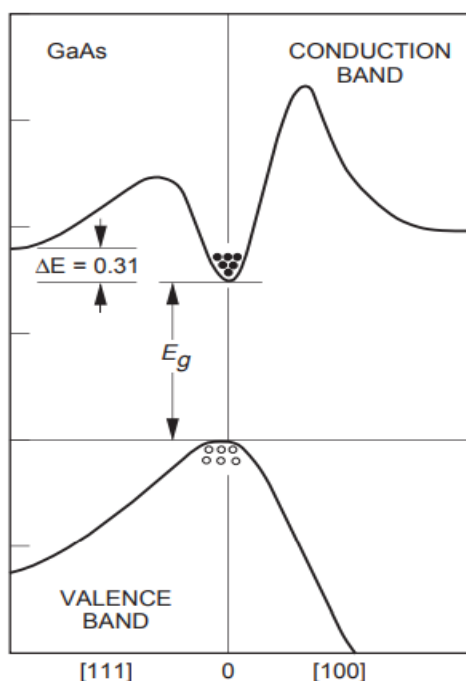
تحلیل نتایج

۴-۱ مقدمه

در فصل‌های گذشته به درک اصول کارکرد و خواص بلورهای فوتونی و روش شبیه‌سازی آن توسط نرم‌افزار CST پرداختیم. اکنون که مقدمات کافی فراهم شده است می‌توانیم به طراحی و شبیه‌سازی پروژه خود یعنی آینه بلور فوتونی دوبعدی بپردازیم. از آن‌جا که این آینه جهت استفاده در لیزرهای وکسل طراحی می‌شود، و لیزرهای وکسل نیز در سیستم‌های مخابرات نوری به طور وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند، لذا طول موج ۱۵۵۰ نانومتر را که طول موج رایج مورد استفاده در اغلب سیستم‌های مخابراتی نوری است، مبنای طراحی قرار می‌دهیم.

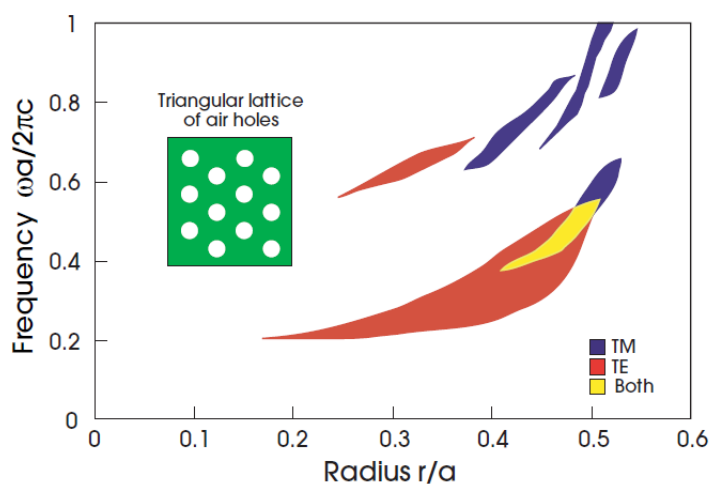
۴-۲ طراحی آینه بلور فوتونی دوبعدی

در ابتدا باید جنس ماده مورد استفاده در طراحی را انتخاب نماییم. GaAs یک نیمه‌هادی با شکاف باند مستقیم است. به این معنی که حداقل مقدار باند هدایت مستقیماً مقابل حداکثر مقدار باند ظرفیت قرار دارد شکل (۴-۱).



شکل (۴-۱): ساختار باند انرژی GaAs [۲۷]

این ویژگی باعث می‌شود GaAs یک ماده بسیار مفید برای ساخت دیودهای نوری و لیزرهای نیمه‌هادی باشد و به همین خاطر به طور وسیعی در صنایع الکترونیک نوری بکار می‌رود. لذا برای طراحی از این ماده استفاده خواهیم کرد. برای نور با طول موج‌های بین $\lambda = 1$ تا $\lambda = 10$ میکرومتر، ثابت دی‌الکتریک GaAs برابر $11/4$ می‌باشد. به منظور تهیه‌ی ساختار بازتابی، نیاز داریم هندسه‌ی بلوری انتخاب شود که یک شکاف نواری فوتونی تولید کند. همچنین باید هندسه‌ای را انتخاب کنیم که ساختن آن در ابعاد میکرونی نسبتاً آسان باشد. بعد از مراجعه به اطلس نقشه‌های شکاف، نظیر آن چه در مرجع ۲۰ آورده شده است، به طور خاص به یک هندسه‌ی ساده با آن مشخصات توجه می‌کنیم. شبکه‌ی مثلثی از ستون‌های هوا در GaAs. این ساختار برای هر دو مد TE و TM شکاف‌های نواری دارد، شکاف نواری هر دو قطبش هم‌پوشانی دارند و می‌توانیم این ساختار را به سادگی توسط حکاکی کردن در ورق GaAs بسازیم. نقشه‌ی شکاف در شکل (۱ - ۳) آورده شده است (جهت دسترسی آسان‌تر در این جا تکرار شده است شکل (۴ - ۲)). اگر بخواهیم وسیله‌ای حساس به قطبش بسازیم، باید یک شکاف نواری برای مدهای TE یا TM به تنهایی انتخاب کنیم. در این جا، ناحیه هم‌پوشانی روی نقشه‌ی شکاف را انتخاب می‌کنیم که در آن همه‌ی نور هم صفحه، بدون توجه به قطبش بازتاب می‌شود. حد ضخامت ناحیه (بزرگ‌ترین شکاف نواری) وقتی $r/a = 0/45$ است، رخ می‌دهد و شکاف حول $\frac{\omega a}{2\pi c} = 0/5$ متمرکز می‌شود.



شکل (۴ - ۲): نقشه شکاف یک شبکه مثلثی از ستون‌های هوا در دی‌الکتریک $(\epsilon = 11/4)$ [۱۵]

با توجه به این که ما طول موج را 1550 نانومتر در نظر گرفته‌ایم بنابراین:

$$\lambda = \frac{2\pi c}{\omega} = 1/55 \mu m$$

$$\frac{\omega a}{2\pi c} = \frac{a}{\lambda} = \frac{a}{1/55 \mu m} = 0/5 \quad (1-4)$$

و از رابطه اخیر مقدار a یعنی ثابت شبکه بلور بدست می‌آید:

$$a = 0/775 \mu m$$

از شرط طول موج، مقدار ثابت شبکه را بدست آوردیم و اکنون از شرط $r / (a = 0/45)$ در

جایی که شکاف نواری کامل است مقدار r (شعاع ستون‌های هوا) را بدست می‌آوریم:

اکنون ساختار کاملاً مشخص بوده و تمامی ابعاد مورد نظر را داریم. از زیر لایه‌ی GaAs که

در آن سوراخ‌هایی از هوا با شعاع $0/34875$ میکرومتر و با الگوی مثلثی و با ثابت شبکه‌ای $0/775$ میکرومتر حکاکی شده‌است.

همان طور که در شکل (۴ - ۲) مشاهده می‌کنیم، محدوده شکاف نواری از $0/45$ تا $0/55$

است. نسبت شکاف به نیم شکاف 20% است. نوار بسامد متناظر با یک نوار طول موج از $0/73$ تا $1/7$ میکرومتر است. بنابراین این ناحیه به قدر کافی محدوده بسامد مورد نظر ما را پوشش می‌دهد.

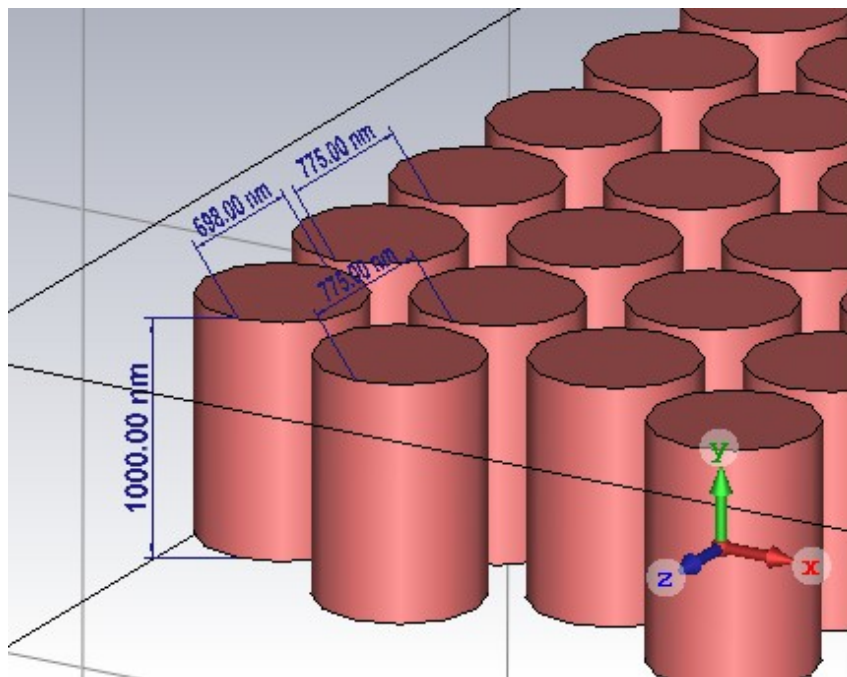
کلیه اطلاعات لازم جهت انجام شبیه‌سازی شامل ابعاد و جنس مواد، الگوی ساختار و محدوده

طول موج (بسامد) را در اختیار داریم. حالا مطابق آنچه که در بخش ۳ - ۴ - ۵ در فصل سوم

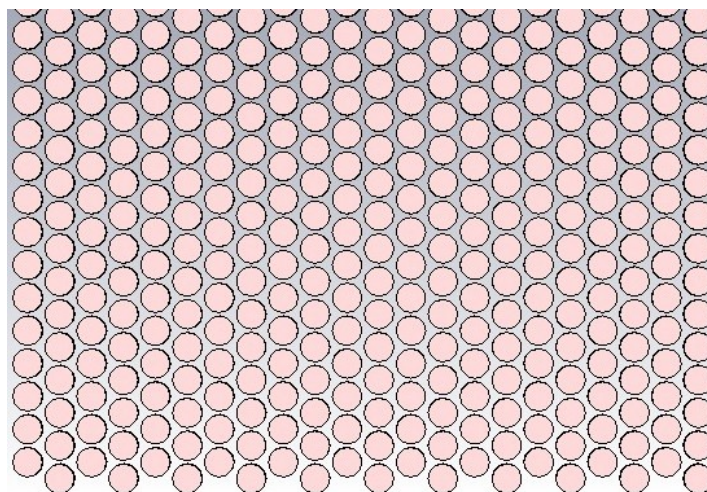
آوردیم مرحله به مرحله شبیه‌سازی را انجام داده و نتایج را استخراج کرده و آن‌ها را تحلیل خواهیم

نمود. در شکل‌های (۴ - ۳) و (۴ - ۴) ساختار طراحی شده در این پایان‌نامه و ابعاد آن نشان داده

شده است. در این شکل قطر (۲r) حفره‌های هوا ۶۹۸ نانومتر و ثابت شبکه مثلثی بلور فوتونی (a)، ۷۷۵ نانومتر و عمق حفره‌ها ۱۰۰۰ نانومتر در نظر گرفته شده‌اند.



شکل (۴-۳): ساختار طراحی شده با شبکه مثلثی از ستون‌های هوا در دی‌الکتریک GaAs



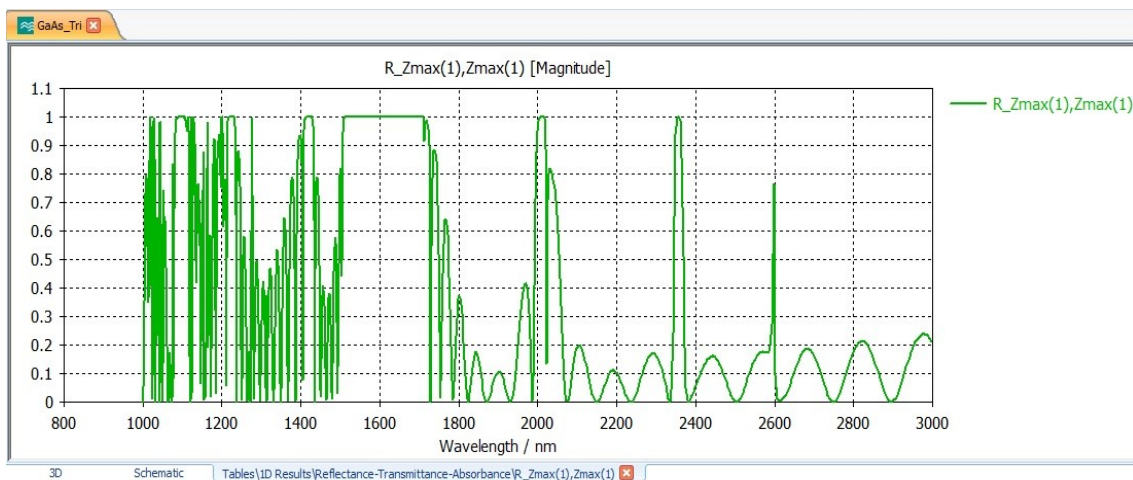
شکل (۴-۴): نمای ساختار طراحی شده از بالا

۳-۴ استخراج و تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی

۱-۳-۴ بررسی نمودارهای بازتاب، عبور و جذب

پس از انجام شبیه‌سازی ساختار، خروجی‌های مورد نظر را به صورت زیر مشاهده خواهیم

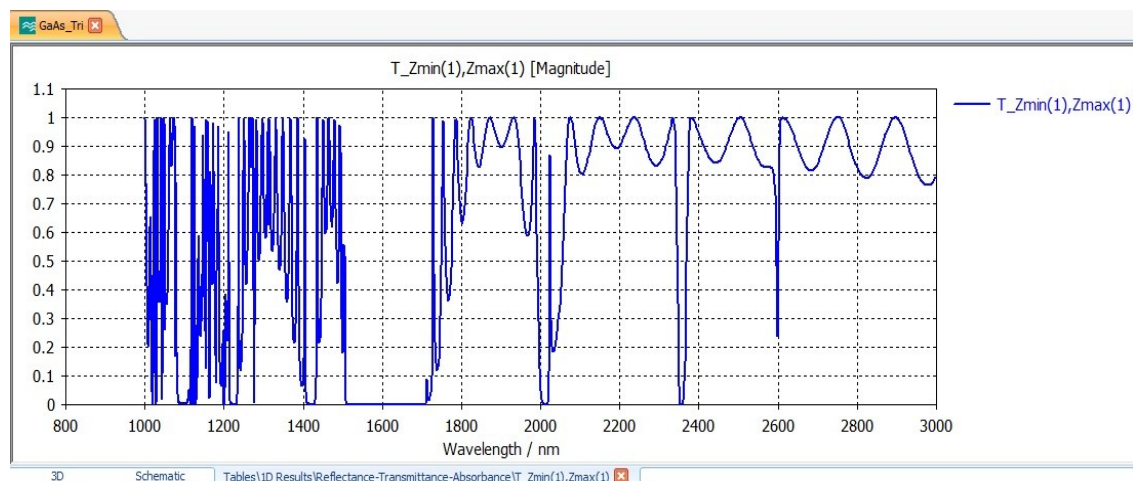
کرد. در شکل (۴-۵) نمودار بازتاب بلور به ازای طول موج‌های مختلف دیده می‌شود.



شکل (۴-۵): نمودار بازتاب امواج در بلور طراحی شده با GaAs

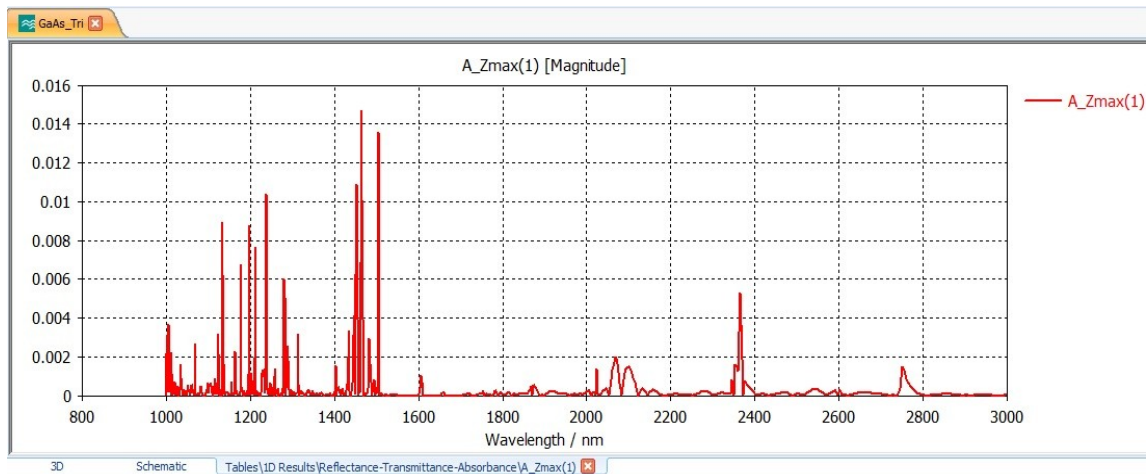
در شکل (۴-۶) نمودار عبور یا انتقال امواج در بلور به ازای طول موج‌های مختلف دیده می‌-

شود.



شکل (۴-۶): نمودار عبور امواج در بلور طراحی شده با GaAs

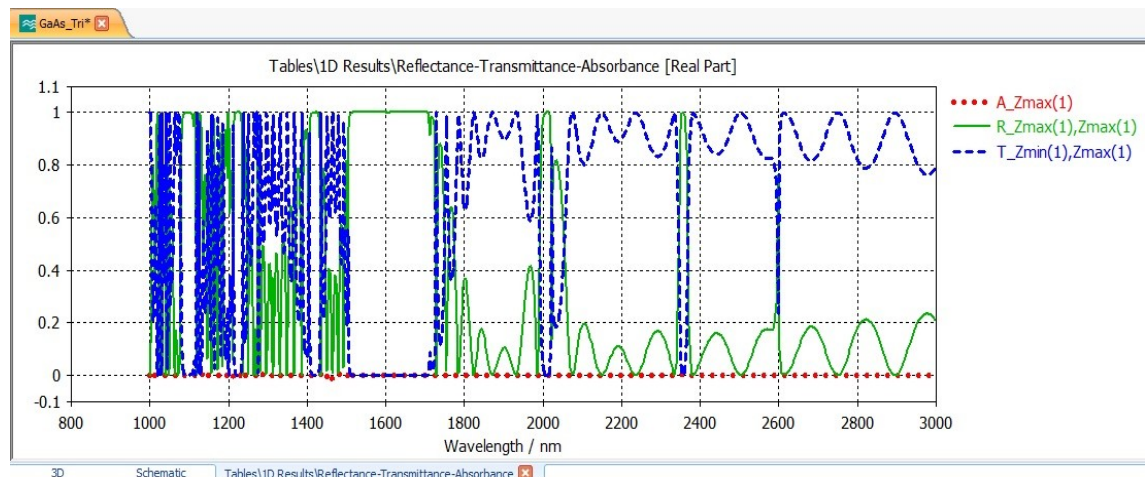
در شکل (۴ - ۷) نمودار جذب امواج در بلور به ازای طول موج‌های مختلف دیده می‌شود.



شکل (۴ - ۷): نمودار جذب امواج در بلور طراحی شده با GaAs

برای مقایسه بهتر هر سه نمودار بازتاب، عبور و جذب امواج با هم در شکل (۴ - ۸) به طور

همزمان آورده شده‌اند.

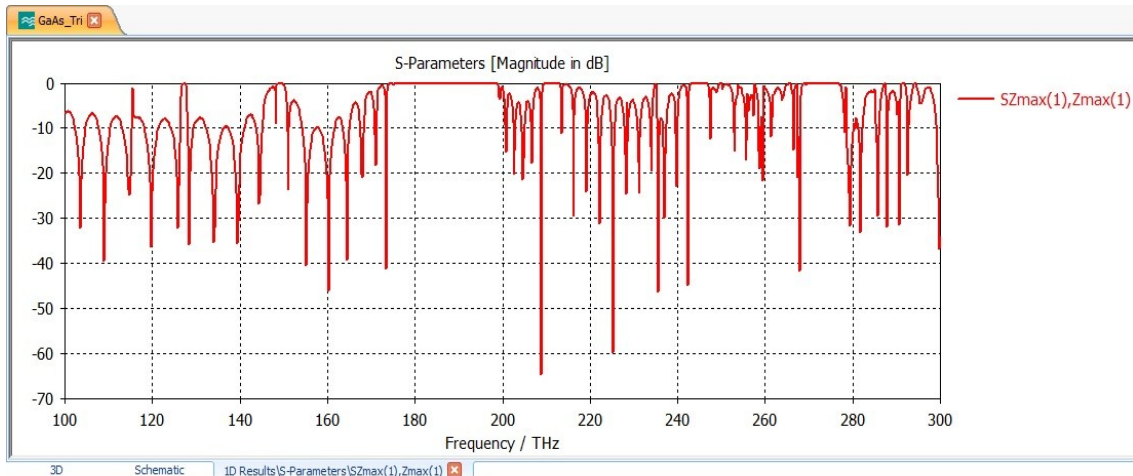


شکل (۴ - ۸): هر سه نمودار بازتاب، عبور و جذب امواج در بلور طراحی شده با GaAs

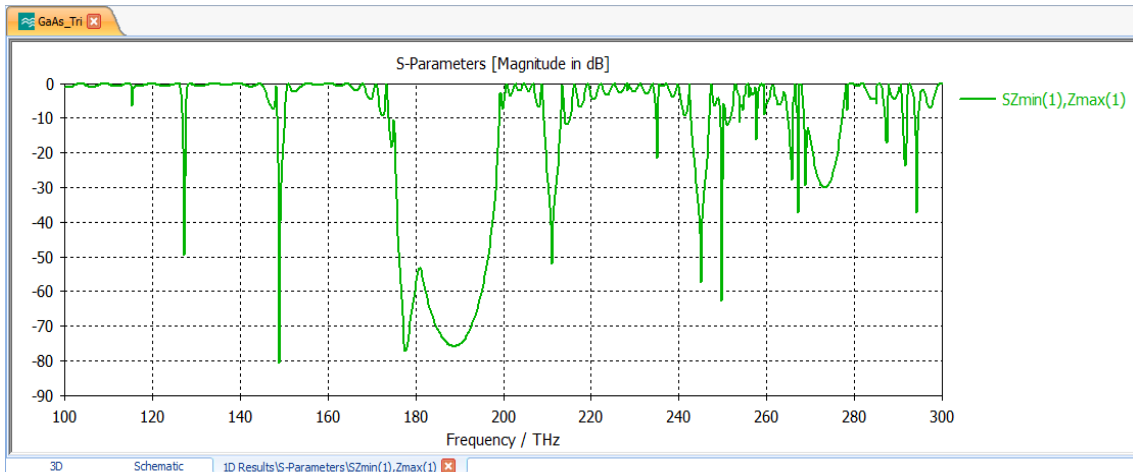
۴-۳-۲ بررسی نمودار پارامترهای پراکندگی

از پارامترهای دیگری که می‌توان مورد بررسی قرار داد، پارامترهای پراکندگی S_{11} و S_{22} است

که در شکل‌های (۴-۹) و (۴-۱۰) آمده‌اند.



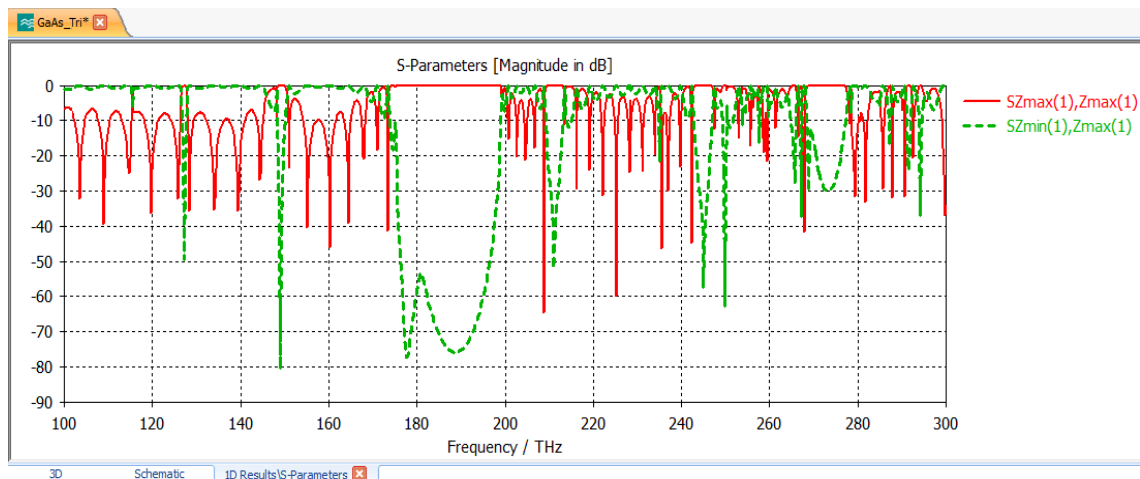
شکل (۴-۹): نمودار پراکندگی S_{11}



شکل (۴-۱۰): نمودار پراکندگی S_{22}

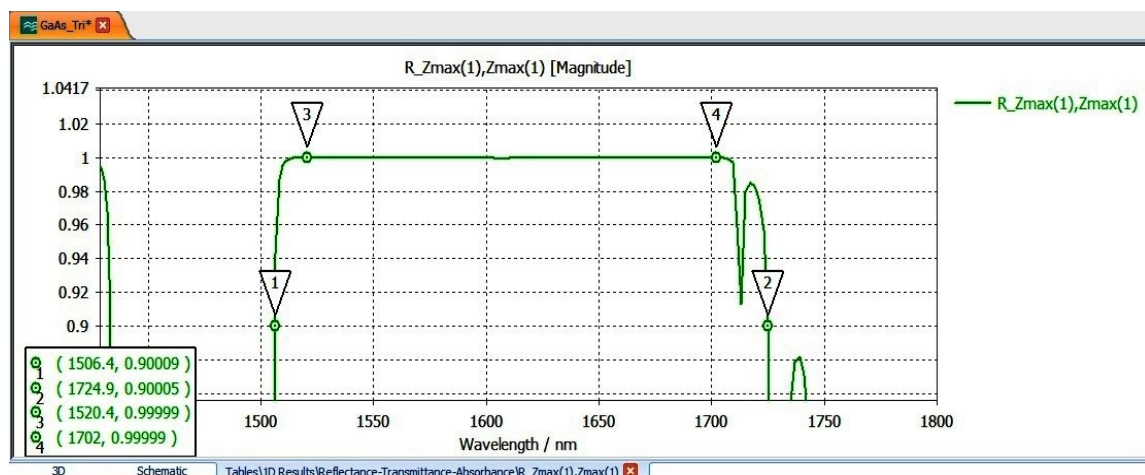
برای مقایسه بهتر هر دو نمودار پراکندگی با هم در شکل (۴-۱۱) به طور هم‌زمان آورده

شده‌اند.



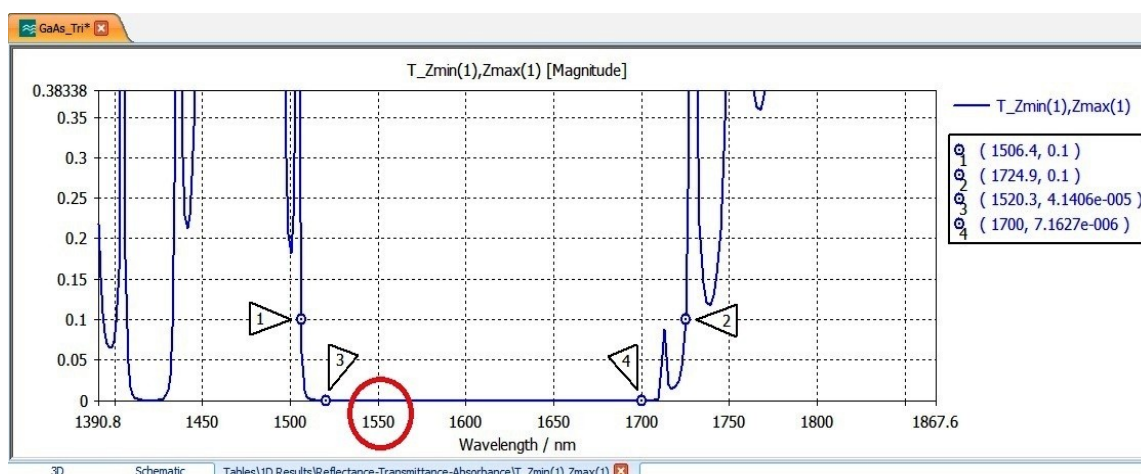
شکل (۴-۱۱): هر دو نمودار پراکندگی S_{11} و S_{22} با هم

از جمله پارامترهای اساسی مورد نظر در بازتاب کننده بلور فوتونی محدوده بسامدی بازتاب، عبور و جذب امواج و اندازه آنهاست که اکنون به صورت دقیق تر به آن می پردازیم. همان طور که از شکل (۴-۵) نمودار بازتاب پیداست، ساختار طراحی شده دارای چندین باند توقف است که در بازه های بسامدی مختلف قرار داشته و در آنها میزان بازتاب بسیار نزدیک به ۱۰۰٪ است. اما از آن جا که طراحی را برای طول موج ۱۵۵۰ نانومتر انجام داده ایم، توجه خود را به باند توقف اصلی که طول موج مورد نظر ما را پوشش می دهد جلب می کنیم. در شکل (۴-۱۲) نمودار بازتاب به صورت دقیق تر رسم شده است که نقاطی از آن را نشان گذاری کرده ایم.



شکل (۴-۱۲): نمودار نشان گذاری شده بازتاب امواج در بلور طراحی شده با GaAs

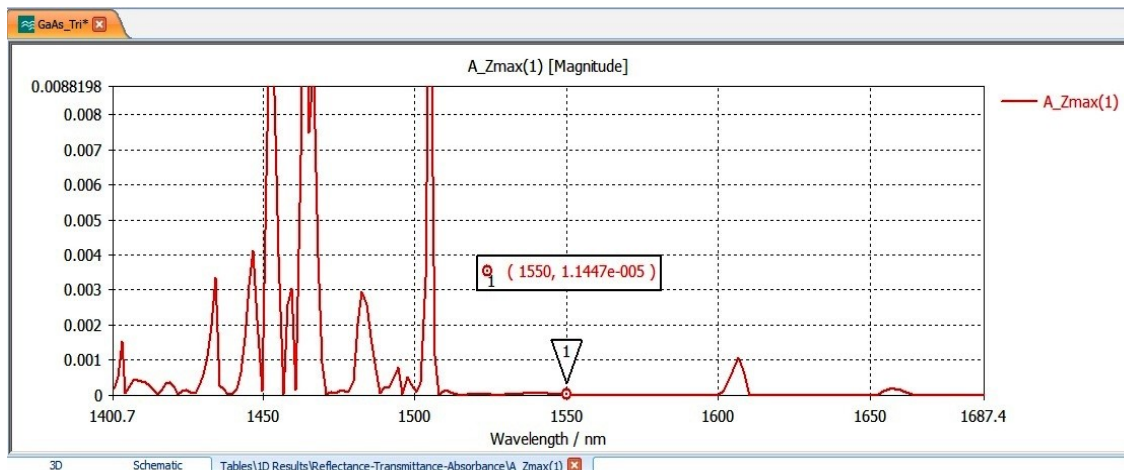
همان طور که ملاحظه می‌شود در محدوده طول موج ۱۵۰۶/۴ تا ۱۷۲۴/۹ نانومتر ساختار دارای بازتاب بالای ۹۰٪ بوده (نقاط ۱ و ۲) و در محدوده ۱۵۲۰/۴ تا ۱۷۰۲ نانومتر دارای بازتاب ۱۰۰٪ است (نقاط ۳ و ۴) که طول موج مورد نظر ما در این محدوده قرار دارد. بنابراین از نظر میزان بازتاب در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر خواسته ما از عمل کرد ساختار تأمین شده است. حال از نظر میزان عبور امواج در باند توقف اصلی نمودار را بررسی می‌کنیم. در شکل (۴ - ۱۳) نمودار عبور به طور دقیق تر و نشان گذاری شده آمده است.



شکل (۴ - ۱۳): نمودار نشان گذاری شده عبور امواج در بلور طراحی شده با GaAs

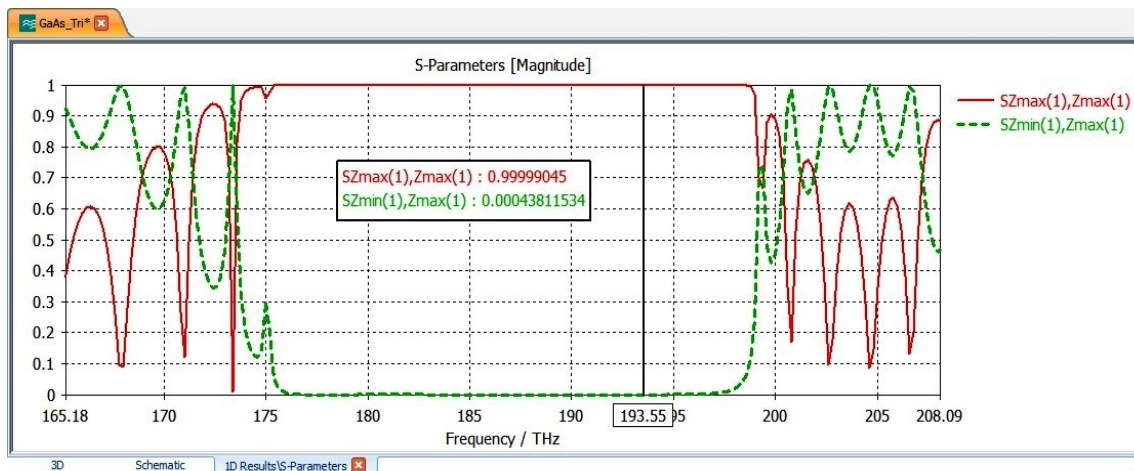
در شکل فوق به ازای طول موج‌های بین ۱۵۰۶,۴ تا ۱۷۲۵ نانومتر میزان عبور کمتر از ۱۰٪ و در محدوده ۱۵۲۰ تا ۱۷۰۰ نانومتر با تقریب خوبی صفر است. در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر نیز میزان عبور صفر بوده و خواسته ما تأمین شده است.

در نمودار جذب موج که در شکل (۴ - ۱۴) دیده می‌شود نیز همین گونه است. یعنی در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر نیز میزان جذب موج بسیار ناچیز بوده و در حد صفر است.



شکل (۴ - ۱۴): نمودار نشان گذاری شده جذب امواج در بلور طراحی شده با GaAs

با توجه به نمودارهای پراکندگی نیز مطالب فوق قابل مشاهده است. در شکل (۴ - ۱۵) این نمودارها را در طول موج مورد نظر که معادل بسامد $193/55$ تراهرتز است، نشان گذاری نموده ایم.



شکل (۴ - ۱۵): نمودارهای پراکندگی نشان گذاری شده در بلور طراحی شده با GaAs

همان طور که دیده می شود، نمودار خط پیوسته S_{11} بوده که در تمام محدوده باند توقف اصلی دارای مقدار "یک" است و نشان دهنده این است که بازتاب موج تابیده شده در ورودی 100% است و بلور به صورت یک آینه کامل عمل می کند. نمودار S_{22} نیز که به صورت خط چین دیده می شود نمایانگر میزان بازتاب ناشی از موج تابیده شده ورودی در پورت خروجی است. می بینیم که مقدار

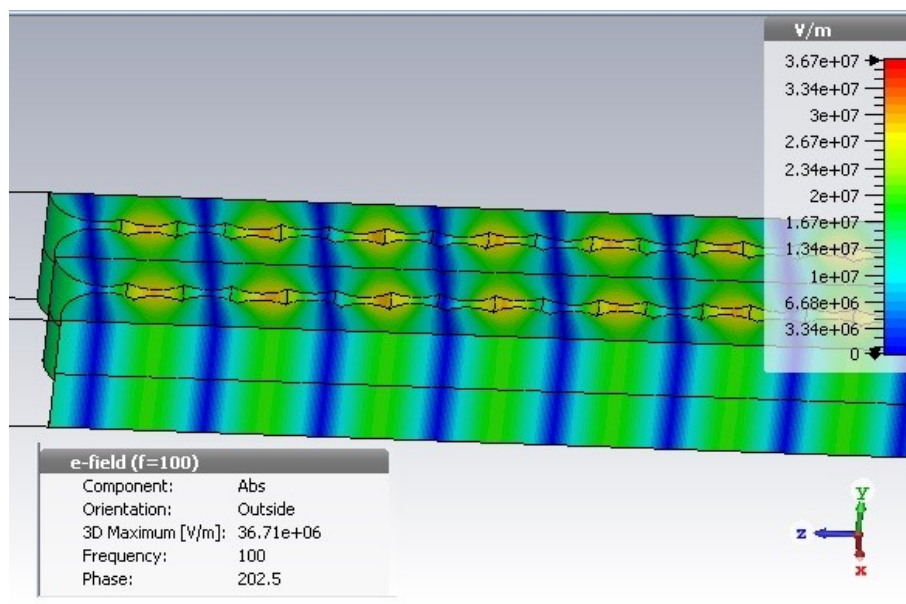
آن در تمام محدوده باند توقف اصلی "صفر" است و بازگوکننده این است که موج تابیده شده از بلور عبور نکرده و به خروجی نمی‌رسد. در بسامد ۱۹۳/۵۵ تراهرتز همین شرایط وجود دارد.

بنابراین پارامترهای پراکندگی نیز مطالب برگرفته از نمودارهای بارتاب، عبور و جذب را به خوبی و کاملاً تصدیق می‌کنند.

۴-۳-۳ بررسی توزیع میدان الکترومغناطیسی در بلور

پس از تحلیل نمودارها اکنون به بررسی وضعیت توزیع میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در مدهای TE و TM در بلور طراحی شده پرداخته و هر یک را به تنهایی به طور مستقل بررسی خواهیم کرد.

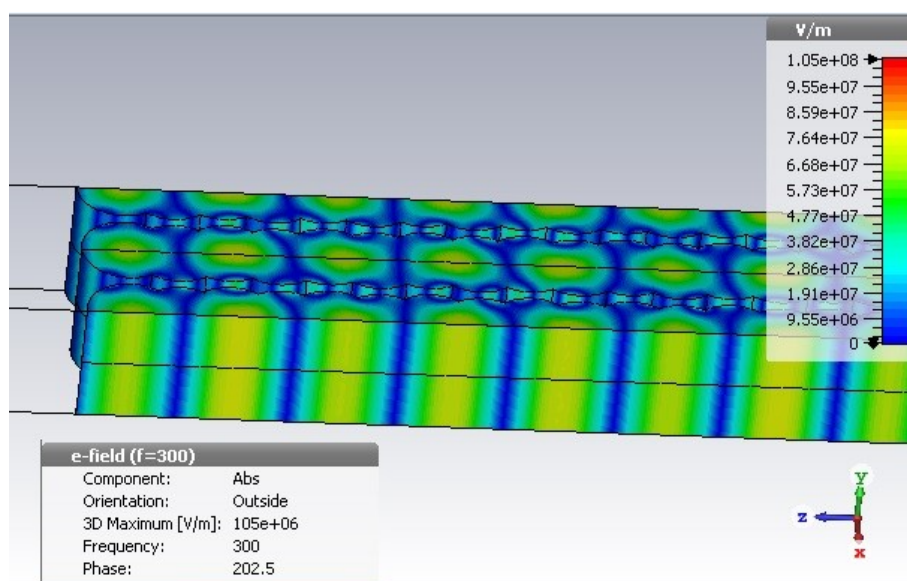
در شکل (۴-۱۶) توزیع میدان الکتریکی در بسامد ۱۰۰ تراهرتز که پایین‌تر از باند توقف است را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که موج به راحتی از بلور عبور می‌کند.



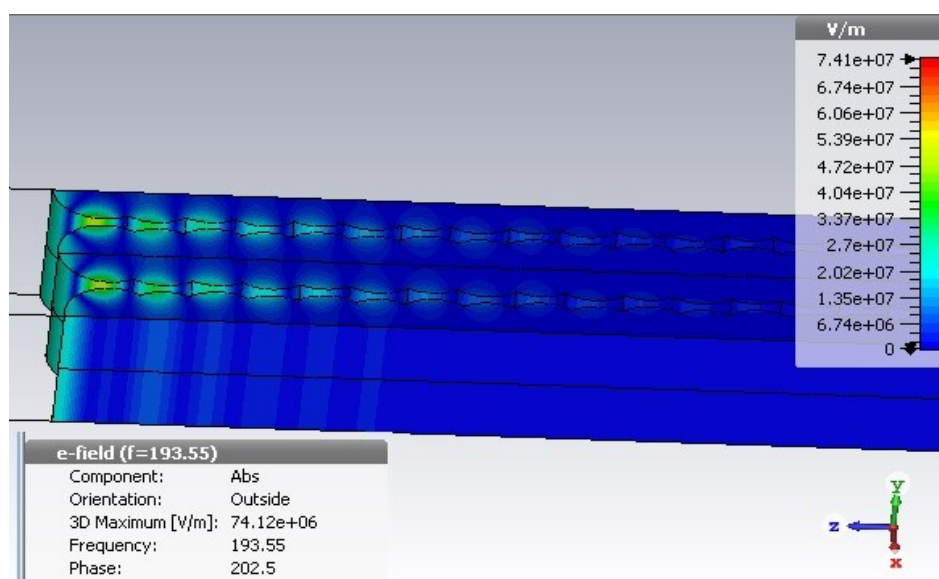
شکل (۴-۱۶): توزیع میدان الکتریکی در بسامد ۱۰۰ THz در بلور طراحی شده با GaAs

در شکل (۴ - ۱۷) توزیع میدان الکتریکی در بسامد ۳۰۰ تراهرتز که بالاتر از باند توقف است را نشان می‌دهد. در این بسامد نیز ملاحظه می‌شود که موج به راحتی از بلور عبور می‌کند.

در شکل (۴ - ۱۸) توزیع میدان الکتریکی در بسامد ۱۹۳/۵۵ تراهرتز که درون باند توقف اصلی است و بسامد مورد نظر ماست را نشان می‌دهد. در این بسامد نیز ملاحظه می‌شود که موج تابیده شده نمی‌تواند از بلور عبور کند و بازتاب کامل انجام می‌شود.



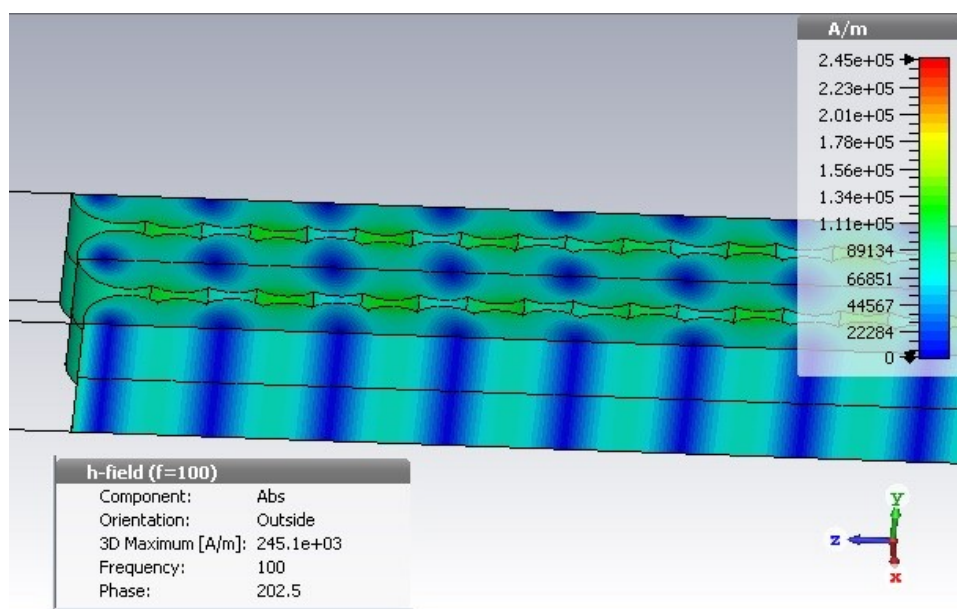
شکل (۴ - ۱۷): توزیع میدان الکتریکی در بسامد ۳۰۰ THz در بلور طراحی شده با GaAs



شکل (۴ - ۱۸): توزیع میدان الکتریکی در بسامد ۱۹۳/۵۵ THz در بلور طراحی شده با GaAs

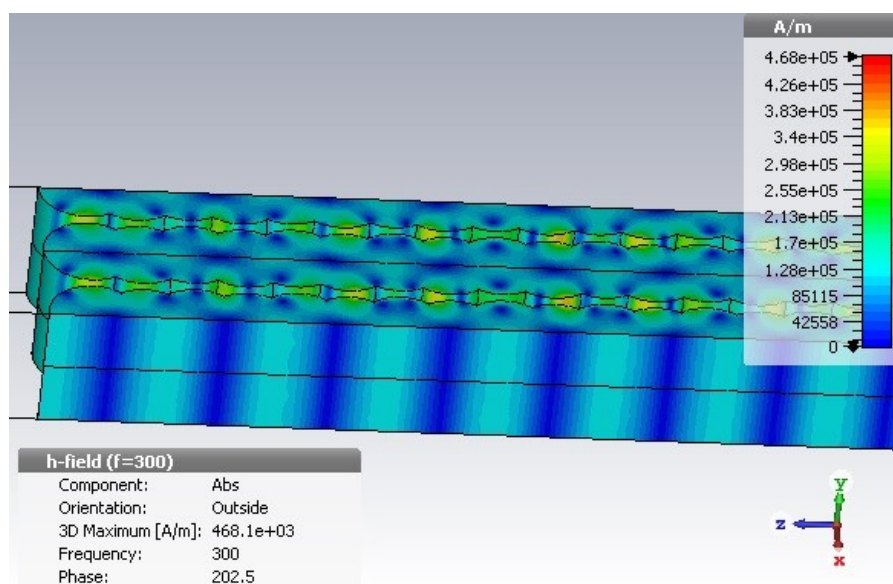
در شکل فوق دیده می‌شود که موج به هر میزان که در بلور وارد می‌شود مقدار زیادی از آن بازتاب می‌کند به طوری که پس از نفوذ به مقدار ۶ برابر ثابت شبکه بلور، کاملاً بازتاب کرده‌است. و این به معنای این است که از نظر میدان الکتریکی می‌توانیم طول ساختار را مثلاً تا ۱۰ برابر ثابت شبکه بلور در نظر بگیریم.

در شکل (۴ - ۱۹) توزیع میدان مغناطیسی در بسامد ۱۰۰ تراهرتز که پایین‌تر از باند توقف است را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که موج به راحتی از بلور عبور می‌کند.



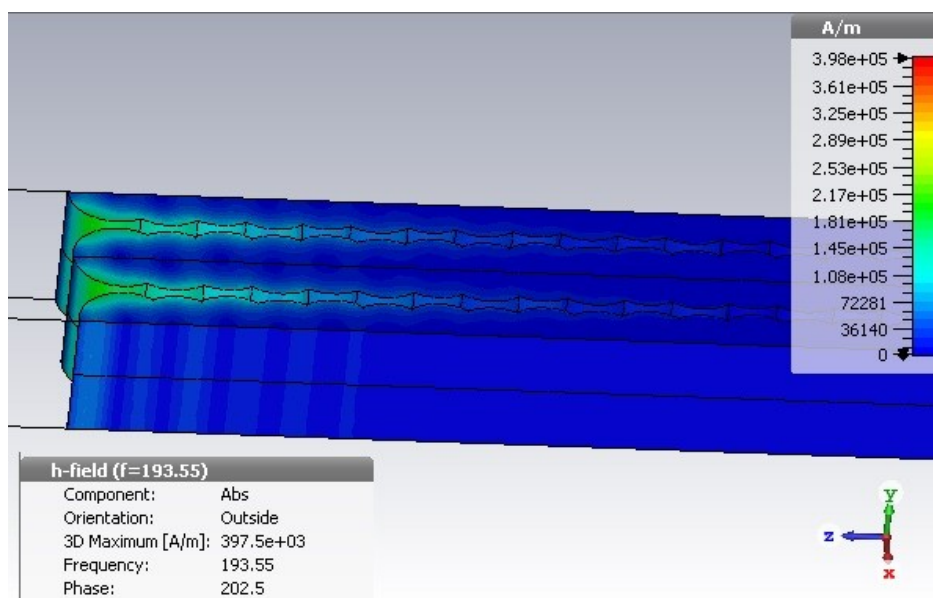
شکل (۴ - ۱۹): توزیع میدان مغناطیسی در بسامد ۱۰۰ THz در بلور طراحی شده با GaAs

در شکل (۴ - ۲۰) توزیع میدان مغناطیسی در بسامد ۳۰۰ تراهرتز که بالاتر از باند توقف است را نشان می‌دهد. در این بسامد نیز ملاحظه می‌شود که موج به راحتی از بلور عبور می‌کند.



شکل (۴-۲۰): توزیع میدان مغناطیسی در بسامد ۳۰۰ THz در بلور طراحی شده با GaAs

در شکل (۴-۲۱) توزیع میدان مغناطیسی در بسامد ۱۹۳/۵۵ تراهرتز که درون باند توقف اصلی است و بسامد مورد نظر ماست را نشان می‌دهد. در این بسامد نیز ملاحظه می‌شود که موج تابیده شده نمی‌تواند از بلور عبور کند و بازتاب کامل انجام می‌شود.



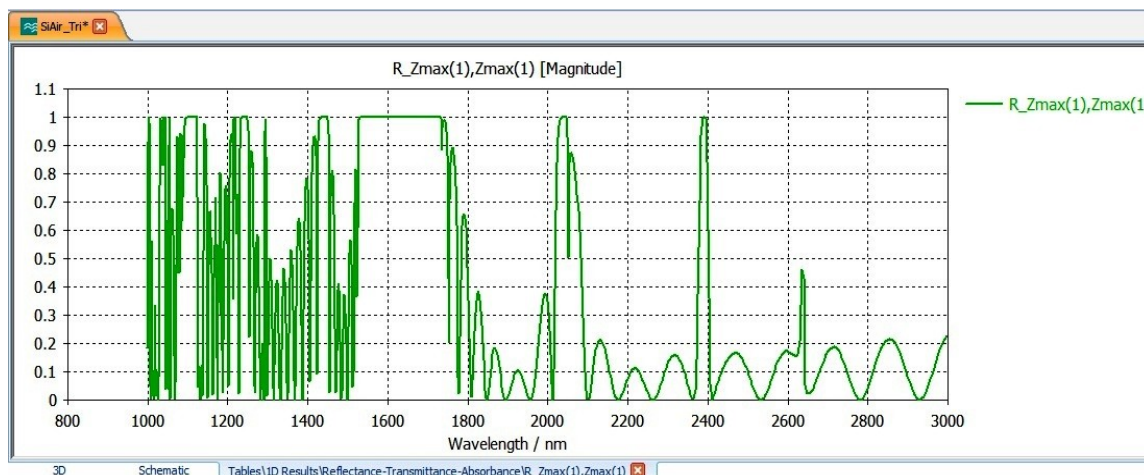
شکل (۴-۲۱): توزیع میدان مغناطیسی در بسامد ۱۹۳/۵۵ THz در بلور طراحی شده با GaAs

در شکل فوق دیده می‌شود که موج به هر میزان که در بلور وارد می‌شود مقدار زیادی از آن بازتاب می‌کند به طوری که پس از نفوذ به مقدار ۵ برابر ثابت شبکه بلور، کاملاً بازتاب کرده‌است. و این به معنای این است که از نظر میدان مغناطیسی نیز می‌توانیم طول ساختار را مثلاً تا ۱۰ برابر ثابت شبکه بلور در نظر بگیریم. با مقایسه شکل‌های (۴ - ۱۸) و (۴ - ۲۱) این نکته را درمی‌یابیم که در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر در مد TM بازتاب کامل موج اندکی زودتر از مد TE اتفاق می‌افتد. یعنی در مد TM موج کمتر در بلور نفوذ کرده‌است.

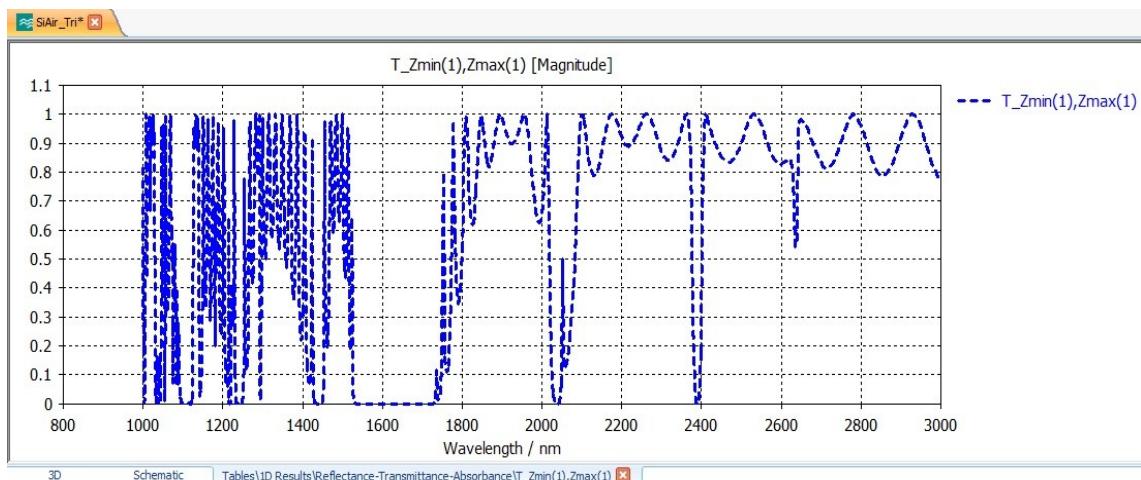
۴ - ۳ - ۴ شبیه‌سازی ساختار Si/Air و بررسی نتایج

همان‌طور که در ابتدای این پایان‌نامه گفته شد، جهت رسیدن به نتیجه مطلوب و اطمینان از نتایج طراحی را با همان فرضیات و مشخصات ولی با یک ماده دی‌الکتریک دیگر تکرار کرده و نتایج حاصل را با نتایج قبلی مقایسه می‌نماییم. در این جا دی‌الکتریک انتخاب شده سیلیسیوم است که حفره‌های هوا با مقطع دایره و به صورت شبکه مثلثی در آن ایجاد شده‌اند؛ مانند ماده قبلی.

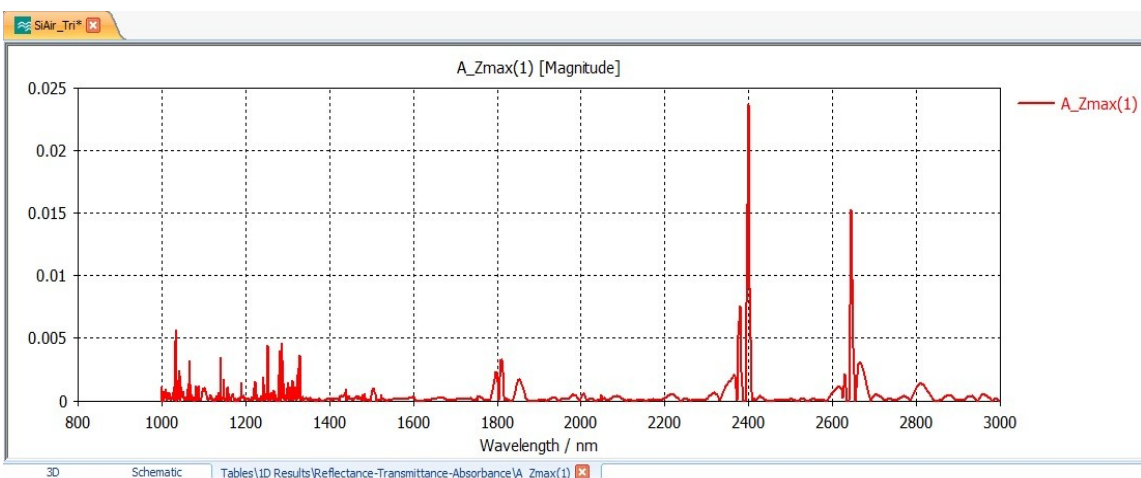
در شکل (۴ - ۲۲) نمودار بازتاب و در شکل (۴ - ۲۳) نمودار عبور و در شکل (۴ - ۲۴) نمودار جذب آورده شده‌اند.



شکل (۴ - ۲۲): نمودار بازتاب امواج در بلور طراحی شده با Si

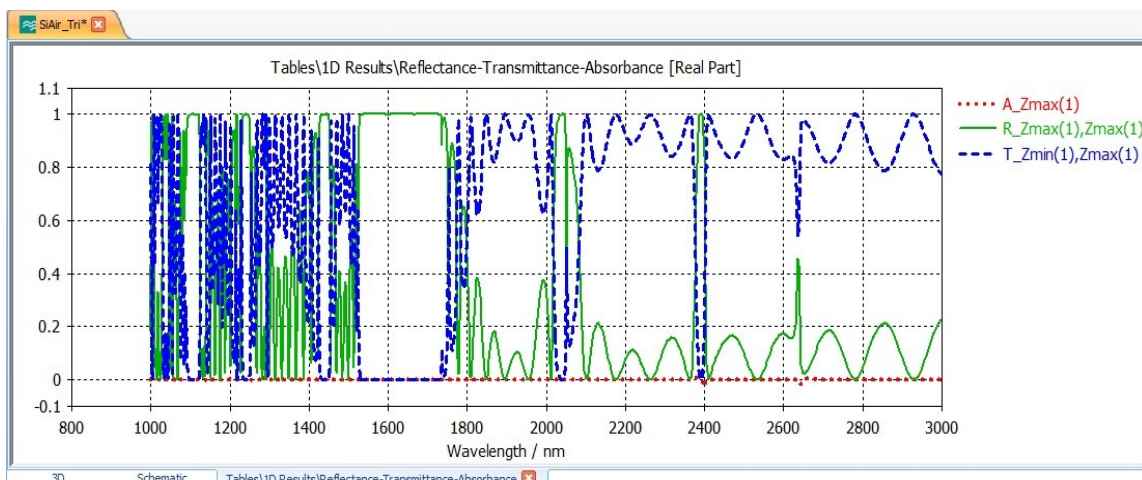


شکل (۴-۲۳): نمودار عبور امواج در بلور طراحی شده با Si



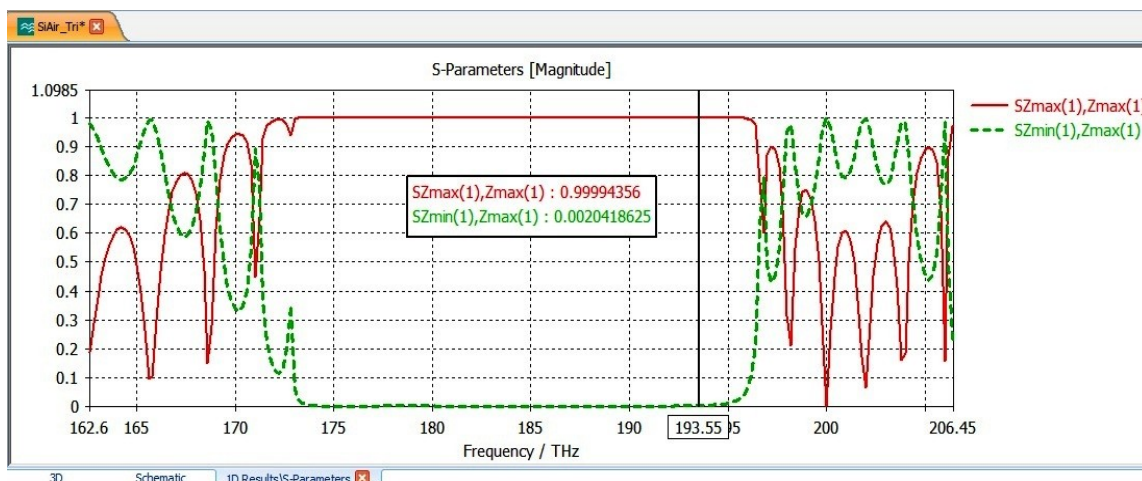
شکل (۴-۲۴): نمودار جذب امواج در بلور طراحی شده با Si

در شکل (۴-۲۵) هر سه نمودار فوق با هم جهت مقایسه دیده می‌شوند.



شکل (۴-۲۵): هر سه نمودار بازتاب، عبور و جذب امواج در بلور طراحی شده با Si

در شکل (۴-۲۶) هر دو نمودار پراکندگی با هم نشان داده شده است.



شکل (۴-۲۶): هر دو نمودار پراکندگی در بلور طراحی شده با Si

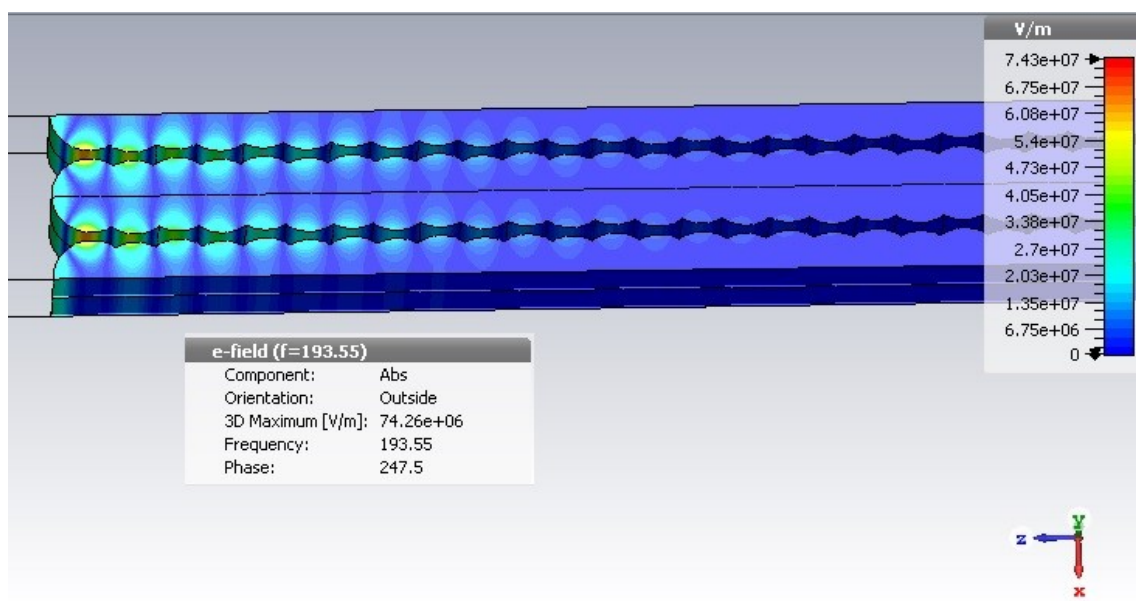
بلور فوتونی طراحی شده با Si بسامدهای بالاتر و پایین‌تر از شکاف باند اصلی را مانند بلور

GaAs از خود عبور می‌دهد. در شکل‌های (۴-۲۷) و (۴-۲۸) به ترتیب توزیع میدان‌ها در مد TE

و TM در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر (بسامد ۱۹۳/۵۵ تراهرتز) یعنی در شکاف باند اصلی آورده شده-

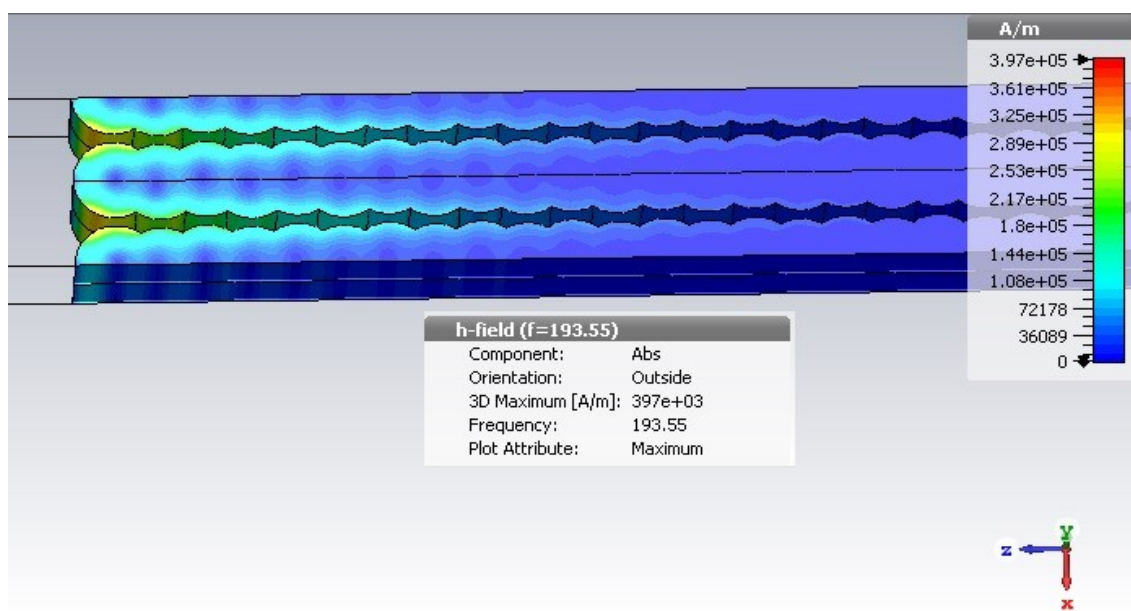
است. در این بسامد ملاحظه می‌شود که موج تابیده شده در هر دو مد نمی‌تواند از بلور عبور کند و

بازتاب کامل انجام می‌شود.



شکل (۴ - ۲۷): توزیع میدان الکتریکی در بسامد ۱۹۳/۵۵ THz در بلور طراحی شده با Si

در شکل فوق دیده می‌شود که موج به هر میزان که در بلور وارد می‌شود مقدار زیادی از آن بازتاب می‌کند به طوری که پس از نفوذ به مقدار ۱۵ برابر ثابت شبکه بلور، کاملاً بازتاب کرده‌است. و این به معنای این است که از نظر میدان الکتریکی می‌توانیم طول ساختار را مثلاً تا ۲۰ برابر ثابت



شکل (۴ - ۲۸): توزیع میدان مغناطیسی در بسامد ۱۹۳/۵۵ THz در بلور طراحی شده با Si

در این شکل نیز دیده می‌شود که موج به هر میزان که در بلور وارد می‌شود مقدار زیادی از آن بازتاب می‌کند به طوری که پس از نفوذ به مقدار ۱۳ برابر ثابت شبکه بلور، کاملاً بازتاب کرده‌است. و این به معنای این است که از نظر میدان مغناطیسی نیز می‌توانیم طول ساختار را مثلاً تا ۲۰ برابر ثابت شبکه بلور در نظر بگیریم.

با مقایسه شکل‌های (۴ - ۲۷) و (۴ - ۲۸) این نکته را در می‌یابیم که در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر در مد TM بازتاب کامل موج اندکی زودتر از مد TE اتفاق می‌افتد. یعنی در مد TM موج کمتر در بلور نفوذ کرده‌است.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱ مقدمه

در این فصل به مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام شده در این پایان‌نامه برای بلورهای طراحی شده با ترکیب GaAs/Air و Si/Air با یکدیگر و همچنین با اطلاعات برگرفته از مراجع دیگر پرداخته و با توجه به استنتاج‌های حاصل از این مقایسه‌ها نتیجه‌گیری خواهیم نمود. در پایان نیز با توجه به آنچه در این پایان‌نامه صورت گرفته‌است برای ادامه راه در امتداد این پژوهش پیشنهادهایی ارائه می‌گردد.

۵-۲ مقایسه نتایج

در جدول (۵-۱) مشخصات فیزیکی بلورهای طراحی شده و در جدول (۵-۲) مقایسه نتایج شبیه‌سازی برای هر دو ساختار GaAs/Air و Si/Air در محدوده شکاف باند اصلی آمده است.

جدول (۵-۱) مشخصات فیزیکی بلورهای طراحی شده

طول موج طراحی (nm)	طول ساختار (l)	ثابت شبکه (a) (nm)	شعاع حفره‌ها (r) (nm)	شکل هندسی حفره‌ها	نوع شبکه	ضریب شکست	جنس بلور
۱۵۵۰	$17a$	۷۷۵	۳۴۸/۷۵	دایره	مثلثی	۳/۴۰	GaAs/Air
۱۵۵۰	$17a$	۷۷۵	۳۴۸/۷۵	دایره	مثلثی	۳/۴۵	Si/Air

جدول (۵-۲) مقایسه نتایج شبیه‌سازی برای هر دو ساختار در محدوده شکاف باند اصلی

C	B	A	شکاف باند اصلی (nm)	جنس بلور
٪۰/۵۲	٪۰	٪۱۰۰	۱۵۰۶ - ۱۷۲۵	GaAs/Air
٪۰/۰۳	٪۰	٪۱۰۰	۱۵۲۶ - ۱۷۳۵	Si/Air

A: بیشترین مقدار بازتاب در شکاف باند اصلی به درصد

B: بیشترین مقدار عبور در شکاف باند اصلی به درصد

C: بیشترین مقدار جذب در شکاف باند اصلی به درصد

در جدول (۳ - ۵) همان موارد جدول (۲ - ۵) را به ازای طول موج مورد نظر در طراحی

یعنی ۱۵۵۰ نانومتر تکرار می‌کنیم.

جدول (۳ - ۵) مقایسه نتایج شبیه‌سازی برای هر دو ساختار در ۱۵۵۰ نانومتر

E	D	C	B	A	طول موج طراحی (nm)	جنس بلور
$5a$	$6a$	٪/۰۰۱۱	٪۰	٪۹۹/۹۹۸۸	۱۵۵۰	GaAs/Air
$13a$	$15a$	٪/۰۰۱۱۴	٪/۰۰۰۳۳	٪۹۹/۹۹۸۱	۱۵۵۰	Si/Air

A: بیشترین مقدار بازتاب در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر به درصد

B: بیشترین مقدار عبور در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر به درصد

C: بیشترین مقدار جذب در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر به درصد

D: میزان نفوذ موج در بلور، در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر در مد TE

E: میزان نفوذ موج در بلور، در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر در مد TM

۵ - ۳ نتیجه گیری

با عنایت به جدول (۵ - ۲) مشاهده می‌شود شکاف باند اصلی در بلور فوتونی GaAs دارای پهنای ۲۱۹ نانومتر و در بلور فوتونی Si پهنای ۲۰۹ نانومتر دارد که به میزان ۱۰ نانومتر کمتر از بلور GaAs است. بیشترین بازتاب موج در هر دو بلور ۱۰۰٪ و بیشترین مقدار عبور موج آن‌ها در شکاف باند اصلی صفر است. هم‌چنین بیشترین میزان جذب موج نیز در بلور GaAs دارای مقدار ۵۲٪ و در بلور Si به اندازه ۰/۰۳٪ بوده که ۴۹٪ کمتر است و عمل کرد بهتری از خود نشان داده است.

در جدول (۵ - ۳) مشاهده می‌شود که بلور GaAs از هر نظر، پاسخ‌دهی به مراتب بهتری در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر از خود نشان داده است؛ خصوصاً در موارد D و E که بسیار مهم هستند؛ زیرا کم بودن مقدار نفوذ امواج نوری در بلور فوتونی، این امکان را فراهم می‌آورد که از نظر ابعاد ساخت و در راستای کوچک‌سازی، در فرایند تولید ادوات و مدارات مجتمع نوری کمک بسزایی صورت گیرد.

با توجه به مقدار D و E می‌توانیم بلور فوتونی طراحی شده با GaAs را بهینه‌سازی نماییم؛ یعنی طول بلور فوتونی را از $17a$ به $10a$ (a ثابت شبکه بوده و ۷۷۵ نانومتر است) کاهش دهیم؛ از ۱۳/۱۷۵ میکرومتر به ۷/۷۵ میکرومتر. به میزان ۴۱/۱۷٪ از طول بلور کاسته شده و بهینه می‌شود. نتیجه بسیار مهم دیگری که از هر دو جدول (۵ - ۲) و (۵ - ۳) قابل درک است، این که بازتاب ۱۰۰٪ نور برای هر دو مد TE و TM صورت می‌پذیرد و اختلاف D و E (نفوذ نور در بلور) ناچیز است.

بنابراین با قوت می‌توانیم این ادعا را داشته باشیم که هر دو بلوری که طراحی نموده‌ایم، GaAs/Air و Si/Air، آینه کامل هستند.

در جدول (۵ - ۴) نتایج گرفته شده در این پایان‌نامه از نظر میزان بازتاب در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر با برخی مراجع مقایسه شده است.

جدول (۵ - ۴) مقایسه نتایج این پایان نامه با مراجع در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر

بازتاب	شکل هندسی حفره‌ها	نوع شبکه	جنس بلور	مرجع
٪۹۹/۹۹۸۸	دایره	مثلثی	GaAs/Air	این پایان نامه
٪۹۹/۹۹۸۱	دایره	مثلثی	Si/Air	این پایان نامه
٪۹۸/۸۹	دایره	مثلثی	Si/Air	مرجع خارجی [۶]
٪۹۶	شش ضلعی	مثلثی	Air/Si	مرجع داخلی [۲۸]

۵ - ۴ پیشنهادها

پیشنهاد می‌شود با ایجاد نقص‌های مناسب در بلور فوتونی طراحی شده در این پایان نامه، به ساختاری دستیابیم که دارای شکاف باند بسیار باریک در اطراف طول موج ۱۵۵۰ نانومتر بوده و دارای بیشترین بازتاب و کمترین طول نفوذ نور در هر دو مد TE و TM باشد. بدین ترتیب چنین بلوری می‌تواند در ساختار یک لیزر وکسل تک‌رنگ با بسامد ۱۹۳/۵۵ تراهرتز مورد استفاده قرار گیرد.