بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه تبریز

دانشکده فیزیک

گروه حالت جامد و الکترونیک

پایان‌نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته فیزیک حالت جامد

عنوان

بررسی رفتار امواج الکترومغناطیسی در بلور های فوتونی مدرج دو بعدی

استاد راهنما

دکتر جمال بروستانی

استاد مشاور

دکتر علی سلطانی والا

پژوهشگر

فریال بخشی گرمی

بهمن ۹۲

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

تقدیر و تشکر

بر خود لازم می‌دانم از استاد ارجمندم، آقای دکتر جمال بروستانی به خاطر راهنمایی‌ها و نقطه نظرات ارزشمندشان در طی انجام این پروژه، نهایت تشکر را بنمایم.

از استادمشاور محترم، جناب آقای دکتر علی سلطانی والاکمال تشکر را دارم.

از زحمات آقای دکتر منوچهر کلافی که داوری این پایان نامه را بر عهده داشتند، تشکر و قدردانی می نمایم.

از تمامی دوستان و همکلاسی‌هایم که خاطرات خوشی را در طی این دو سال برای من رقم زدند، ممنون و متشکرم.

و در آخر از بزرگترین و زیباترین نعمات زندگی‌ام، مشوقان و حامیانم در تمام مراحل تحصیل و زندگی‌ام، پدر و مادر عزیزم، به خاطر مهرشان، پشتیبانی‌شان، نگرانی‌شان و لبخندشان سپاسگذاری می‌نمایم. امید دارم با تلاش‌ها و موفقیت‌های روز افزون بتوانم گوشه ای ناچیز از زحمات بی‌نهایتشان را جبران کرده باشم و لبخندی بر لبانشان بنشانم.

نام خانوادگی دانشجو : بخشی گرمی **نام** :فریال

عنوان پایان نامه: بررسی رفتار امواج الکترومغناطیسی در بلور های فوتونی مدرج دو بعدی

استاد راهنما : دکتر جمال بروستانی

استاد مشاور : دکتر علی سلطانی والا

مقطع تحصیلی : کارشناسی ارشد **رشته :** فیزیک **گرایش :** حالت جامد و الکترونیک

دانشگاه : تبریز **دانشکده :** فیزیک **تعداد صفحه** : ۱۲۷

تاریخ فارغ التحصیلی: بهمن ۱۳۹۲

کلید واژه : بلور فوتونی مدرج، ثابت شبکه، ضریب شکست، گاف باند فوتونی، موجبر، نقص

چکیده

قالب سازی برای شارش مناسب نور در مقیاس طول موج آن، چالش بزرگ بحث بلورهای فوتونی می باشد. موجبرهای بلور های فوتونی معمولا با ایجاد نقص های خطی بدست می آید، مشروط بر این که بلور فوتونی در فرکانس مورد نظر دارای گاف باند فوتونی باشد. اخیرا، با معرفی بلورهای فوتونی مدرج فرآیند موجبری بدون نیاز به ایجاد نقص داخل ساختار انجام شده است. این بلورها به وسیله ی ایجاد تغییرات تدریجی در پارامترهای بلور فوتونی مانند ثابت شبکه، شعاع میله های دی الکتریک و یا ثابت دی الکتریک میله ها به وجود می آیند. تغییر تدریجی این پارامترها خواص پاشندگی بلور فوتونی را به طور تدریجی تغییر می دهد که در نتیجه منجر به تغییر مسیر نور و انتشار آن می شود. از بلورهای فوتونی مدرج برای خمش نور، کانونی کردن نور، ساخت ابر موازی ساز و عدسی های با ضریب شکست منفی و ... استفاده می شود. در این پایاننامه ابتدا ویژگی های بلور فوتونی مدرج و سپس رفتار امواج الکترومغناطیسی به خصوص اثر کانونی شدن نور در این بلورها را مورد مطالعه قرار داده ایم. در بررسی بلور فوتونی مدرج دو عامل تغییر تدریجی، ثابت شبکه و شعاع میله های دی الکتریک در نظر گرفته شده است. تمامی ساختار نوار های مربوط به بلور فوتونی دو بعدی با استفاده از روش بسط موج تخت و منحنی های هم فرکانسی با استفاده از روش بسط موج تخت اصلاح شده به دست آمده است. محاسبه ی میدان های الکتریکی و مغناطیسی و توزیع فضایی آنها با استفاده از روش تفاضلات محدود در حوزه ی زمان (FDTD) به دست آمده است. نتایج نشان می دهد که بلورهای فوتونی مدرج توانایی کانونی کردن امواجی با پهنای عرضی بزرگ را در یک ناحیه ی کوچک دارا هستند. هم چنین مشاهده

شد که فقط چند ستون از میله های دی الکتریک برای کانونی کردن باریکه ای با پهنای عرضی بزرگ کافی است. در بررسی رفتار کانونی شدن نور مشاهده شد که، قدرت کانونی کردن بلور های فوتونی مدرج به پارامتر های ساختاری آن مثل ثابت دی الکتریک میله ها، گام افزایشی ثابت شبکه یا شعاع میله ها بستگی دارد. به طوری که، با افزایش این پارامترها قدرت کانونی کردن بلور فوتونی مدرج افزایش پیدا می کند. یک نتیجه هم نشان می دهد که با انتخاب مناسب پارامتر تغییر تدریجی، بلور فوتونی مدرج توانایی خمش نور را نیز دارد.

فـهـرست مـطـالـب

عنوان صفحه

مقدمه

فصل اول : بررسی منابع

مقدمه..... ۱

۱-۱ بلور فوتونی..... ٤

۱-۲ پارامتر ها و ویژگی های بلور های فوتونی..... ۷

۱-۲-۱ابعاد..... ۷

۱-۲-۲ کنتراست ضریب شکست و مقیاس پذیری..... ۸

۱-۲-۳ ضریب شکست موثر و کسر پرشدگی..... ۹

۱-۳ مفاهیم پایه ای در مورد سیستم های متناوب..... ۹

۱-۳-۱ یاخته واحد بسیط..... ۱۰

۱-۳-۲ شبکه ی وارون..... ۱۱

۱-٤ مسئله خط نور..... ۱۳

۱-۵ سرعت انتشار نور..... ۱٦

۱- ٦ ساختار نوار و منحنی های هم فرکانس بلور فوتونی دو بعدی..... ۱۷

۱-۷ نقص در بلورهای فوتونی..... ۲۱

۱-۸ کاربرد بلور های فوتونی..... ۲۲

۱-۸-۱ فیبرها..... ۲۳

۱-۸-۲ موجبرها..... ۲٤
۱-۸-۳ محدوده ی پاشندگی..... ۲٦
۱-۹ معرفی چند اثر پاشندگی در بلور فوتونی دو بعدی..... ۲۸
۱-۹-۱ اثر خود موازی شدن..... ۲۸
۱-۹-۲ اثر کانونی شدن..... ۲۹
۱-۱۰ بلورهای فوتونی مدرج ۳۱
۱-۱۰-۱ بلور فوتونی مدرج با ثابت شبکه ی دارای تغییرات تدریجی..... ۳۱
۱-۱۰-۲ بلور فوتونی مدرج متشکل از میله هایی با شعاع یا ثابت دی الکتریک دارای تغییرات تدریجی..... ۳۵

فصل دوم: مبانی و روش‌ها

مقدمه..... ۳۹
۲-۱ خواص نوری بلورهای فوتونی ٤۰
۲-۲ قضیه بلوخ و ثابت دی الکتریک متناوب ٤۱
۲-۳ روش های عددی در تحلیل بلورهای فوتونی..... ٤٤
۲-۳-۱ روش های عددی در حوزه ی زمان..... ٤٤
۲-۳-۲ روش های عددی در حوزه ی بسامد..... ٤٥
۲-٤ روش تفاضلات محدود در حوزه ی زمان FDTD..... ٤٦
۲-٥ الگوریتم Yee..... ٥٥
۲-٦ حل معادله موج یک بعدی با الگوریتم Yee..... ٥۷

۲-۷ حل معادلات تاو ماکسول با الگوریتم Yee..... ٦١
۲-۷-۱ حل معادلات تاو ماکسول با الگوریتم Yee در حالت یک بعدی..... ٦١
۲-۷-۲ حل معادلات تاو ماکسول با الگوریتم Yee در حالت دو بعدی..... ٦٣
۲-۸ شرط پایداری در الگوریتمYee ٦٥
۲-۹ بررسی شرایط مرزی..... ٦٦
۲-۹-۱ بررسی شرط مرزیPML ٦٧
۲-۱۰ روش بسط موج تختPWE ٧٧
۲-۱۱محاسبه ضرایب فوریه عکس تابع دی‌اکتریک مربوط به میله‌های با سطح مقطع دایره..... ٨٤
۲-۱۲ روش بسط موج تخت اصلاح شده RPWE..... ٨٨

فصل سوم: بحث و نتیجه گیری

مقدمه..... ٩٢
۳-۱ بلور فوتونی مدرج دوبعدی..... ٩٤
۳-۱-۱ بررسی بلورفوتونی دوبعدی با ثابت شبکه ی مدرج..... ٩٤
۳-۱-۲ بررسی بلورفوتونی دوبعدی با شعاع میله‌های دی‌الکتریک مدرج ١٠٠
۳-۲ تغییر ثابت دی الکتریک میله ها در بلور فوتونی مدرج دو بعدی ١٠٧
۳-۲-۱ تغییر ثابت دی الکتریک میله ها در بلور فوتونی دو بعدی با ثابت شبکه ی مدرج..... ١٠٧
۳-۲-۲ تغییر ثابت دی الکتریک میله ها در بلور فوتونی دو بعدی با شعاع میله‌های دی‌الکتریک مدرج..... ١١٠
۳-۳ شبیه سازی خمش نور در بلور فوتونی مدرج..... ١١٤
۳-٤ شبیه سازی عدسی بلور فوتونی مدرج ١١٨

نتیجه گیری کلی ۱۲۲

پیشنهادات ۱۲٤

منابع ۱۲۵

فـهـرست اشکـال

فـصل اول

شکل ۱- ۱ ..... ۳

شکل ۱- ۲ ..... ٤

شکل ۱- ۳ ..... ۵

شکل ۱- ٤ ..... ۷

شکل ۱- ۵ ..... ۱۲

شکل ۱- ٦ ..... ۱٤

شکل ۱- ۷ ..... ۱۵

شکل ۱- ۸ ..... ۱۸

شکل ۱- ۹ ..... ۱۹

شکل ۱- ۱۰ ..... ۲۰

شکل ۱- ۱۱ ..... ۲۲

شکل ۱- ۱۲ ..... ۲٤

شکل ۱- ۱۳ ..... ۲۵

شکل ۱- ۱٤ ..... ۲۵

شکل ۱- ۱۵ ..... ۲۷

شکل ۱- ۱٦ ..... ۲۸

شکل ۱- ۱۷..... ۲۹
شکل ۱- ۱۸..... ۳۰
شکل ۱- ۱۹..... ۳۲
شکل ۱- ۲۰..... ۳۳
شکل ۱- ۲۱..... ۳٤
شکل ۱- ۲۲..... ۳۵
شکل ۱- ۲۳..... ۳٦
شکل ۱- ۲٤..... ۳۷

فصل دوم

شکل ۲- ۱..... ٤۱
شکل ۲- ۲..... ٤٤
شکل ۲- ۳..... ٤٤
شکل ۲- ٤..... ٤۵
شکل ۲- ۵..... ۵۵
شکل ۲- ٦..... ۵۷
شکل ۲- ۷..... ٦۲
شکل ۲- ۸..... ٦۷
شکل ۲- ۹..... ٦۸
شکل ۲- ۱۰..... ۷٤
شکل ۲- ۱۱ ..... ۷۵
شکل ۲- ۱۲..... ۸۳
شکل ۲- ۱۳..... ۸۵

فصل سوم

شکل ۳- ۱ ..... ۹٤

شکل ۳- ۲ ..... ۹٥

شکل ۳- ۳ ..... ۹٦

شکل ۳- ٤ ..... ۹۷

شکل ۳- ٥ ..... ۹۷

شکل ۳- ٦ ..... ۹۸

شکل ۳- ۷ ..... ۹۹

شکل ۳- ۸ ..... ۹۹

شکل ۳- ۹ ..... ۱۰۰

شکل ۳- ۱۰ ..... ۱۰۱

شکل ۳- ۱۱ ..... ۱۰۲

شکل ۳- ۱۲ ..... ۱۰۳

شکل ۳- ۱۳ ..... ۱۰٤

شکل ۳- ۱٤ ..... ۱۰٤

شکل ۳- ۱٥ ..... ۱۰٥

شکل ۳- ۱٦ ..... ۱۰٦

شکل ۳- ۱۷ ..... ۱۰۷

شکل ۳- ۱۸ ..... ۱۰۸

شکل ۳- ۱۹ ..... ۱۰۸

شکل ۳- ۲۰ ..... ۱۰۹

شکل ۳- ۲۱ ..... ۱۱۰

شکل ۳- ۲۲ ..... ۱۱۰

شكل ٣- ٢٣..... ١١١
شكل ٣- ٢٤..... ١١٢
شكل ٣- ٢٥..... ١١٣
شكل ٣- ٢٦..... ١١٣
شكل ٣- ٢٧..... ١١٤
شكل ٣- ٢٨..... ١١٥
شكل ٣- ٢٩..... ١١٦
شكل ٣- ٣٠..... ١١٦
شكل ٣- ٣١..... ١١٧
شكل ٣- ٣٢..... ١١٧
شكل ٣- ٣٣..... ١١٨
شكل ٣- ٣٤..... ١١٩
شكل ٣- ٣٥..... ١٢٠
شكل ٣- ٣٦..... ١٢٠
شكل ٣- ٣٧..... ١٢١

مقدمه :

بلورهای فوتونی ساختارهای مادهای هستند که ضریب شکست آنها به صورت دورهای با یک مقیاس طولی در حدود طول موج نور، تغییر می کند. کلمه بلور از آنجا بکار می رود که این مواد از تکرار یک سری واحدهای ساختاری مصنوعی مشابه تشکیل می شوند و کلمه فوتونی به این دلیل اضافه شده است که این بلورها برای تاثیر گذاشتن بر خواص انتشار فوتونها ساخته شدهاند. مهمترین خاصیت بلورهای فوتونی انتشار نور با گستره فرکانسی معین می باشد که به آن ساختار نوار بلورهای فوتونی گفته می شود و در ساختار آنها بازهای از فرکانس وجود دارد که بلورهای نوری قادر به انتشار آن نمی باشند که این بازه از فرکانس را گاف فوتونی می نامند.

در فصل اول این پایاننامه، مفاهیم اساسی مربوط به بلورهای فوتونی مدرج بیان شده است. در فصل دوم، روشهای محاسبه ی میدان های الکتریکی و مغناطیسی و توزیع فضایی آنها با استفاده از روش تفاضلات محدود در حوزه ی زمان (FDTD) و محاسبه ی ساختار نوار با روش بسط موج تخت و محاسبه ی منحنی های هم فرکانس از طریق روش بسط موج اصلاح شده مورد مطالعه قرار گرفته است. تمامی برنامهها به زبان برنامهنویسی MATLAB نوشته شده است. در این فصل همچنین روابط مربوط به محاسبهی تابع دیالکتریک بلور فوتونی متشکل از میله هایی با سطح مقطع دایروی آورده شده است.

در فصل سوم با در نظر گرفتن دو پارامتر تغییر تدریجی، ثابت شبکه و شعاع میله های دی الکتریک برای بلور فوتونی مدرج رفتار امواج الکترومغناطیسی بخصوص کانونی شدن نور را با استفاده از منحنی های هم فرکانس مورد بررسی قرار دادیم و توزیع فضایی میدان های الکتریکی و مغناطیسی را برای این

بلورها به دست آوردیم. سپس با تغییر ثابت دی الکتریک میله ها یک حالت بهینه ایجاد کردیم. در مرحله بعد اثر خمش نور و عدسی بلور فوتونی مدرج را شبیه سازی کردیم.

فصل اول:

بررسی منابع

مقدمه

برای معرفی بلورهای فوتونی بهتر است با طرح این سوال کـه بلورهـای فوتـونی چیسـت و چـه کاربردی در صنعت دارد، شروع کنیم. فناوری دنیای امروز بیشتر با الکترون‌ها و نیمه‌هادی‌ها ارتباط پیدا می‌کند. بیشتر دستگاه‌ها و ابزارهایی که ما هر روز از آنها استفاده می‌کنیم مانند کامپیوتر، موبایل، رادیـو و غیره از نیمه‌هادی و فلزات ساخته شده‌اند که حامل‌های بار و اطلاعات در آنها، الکترون و حفره می-باشند. الکترون‌ها برای انتقال اطلاعات دارای حداکثر سرعتی در حدود m/s $۱۰^۵$در نیمه هادی‌هـا و یـا فلزات هستند که این در مقایسه با سرعت نور در محیط‌های گوناگون که درحدودm/s $۱۰^۸$ است بسیار کمتر می‌باشد. اگر برای انتقال اطلاعات از نور به جای الکترون استفاده کنیم، می توان دستگاه‌هایی تـا هزار برابر سریعتر ساخت. درقطعات الکترونیکی امروزی برای انتقال و کنتـرل الکتـرون‌هـا کـه همـان حامل‌های اطلاعات هستند از بلورهای منظم نیمه‌هادی و فلزات استفاده می‌شود. بلورهای فوتونی مانند قطعات الکترونیکی معمولی، بلورهایی منظم از مواد شفاف هستند که با استفاده از آنها می‌تـوان نـور را به کنترل در آورد. بلورهای فوتونی از نظر فیزیک، ساختار و نحوه‌ی تاثیر آنها بر حامل‌هـای اطلاعـات کاملا مشابه بلورهای الکترونی معمولی می‌باشند با این تفاوت که حامل‌های اطلاعات دیگر الکترون‌هـا نیستند بلکه نور است و از طرفی دیگر عامل تکرار شونده در بلور بجای پتانسیل اتم‌ها یا مولکـول‌هـا، ثابت دی‌الکتریک مواد تشکیل دهنده‌ی بلور فوتونی است. بلورهـای فوتـونی در واقـع ادغـام فیزیـک حالت جامد و الکترومغناطیسی است. ساختارهای بلوری این گروه هم خـانواده فیزیـک حالـت جامـد هستند و در این بلورها الکترون‌ها توسط امواج الکترومغناطیس جایگزین مـی‌شـوند. در بلـور فوتـونی ضریب دی‌الکتریک متناوب نقش پتانسیل متناوب در نیمه‌هادی‌ها را بازی می‌کند. چنانچـه ثابـت‌هـای

دی‌الکتریک این مواد در بلور به اندازه کافی متفاوت و جذب نور در ماده حداقل مقدار را داشته باشد، بسیاری از پدیده‌هایی که پتانسیل اتمی برای الکترون‌ها به علت پراکندگی از سطح مشترک بوجود می‌آورد، بطور مشابه ثابت دی‌الکتریک برای مدهای فوتونی ایجاد خواهد کرد. در سال ۱۹۸۷ دو کار، توسط یابلانوویچ[۱] [۱] (در مرکز تحقیقات مخابراتی بل- آمریکا) و جان[۲] [۲] (در دانشگاه پرینستون آمریکا) چاپ شد. یابلونوویچ بیان کرد که این ساختارهای دی‌الکتریک متناوب سه بعدی ($3D$) می‌توانند دارای یک ناحیه ممنوعه فرکانسی (گاف نوار فوتونی) باشند. او همچنین در مقاله خود بیان کرد که توسط چنین ساختارهای می توان از نشر خود بخودی ناخواسته موجود در نیمه هادی‌ها جلوگیری کرد. از آنجائیکه هیچ حالت فرکانسی در داخل گاف نوار فوتونی وجود ندارد با افتادن فرکانس‌های نشر خودبخودی در داخل گاف نوار فوتونی، می توان این نشر را بطور موثری کنترل کرد. در سال ۱۹۸۹ نام بلور فوتونی برای این نوع ساختارهای مصنوعی، که در آزمایشگاه‌ها توسط محققین ساخته می شدند، در نظر گرفته شد. یابلونوویچ نشان داد که می توان بوسیله ایجاد نقص[۳] درکریستال-های فوتونی مدها را جایگزیده کرد. اما در سال ۲۰۰۵، امانوئل سنتنو[۴] [۳] با معرفی بلور فوتونی مدرج که در آن ثابت شبکه دارای تغییرات تدریجی بود توانستند مسیر نور را داخل بلور فوتونی بدون استفاده از نقص تغییر دهند. با مشاهدات، تحقیقات در زمینهٔ بلورهای فوتونی مدرج به منظور کنترل نور گسترش یافت.

البته لازم به ذکر است وجود بلورهای فوتونی تنها به مواد ساخت دست بشر محدود نمی‌شود.

۱-Yablonovitch
۲-John
۳- Defect
۴- E. Centeno

بررسی‌های انجام شده در طبیعت نشان می‌دهد که بلورهای فوتونی به صورت طبیعی در اطراف ما وجود دارند و به طور خاص می توان از نوعی سنگ به نام اوپال[۵] نام برد که در واقع یک بلور فوتونی است. مورد دیگری از بلورهای فوتونی طبیعی همان‌طور که در شکل۱-۱ نشان داده شده است در بال بعضی از پروانه‌ها و پر طاووس دیده شده است.

شکل۱- ۱: نمونه‌هایی از بلورهای فوتونی که در طبیعت یافت شده‌اند. الف) پر طاووس، ب) پروانه‌ی مورفو ج) سنگ اوپال[٤]

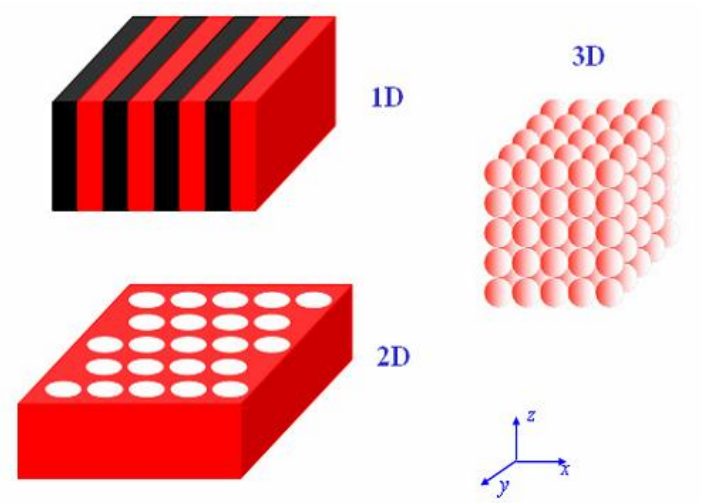
برای بررسی و آنالیز کردن بلورهای فوتونی، پارامترها و ویژگی‌های زیادی مانند تابع انتقال[٦]، تابع انعکاس[۷]، پروفایل‌های میدان و ساختار نوار فرکانسی بلور وجود دارند که برای مقاصد گوناگون می توان محاسبه نموده و مورد تجزیه و تحلیل قرار داد .

---

۵ - Opal
۶ - transmision function
۷ -reflection function

۱-۱ بلور فوتونی

مشخصه ویژه‌ی بلورهای فوتونی پریودیک بودن ثابت دی‌الکتریک در آن‌ها می‌باشد که این پدیده می‌تواند در یک، دو یا سه بعد باشد که تعیین کننده بعد کریستال خواهد بود. شکل (۱-۲) حالت‌های یک بعد، دو بعد و سه بعدی بلور فوتونی را نشان می‌دهد.



شکل ۱- ۲: نمایش طرح‌وار از بلورهای فوتونی یک، دو و سه بعدی، رنگ‌های مختلف نشان دهنده مواد با ثابت دی-الکتریک متفاوت است [۵].

مطالعه‌ی بلورهای فوتونی را با ساده‌ترین مورد ممکن، یعنی مورد تک بعدی آغاز می‌کنیم. در این ساختار ساده می‌توانیم خصوصیات کلی مهم بلورهای فوتونی به خصوص گافهای نوارهای فوتونی و در صورت ایجاد نقص در این بلور ها مدهای جایگذیده در نقص‌ها را ببینیم. این نوع از بلورهای فوتونی می‌توانند برای نوری با فرکانسی در محدوده‌ی مشخص، مانند آینه عمل کنند (آینه‌ی براگ) و می‌توانند مدهای الکترومغناطیسی را اطراف نقص های موجود جایگزیده کنند. راه دیگر برای بررسی