دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان‌نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته فیزیک گرایش نظری

عنوان:

مطالعه و شبیه سازی سوئیچ های کاملا نوری کریستال فوتونی

اساتید راهنما:

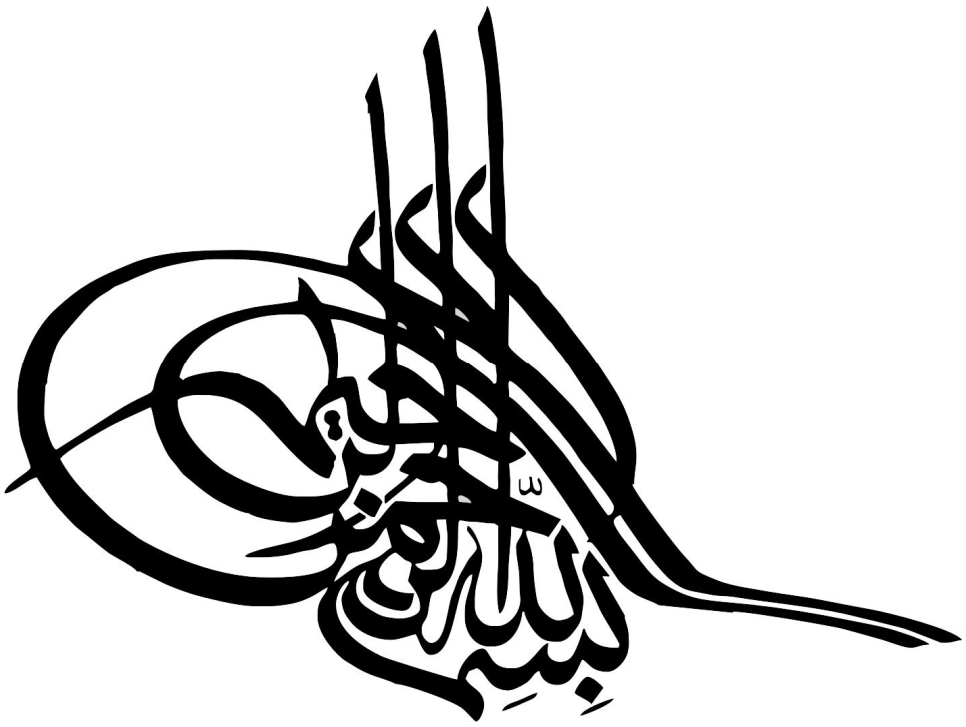
دکتر هادی گودرزی - دکتر رضا خردمند

نگارش:

لیدا فلاحیان

مهر ماه ۱۳۹۱

حق چاپ وتکثیر مطالب این پایان نامه، برای دانشگاه ارومیه محفوظ است.


بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم:

به پدر بزرگوار و مادر مهربانم

آن دو فرشته ای که از خواسته هایشان گذشتند، سختی ها را به جان خریدند و خود را سپر بلای مشکلات و ناملایمات کردند تا من به جایگاهی که اکنون در آن ایستاده ام برسم...

هستی ام را مدیون این بزرگواران هستم... بوسه ای خالصانه بر دستانشان می نهم تا شاید بخشی از محبت های بی دریغشان جبران گردد...

به همسر عزیزم

پناه خستگیم و امید بودنم

او که سایه مهربانیش سایه سار زندگیم می باشد، او که اسوه صبر و تحمل بوده و دلسوزانه مشکلات مسیر را برایم تسهیل نمود.

تقدیر و تشکر:

حمد و سپاس خدایی را سزد که به انسان توانایی و قدرت زیستن در پناه خرد خویش عطا فرمود و در اقیانوس کبیر عالم وجود، برای چنگ آوردن جواهر علوم و کمالات، وی را شناور نمود و همین آدمی با استعانت از نیروی تفکر و تعقل توانست حیات خود را با نشاط نماید.

سپاس خدای یگانه را که به من این فرصت را داد تا به این مرحله از علم رسیده و از هیچ محبتی دریغ نکرد و در تمام مراحل زندگیم مرا قوت قلب بود.

بر خود وظیفه می دانم از اساتید راهنمایم جناب آقای دکتر هادی گودرزی و جناب آقای دکتر رضا خردمند به خاطر آموختن آنچه که ورای هر کتاب و هر کلاسی می باشد، اساتید داورم جناب آقای دکتر آرش ثباتیان و جناب آقای دکتر رحیم نادرعلی به خاطر مساعدت هایشان صمیمانه تشکر و قدردانی کنم.

از تمامی دوستانم در دانشگاه ارومیه و پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره شناسی دانشگاه تبریز که در طول این دو سال همراه من بودند سپاسگزارم و آرزوی موفقیت در زندگی برایشان دارم.

لیدا فلاحیان

مهر ماه ۱۳۹۱

ارومیه-ایران

نام خانوادگی: فلاحیان نام: لیدا

عنوان پایان نامه: مطالعه و شبیه سازی سوئیچ های کاملا نوری کریستال فوتونی

اساتید راهنما: دکتر هادی گودرزی، دکتر رضا خردمند

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد رشته: فیزیک گرایش: نظری

دانشگاه: ارومیه دانشکده: علوم تاریخ دفاع: ۹۱/۷/٤

تعداد صفحه: ۱۰۹

واژه های کلیدی:

بلور های فوتونی، باند گاف فوتونی، تفاضل محدود در حوزه ی زمان، بسط امواج تخت، اثر غیرخطیت کر، سوئیچ زنی تمام نوری

چکیده:

بلورهای فوتونی، آرایه های متناوبی از مواد دی الکتریک با ضرایب شکست متفاوت هستند. یکی از مهم ترین ویژگی های بلور فوتونی، وجود نواحی فرکانسی است که هیچ مد نوری اجازه عبور و انتشار در آن ناحیه را ندارد. این خاصیت بلورهای فوتونی موجب می شود که از آن ها برای کنترل و هدایت نور در مدارهای مجتمع نوری استفاده گردد.

در این پایان نامه، بلورهای فوتونی دوبعدی که دارای شبکه مربعی و مثلثی متشکل از میله های دایره ای شکل، از جنس گالیم-آرسنایید (GaAs) در زمینه هوا هستند، مورد مطالعه قرار گرفته اند. همچنین میدان های الکتریکی و مغناطیسی از طریق روش تفاضل محدود در حوزه زمان محاسبه شده اند و نمودارهای پاشندگی به روش بسط امواج تخت به دست آمده اند. در شبیه سازی های انجام شده، سوئیچ زنی تمام نوری بر روی ساختارهای بلور فوتونی با دو موجبر عمود بر هم و جداکننده نوری بررسی شده اند که عملکرد این ابزارها بر اساس ایجاد نقص در بلور فوتونی، تحت اثر غیرخطیت کِر می باشد. بعلاوه، تأثیر عیوب نقطه ای در اطراف کاواک در ساختار دو موجبر عمود بر هم بررسی و نشان داده شد که با افزایش تعداد میله های اطراف کاواک، نسبت توان خروجی حالت روشن به حالت خاموش افزایش می یابد. همچنین، جداکننده نوری قابل تنظیم طراحی شد که هر شاخه دارای فرکانس تشدید مختص خود می باشد بنابراین هر یک از این شاخه ها فرکانس تشدید مربوط به خود را عبور خواهد داد. در حالیکه در طراحی های قبلی فرکانس تشدید هر شاخه یکسان بوده و توان خروجی به طور مساوی بین دو شاخه تقسیم می شد.

فهرست

عنوان صفحه

فهرست مطالب II

فهرست اشکال V

فهرست جداول X

فهرست مطالب

عنوان صفحه

مقدمه ۱
۱ فصل اول ۳
۱-۱ تاریخچه بلورهای فوتونی ٤
۱-۲ شبکه های بلوری ٦
۱-۲-۱ سلول واحد بسیط ۸
۱-۲-۲ سلول بسیط ویگنر- سایتز ۹
۱-۲-۳ شبکه معکوس ۹
۱-۲-٤ شبکه مربعی و شبکه مثلثی ۱۱
۱-۲-۵ منطقه اول بریلوئن ۱۲
۱-۳ ابعاد بلور فوتونی ۱٤
۱-۳-۱ بلورهای فوتونی یک بعدی ۱۵
۱-۳-۲ بلورهای فوتونی دوبعدی ۱۵
۱-۳-۳ بلورهای فوتونی سه بعدی ۱٦
۱-٤ نوار ممنوعه فوتونی ۱۷
۱-۵ ایجاد نقص در بلورهای فوتونی ۲۲
۱-۵-۱ نقص نقطه ای ۲۳
۱-۵-۲ نقص خطی ۲۵
۱-٦ اهمیت و کاربرد بلورهای فوتونی ۲۷

۱-۷ مفهوم سوئیچ و سوئیچ زنی نوری ۲۹
۱-۸ انواع سوئیچ های اپتیکی ۳۱
۱-۸-۱ سوئیچ های اپتومکانیکی ۳۱
۱-۸-۲ سوئیچ های الکترواپتیکی(OEO) ۳۱
۱-۸-۳ سوئیچ های آکوستو اپتیکی ۳۲
۱-۸-٤ سوئیچ های ترمواپتیکی ۳۲
۱-۸-۵ سوئیچ های کاملا نوری (OOO) ۳۳
۲ فصل دوم مبانی و روش ها ۳٤
۲-۱ روش تفاضل محدود در حوزه ی زمان ۳٦
۲-۱-۱ علل گسترش روش FDTD ۳٦
۲-۱-۲ ویژگی های روش FDTD ۳۷
۲-۱-۳ حل معادله موج اسکالر یک بعدی به روش FDTD ۳۹
۲-۱-٤ معادلات ماکسول ٤٤
۲-۱-۵ الگوریتم Yee ٤٦
۲-۱-٦ معادلات ماکسول در محیط همگن ۵۲
۲-۱-۷ شرایط مرزی مورد استفاده در بلورهای فوتونی ۵٦
۲-۲ روش بسط امواج تخت ۵٦
۲-۲-۱ بلور فوتونی یک بعدی ۵۷
۲-۲-۲ بررسی ساختار نوار ممنوعه انرژی چند بلور فوتونی ٦۰
۳ فصل سوم بحث و نتایج ٦٦
۳-۱ بررسی ساختار نوار ممنوعه بلورهای فوتونی به روش بسط موج تخت ٦۷

۳-۱-۱ بررسی ساختار نوار ممنوعه بلور فوتونی بدون نقص ٦٧
۳-۱-۲ بررسی ساختار نوار ممنوعه بلور فوتونی با نقص نقطه ای ٦٨
۳-۱-۳ بررسی ساختار نوار ممنوعه بلور فوتونی با نقص خطی ٦٩
۳-۲ سوئیچ زنی تمام نوری در بلورهای فوتونی ۷۰
۳-۲-۱ بررسی سوئیچ زنی تمام نوری در بلور فوتونی با دو موجبر عمود بر هم ۷۲
۳-۲-۲ جداکننده نوری ۹۱
۳-۳ طراحی و شبیه سازی جداکننده نوری بر اساس ساختار Y شکل ۹۲
۳-۳-۱ مراحل شبیه سازی ساختار جداکننده نوری ۹۵
٤ فصل چهارم نتیجه گیری و پیشنهادات ١٠٦
منابع و مراجع ١٠٨

فهرست اشکال

عنوان صفحه

شکل ۱-۱ : بلور فوتونی یک بعدی ۳
شکل ۱-۲ : نمونه ای از بلور فوتونی یابلونووایت ۵
شکل ۱-۳ : ساختار مارپیچ درهم بافته ٦
شکل ۱-٤ : شبکه ی براوه ی ساختارهای مختلف بلوری در سه بعد ۷
شکل ۱-۵ : نمونه هایی از سلول های واحد قابل قبول و غیر قابل قبول در ساختارهای دوبعدی ۸
شکل ۱-٦ : a) نحوه رسم سلول واحد ویگنر- سایتز b) سلول ویگنر- سایتز برای شبکه مکعبی مرکز-سطحی .. ۹
شکل ۱-۷ : شبکه معکوس و g بردار شبکه معکوس ۱۰
شکل ۱-۸ : نمایش دو هندسه ی پایه بلور فوتونی دو بعدی، راست: شبکه مربعی، چپ: شبکه مثلثی ۱۲
شکل ۱-۹ : a) بردارهای پایه و چند نقطه در شبکه معکوس یک شبکه دوبعدی، ناحیه اول بریلوئن مشخص شده است. b) یک بردار موج دلخواه در جهت XΓ ۱۳
شکل ۱-۱۰ : a) نزدیک ترین همسایگان در شبکه مربعی b) ناحیه اول بریلوئن در شبکه مربعی c) ناحیه دوم و سوم بریلوئن در شبکه مربعی ۱٤
شکل ۱-۱۱ : مثال های ساده از بلور فوتونی یک، دو و سه بعدی. رنگ های متفاوت نشان دهنده مواد با ثابت دی الکتریک متفاوت است ۱٤
شکل ۱-۱۲ : بلور فوتونی یک بعدی ۱۵
شکل ۱-۱۳ : بلور فوتونی دو بعدی ۱٦
شکل ۱-۱٤ : بلور فوتونی سه بعدی ۱٦
شکل ۱-۱۵ : بلورهای فوتونی سه بعدی موجود در طبیعت a) پروانه ی مورفو b) پر طاووس c) سنگ اوپال .. ۱۷
شکل ۱-۱٦ : نمایش ساختار نوار ممنوعه یک بلور فوتونی یک بعدی ۱۸
شکل ۱-۱۷ : نواحی اول تا سوم بریلوئن با رنگ های متفاوت نشان داده شده اند. ناحیه کاهش ناپذیر در بازه $[0,\pi]$ قرار دارد ۱۹
شکل ۱-۱۸ : نمودار پاشندگی یک بلور فوتونی یک بعدی که در ناحیه کاهش ناپذیر بریلوئن نشان داده شده است ۲۰
شکل ۱-۱۹ : نمودار پاشندگی مربوط به قالب سیلیکون بدون حضور حفره های هوا ۲۱
شکل ۱-۲۰ : نمودار پاشندگی مربوط به شبکه مربعی دو بعدی و باز شدگی نوار ممنوعه با اضافه شدن حفره ها ۲۲

شکل ۱-۲۱ : ایجاد نقص نقطه ای با a) برداشتن کاواک از درون بلور فوتونی b) بزرگ کردن شعاع کاواک مرکزی c) تغییر ضریب شکست کاواک مرکزی ۲٤

شکل ۱-۲۲ : ساختار نوار ممنوعه یک بلور فوتونی دوبعدی که دارای یک تراز فرکانسی در داخل نوار ممنوعه فوتونی می باشد ۲۵

شکل ۱-۲۳ : نقص خطی ایجاد شده با a) برداشتن یک ردیف b) تغییر در اندازه یک ردیف c) تغییر ضریب شکست یک ردیف از میله های دی الکتریک در شبکه بلور فوتونی ۲٦

شکل ۱-۲٤ : نمونه هایی از موجبرهای a) خمیده b) خم شدگی با زاویه ۹۰ درجه c) با اتصال Tشکل d) با اتصال Yشکل ۲۸

شکل ۱-۲۵ : نمایش رفتار سوئیچ الکترو اپتیکی ۳۲

شکل ۱-۲٦ : نمایش رفتار سوئیچ کاملا نوری ۳۳

شکل ۲-۱ : موقعیت مؤلفه های برداری میدان های الکتریکی و مغناطیسی در شبکه فضایی Yee ٤٦

شکل ۲-۲ : نمودار فضا-زمان الگوریتم Yee برای انتشار موج یک بعدی ٤۸

شکل ۲-۳ : ساختار نوار ممنوعه بلور فوتونی یک بعدی ۵۸

شکل ۲-٤ : سلول واحد و منطقه اول بریلوئن برای شبکه مربعی و مثلثی ۵۹

شکل ۲-۵ : ساختار نوار ممنوعه بلور فوتونی مربعی با دی الکتریک همگن و ضریب شکست واحد (شبکه ی تهی) ٦۱

شکل ۲-٦ : ساختار نواری برای بلور فوتونی با شبکه ی مربعی متشکل از میله های سیلیکون در هوا ٦۲

شکل ۲-۷ : نمای سه بعدی ساختار نواری بلور فوتونی با شبکه مربعی متشکل از میله های سیلیکون در زمینه ی هوا ٦۲

شکل ۲-۸ : ساختار نواری بلور فوتونی با شبکه ی مربعی متشکل از سوراخ های هوا در زمینه ی سیلیکون ٦۳

شکل ۲-۹ : نمای سه بعدی بلور فوتونی با شبکه ی مربعی و متشکل از سوراخ های هوا در زمینه ی سیلیکون .٦۳

شکل ۲-۱۰: ساختار نواری بلور فوتونی با شبکه مثلثی متشکل از سوراخ های هوا در زمینه ی سیلیکون ٦٤

شکل ۲-۱۱: ساختار نواری بلور فوتونی با شبکه ی مثلثی متشکل از میله های سیلیکون در زمینه ی هوا ٦٤

شکل ۳-۱: بلور فوتونی با شبکه مربعی بدون نقص و ساختار نوار ممنوعه فوتونی مربوطه ٦۷

شکل ۳-۲: بلور فوتونی با شبکه مربعی همراه با نقص نقطه ای و ساختار نوار ممنوعه مربوطه ٦۸

شکل ۳-۳ : بلور فوتونی با شبکه مربعی در حضور نقص خطی و ساختار نوار ممنوعه مربوطه ٦۹

شکل ۳-٤ : بلور فوتونی شبکه مربعی بدون نقص و عدم نفوذ مد فرکانسی در بلور فوتونی ۷۱

شکل ۳-۵ : نمودار توان خروجی برای بلور فوتونی بدون نقص ۷۲

شکل ۳-٦ : بلور فوتونی طراحی شده با دو موجبر عمود بر هم ۷۳

شکل ۳-۷ : شبیه سازی سوئچ زنی تمام نوری در بلور فوتونی با دو موجبر عمود بر هم ۷۵
شکل ۳-۸ : پرتو سیگنال و پرتو کنترلی هر دو باهم بر بلور فوتونی غیر خطی اعمال شده اند و سیستم در طول موج تشدید قرار دارد. ۷۷
شکل ۳-۹ : نمودار توان خروجی برای بلور فوتونی غیرخطی که پرتو سیگنال و پرتو کنترلی با هم اعمال شده اند. ۷۷
شکل ۳-۱۰ : تنها پرتو سیگنال بر بلور فوتونی غیرخطی اعمال شده است و سیستم در طول موج تشدید مرحله سوم قرار دارد. ۷۸
شکل ۳-۱۱ : نمودار توان خروجی برای بلور فوتونی غیرخطی که فقط پرتو سیگنال بر آن اعمال شده است. ۷۹
شکل ۳-۱۲ : نمودار توان خروجی بر حسب طول موج در حالتی که فقط پرتو سیگنال اعمال شده است. ۸۰
شکل ۳-۱۳ : نمودار توان خروجی بر حسب طول موج در حالتی که پرتو سیگنال و کنترلی هردو باهم اعمال شده باشند. ۸۱
شکل ۳-۱٤ : شیفت حاصل از تشدید بین دو طول موج که با اعمال سوئیچ زنی اتفاق می افتد. ۸۲
شکل ۳-۱۵ : نمودار انرژی بر حسب فرکانس ۸۳
شکل ۳-۱٦ : نمودار شدت خروجی بر حسب شدت ورودی ۸۵
شکل ۳-۱۷ : نمودار دوپایایی و دو مقدار خروجی به ازای یک مقدار ورودی ۸۵
شکل ۳-۱۸ : نمودار دوپایایی برای بلور فوتونی با دو موجبر عمود بر هم ۸٦
شکل ۳-۱۹ : نمودار دوپایایی به دست آمده توسط نرم افزار متلب ۸۷
شکل ۳-۲۰ : ساختار بلور فوتونی با دو موجبر عمود بر هم و سه میله جفت شده به کاواک و نمودار توان خروجی در حالت خارج از تشدید ۸۹
شکل ۳-۲۱ : ساختار بلور فوتونی با دو موجبر عمود بر هم و سه میله جفت شده به کاواک و نمودار توان خروجی در حالت تشدید ۸۹
شکل ۳-۲۲ :شبیه سازی بلور فوتونی دو بعدی با شبکه هگزاگونال که با ساختار موجبرهای به شکل Y به هم متصل شده است. ۹۳
شکل ۳-۲۳ : نمودار توان خروجی برحسب طول موج تشدید شاخه بالا و پایین ۹۳
شکل ۳-۲٤ : نمودار توان خروجی برحسب طول موج برای شاخه های بالا و پایین ۹٤
شکل ۳-۲۵ : شبیه سازی انجام شده برای شاخه پایین در حالت خطی ۹٦
شکل ۳-۲٦ : نمودار میدان داخل کاواک برای شاخه پایین در حالت خطی ۹٦
شکل ۳-۲۷ : شبیه سازی انجام شده برای شاخه بالا در حالت خطی ۹۷
شکل ۳-۲۸ : نمودار میدان داخل کاواک برای شاخه بالا در حالت خطی ۹۸

شکل ۳-۲۹ : شبیه سازی انجام شده برای شاخه پایین در حالت غیرخطی.....۹۹
شکل ۳-۳۰ : شبیه سازی انجام شده برای شاخه پایین خارج از تشدید در حالت خطی ۹۹
شکل ۳-۳۱ : شبیه سازی انجام شده برای شاخه بالا در حالت غیرخطی.....۱۰۰
شکل ۳-۳۲ : شبیه سازی انجام شده برای شاخه بالا خارج از تشدید در حالت خطی.....۱۰۱
شکل ۳-۳۳ : شبیه سازی با طول موج مرکزی λc و عبور پرتو ورودی از هر دو شاخه ۱۰۳
شکل ۳-۳٤ : شبیه سازی با طول موج $\lambda 1$ و عبور پرتو ورودی از شاخه پایین ۱۰۳
شکل ۳-۳۵ : شبیه سازی با طول موج $\lambda 2$ و عبور پرتو ورودی از شاخه بالا.....۱۰٤
شکل ۳-۳٦ : نمودار توان خروجی بر حسب طول موج و شیفت حاصل از تشدید بین دو طول موج.....۱۰٤

فهرست جداول

عنوان صفحه

جدول ۳-۱ : نتایج سوئیچ زنی برای بلور فوتونی با دو موجبر عمود بر هم ۸۰
جدول ۳-۲ : نتایج حاصل از مطالعه تأثیر تعداد میله های جفت شده به کاواک بر سوئیچ زنی تمام نوری ۹۰
جدول ۳-۳ : اختلاف طول موج های حالت غیرخطی بر حسب مشخصات کاواک.....۱۰۲
جدول ۳-٤ : مقایسه توان خروجی دو حالت خطی و غیر خطی.....۱۰۲

مقدمه:

یکی از دلایل پیشرفت دانشمندان در زمینه علم و صنعت، شناخت و درک خواص مواد موجـود در طبیعت بوده است. دانشمندان با بررسی ویژگی های مربوط به این مواد، توانسته اند مـوادی بـا ویژگی های خاص و دلخواه طراحی کنند.

دانشمندان علم اپتیک و فوتونیک، با بررسـی ویژگـی هـای الکتریکـی، مکـانیکی و اپتیکـی مـواد توانسته اند موادی باخواص جالب و کاربرد بیشتر طراحی کنند. بررسی خواص نوری و چگونگی انتشار نور در این نوع مواد یکی از اصلی ترین اهداف دانشمندان این علـم مـی باشـد. از ایـن رو تلاش های فراوانی جهت ساخت و طراحی ابزاری برای کنترل رفتار نور، طوری که نور بتواند در یک ناحیه متمرکز شود و یا از ناحیه دلخواهی بدون ایجاد اتلاف عبور کند، صورت گرفته اسـت. پایه و اساس در طراحی این ابزار، بلورهای فوتونی می باشند که به خـاطر خـواص نـوری فـوق العاده ی خود، توجه قابل ملاحظه ای را به خود جلب کرده اند. بلورهای فوتونی، ساختارهای دی الکتریکی متناوب هستند که دارای نواحی خاص به نام نواحی ممنوعه انرژی می باشند که هیچ مد نوری اجازه انتشار در آن ناحیه را ندارد.

در فصل اول این پایان نامه، بلورهای فوتونی و خواص و ویژگی های آن معرفی شـده اسـت. در فصل دوم، روش های عددی برای مطالعه بلورهای فوتونی معرفی شده و از بین آن هـا، دو روش تفاضل محدود در حوزه ی زمان و بسط امواج تخت مورد بررسی قـرار گرفتـه اسـت. در فصـل سوم، به وسیله روش بسط امواج تخت، نوار ممنوعه انـرژی بـرای بلـور فوتـونی طراحـی شـده، محاسبه شده است و عمل سوئیچ زنی نوری برای بلـور فوتـونی بـا دو مـوجبر عمـود بـر هـم و همچنین برای بلور فوتونی با یک کاواک و سه موجبر که بـه همـدیگر جفـت شـده انـد و نقـش جداکننده نوری را ایفا می کند، شبیه سازی و نتایج حاصل از آن ارائه شـده اسـت. عمـل سـوئیچ زنی و طراحی آن بر طبق روش FDTD و با استفاده از نرم افزار Comsol Multiphysics بررسی گردیده است.

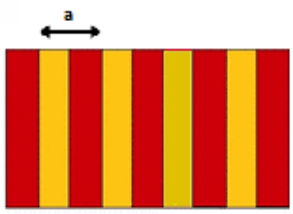
فصل اول

آشنایی با بلورهای فوتونی

۱ فصل اول

مقدمه

بلورهای فوتونی[۱] آرایه های متناوبی از مواد دی الکتریک با ضرایب شکست متفاوت هستند که حرکت فوتون ها یا مدهای نوری را تحت تاثیر قرار می دهند. در شکل ۱-۱، یک بلور فوتونی یک بعدی نشان داده شده است که قسمت های تیره دارای گذردهی[۲] الکتریکی ε و مغناطیسی μ متجانس و متفاوت نسبت به قسمت های روشن هستند.



شکل ۱-۱ : بلور فوتونی یک بعدی [۱]

در شکل فوق a ثابت شبکه[۳] و یا دوره ی تناوب نامیده می شود و نمایان گر حداقل طول فضایی است که ساختار شبکه در آن تکرار می گردد. به بیان دیگر $\varepsilon(r+a)=\varepsilon(r)$ که در آن $\varepsilon(r)$ تابع مکانی گذردهی الکتریکی است.

همان طور که پتانسیل متناوب در نیمه رسانا ها، نوارهای انرژی مجاز و ممنوعه برای الکترون ها به وجود می آورد، تناوب در ضریب شکست بلورهای فوتونی نیز، موجب به وجود آمدن نواحی مجاز و ممنوعه فرکانسی برای فوتون می شود. انتشار فوتون یا یک مد نوری در داخل بلور فوتونی به طول موج آن بستگی دارد. طول موج هایی از نور که اجازه انتشار داخل بلور

[۱] Photonic Crystal
[۲] Permitivity
[۳] Lattice Constant

فوتونی نمی یابند، تشکیل ناحیه ممنوعه فرکانسی می دهند که به این ناحیه، باند گاف فوتونی[۱] یـا نوار ممنوعه انرژی گفته می شود. وجود این نوار، ما را قادر به کنترل پرتوهای نوری تابیـده شـده بر بلور فوتونی می کند و همچنین منجر به ظاهر شدن پدیده هـای جـالبی ماننـد گسـیل خودبـه خودی، آینه های با بازتاب بالا و موجبر های با اتلاف پایین می شود.

بین هر دو نوار ممنوعه فوتونی متوالی یک نوار مجاز بسامد قرار دارد (و برعکس) کـه انتشـار موج در آن تحت شرایطی امکان پذیر است. اگر یک نوار ممنوعه فوتونی بـا بـازه بسـامد $[f_1, f_2]$ مشخص شود که در آن $f_1 < f_2$، در اینصورت $f_c \cong (f_1 + f_2)/2$ بسـامد مرکـزی نـوار ممنوعـه و $\Delta f_c \cong f_2 - f_1$ پهنای نوار ممنوعه نامیده می شـوند. معمـولا در طراحـی هندسـه هـای گونـاگون بلورهای فوتونی علاقه مندیم ساختارهایی با عریض ترین پهنای نسبی نوار ممنوعه که به صورت $m \equiv \Delta f_c / f_c$ تعریف می شود را به دست آوریم[۱].

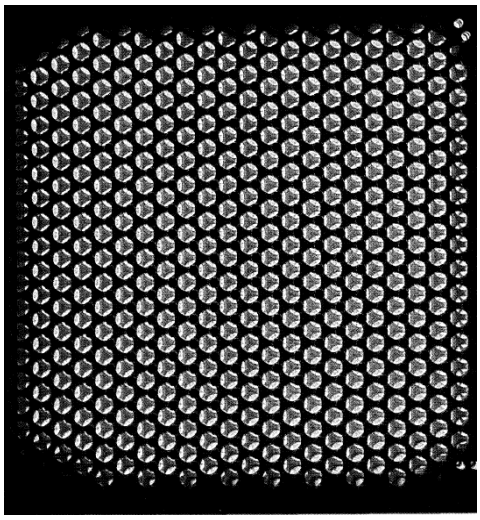
۱-۱ تاریخچه بلورهای فوتونی

اگرچه از سال ۱۸۸۷ مطالعه بر روی بلورهای فوتونی شروع شده بود، اما لفـظ بلـور فوتـونی برای اولین بار حدود صد سال بعد ازآن مـورد اسـتفاده قـرار گرفـت. در سـال ۱۸۸۷ لـرد رایلـه[۲] مطالعات خود را، مبنی بر اینکه ساختار های متنـاوب دی الکتریکـی دارای نـوار انـرژی فوتـونی هستند و مانع انتشار برخی طول موج های نور می شوند، آغاز کرد. بررسی ایـن مـواد ادامـه پیـدا کرد تا اینکه در سال ۱۹۸۷ این ساختارها به طور گسترده توسط ایلـی یـابلونوویچ[۳] [۲] و سـاجیو جان[٤] [۳] مورد مطالعه قرار گرفتند و سـرانجام در سـال ۱۹۸۹، نـام بلـور فوتـونی بـر روی ایـن ساختارها نهاده شد. در سال ۱۹۹۰ بلور فوتونی بر مبنای بلور الماس توسط هو و همکارانش[٥] [٤] معرفی شد که دارای پهنای نوار ممنوعه[٦] $(\Delta\omega/\omega_0)$ برابر ۲۹٪ بود. یک سـال بعـد در سـال ۱۹۹۱، ساختاری شبیه بلور الماس که دارای پهنای نوار ممنوعه برابر با ۱۹٪ بود، توسط یابلونوویچ ارائـه

---

[۱] Photonic Band Gap
[۲] Lord Rayleigh
[۳] Eli Yablonovitch
[٤] Sajeev John
[٥] Ho et. al
[٦] Bandgap Width

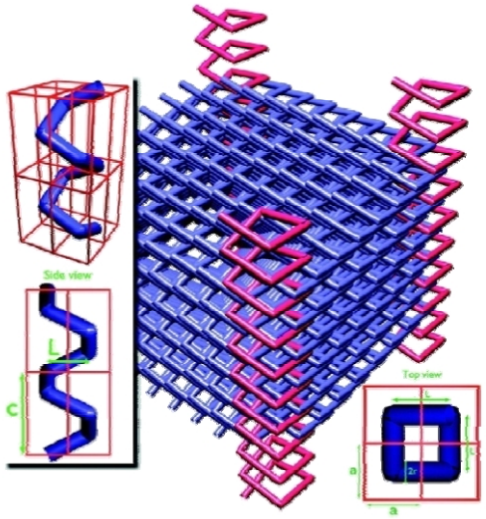
شد و به بلور یابلونوولیت معروف شد[۵]. شکل ۱-۲ نمونه ای از بلور یابلونوولیت را نشان می دهد.



شکل ۱-۲ : نمونه ای از بلور فوتونی یابلونوولیت[۵]

به دنبال آن ساختارهای بسیار گوناگونی ارائه شدند که عموما از نظر وجود فناوری ساخت و یا پهنای نوار ممنوعه انرژی، مطلوب نبودند. در سال ۱۹۹۵ بلورهای فوتونی دوبعدی در مقیاس بزرگ برای طیف مرئی ساخته شدند و در سال ۱۹۹۸ بلورهای فوتونی در مقیاس کوچک برای طول موج های نزدیک طیف مرئی ساخته شدند. در سال ۲۰۰۱ تودور و جان[۱] [٦] پس از محاسبات مفصل ساختار پیچیده ای به نام مارپیچ درهم بافته را ارائه کردند که دارای نوار ممنوعه فوتونی کامل بود. شکل ۱-۳ این ساختار را نمایش می دهد.

[۱] Toader and John



شکل ۱-۳ : ساختار مارپیچ درهم بافته[٦]

۱-۲ شبکه های بلوری

یک ساختار بلوری از تکرار بی نهایت واحد یکسان در فضا ساخته می شود. این ساختار را می توان بر حسب یک شبکه توصیف کرد که محتوای فیزیکی هر تناوب شبکه، پروفایل یک تناوب ساختار است. به چنین شبکه ای، شبکه براوه[۱] گفته می شود که اساس درک یک جامد بلوری است. واحدهای تشکیل دهنده شبکه بلوری ممکن است اتم های منفرد، ملکول ها و یا یون ها باشند. محتوای فیزیکی هر تناوب را پایه[۲] شبکه می نامند که به صورت تناوبی تکرار می شود و ساختار تناوبی را می سازد. شبکه یک مفهوم کاملا ریاضی است که به همراه پایه، صورت فیزیکی پیدا می کند. در حالت کلی یک شبکه براوه با سه بردار اساسی $\vec{a}_1$ ، $\vec{a}_2$ و $\vec{a}_3$ توصیف می شود به گونه ای که محتوای فیزیکی نقاط $\vec{R}$ که با رابطه زیر توصیف می شوند یکسان است:

$$\vec{R} = n_1\vec{a}_1 + n_2\vec{a}_2 + n_3\vec{a}_3 \quad , n_1, n_2, n_3 \in \mathbb{Z} \qquad (۱-۱)$$

بردارهای $\vec{a}_1$ ، $\vec{a}_2$ و $\vec{a}_3$ بردارهای واحد[۳] نامیده می شوند.

---

۱ Bravais lattice
۲ Basis
۳ Primitive vectors