



دانشگاه پیام نور

دانشکده علوم پایه

پایان نامه

برای دریافت مدرک کارشناسی ارشد

رشته فیزیک حالت جامد

گروه علمی فیزیک

عنوان پایان نامه :

محاسبه مد نقص در موجبرهای بلور فوتونی دو بعدی متشکل

از سه ضریب شکست متفاوت

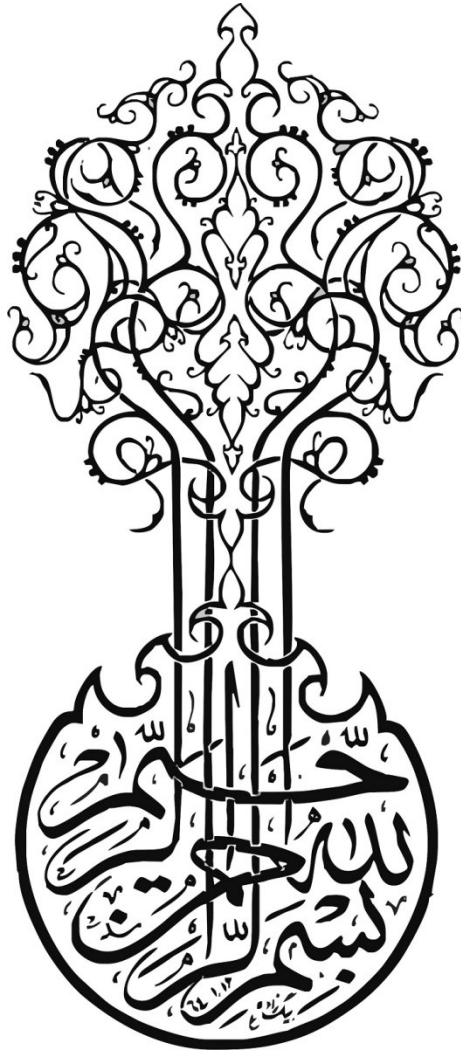
سید حسن زهرایی

استاد راهنما :

دکتر عبدالرسول قرائتی

آذر ۱۳۹۱







دانشگاه پیام نور

دانشکده علوم پایه

مرکز شیراز

پایان نامه

برای دریافت مدرک کارشناسی ارشد

رشته فیزیک حالت جامد

گروه علمی فیزیک

عنوان پایان نامه :

محاسبه مد نقص در موجبرهای بلور فوتونی دو بعدی متشکل

از سه ضریب شکست متفاوت

سید حسن زهرایی

استاد راهنما :

دکتر عبدالرسول قرائتی

آذر ۱۳۹۱

تاریخ : ۹۱/۰۹/۲۸

شماره : ۰۵/۱۶۲۷۵

پیوست :



دانشگاه پیام نور استان فارس  
بسمه تعالی



جمهوری اسلامی ایران  
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

### صور تجلسه دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

جلسه دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد آقای سیدحسن زهرایی دانشجوی رشته فیزیک گرایش حالت جامد به شماره دانشجویی ۸۹۰۰۷۴۰۸۱ با عنوان:

" محاسبه مدنقص در موج برهای بلور فوتونی دو بعدی متشکل از سه ضریب شکست متفاوت "

با حضور هیات داوران در روز سه شنبه مورخ ۱۳۹۱/۰۹/۲۸ ساعت ۱۲ در محل ساختمان اندیشه دانشگاه پیام نور شیراز برگزار شد و هیات داوران پس از بررسی، پایان نامه مذکور را شایسته نمره به عدد ۸۹.۲ به حروف نوزده و دو دهم با درجه عالی تشخیص داد.

ردیف	نام و نام خانوادگی	هیات داوران	مرتبہ دانشگاهی	دانشگاه	امضاء
۱	دکتر عبدالرسول قرآنتی جهرمی	راهنما	دانشیار	پیام نور شیراز	
۲	دکتر محمود حسینی فرزاد	داور	استادیار	شیراز	
۳	دکتر سیداحمد رضوی زاده	نماینده تحصیلات تکمیلی	استادیار	پیام نور شیراز	

رئیس اداره تحصیلات تکمیلی

شیراز - شهرک گلستان، بلوار دهخدا  
قبل از نمایشگاه بین المللی  
تلفن : ۰۷۱۱-۶۲۲۲۲۴۰-۳  
دورنگار : ۰۷۱۱-۶۲۲۲۲۲۹  
صندوق پستی : ۱۳۶۸ - ۷۱۹۵۵  
www.spnu.ac.ir  
Email : admin@spnu.ac.ir

اینجانب سید حسن زهرایی دانشجوی ورودی سال ۱۳۸۹ مقطع کارشناسی ارشد رشته فیزیک حالت جامد گواهی می‌نمایم چنانچه در پایان نامه خود از فکر، ایده و نوشته دیگری بهره گرفته‌ام با نقل قول مستقیم یا غیر مستقیم منبع و ماخذ آن را نیز در جای مناسب ذکر کرده‌ام. بدیهی است مسئولیت تمامی مطالبی که نقل قول دیگران نباشد بر عهده خویش می‌دائم و جوابگوی آن خواهم بود.

دانشجو تأیید می‌نماید که مطالب مندرج در این پایان نامه نتیجه تحقیقات خودش می‌باشد و در صورت استفاده از نتایج دیگران مرجع آن را ذکر نموده است.

نام و نام خانوادگی دانشجو سید حسن زهرایی

تاریخ و امضاء ۱۳۹۱/۶/۱

اینجانب سید حسن زهرایی دانشجوی ورودی سال ۱۳۸۹ مقطع کارشناسی ارشد رشته فیزیک حالت جامد گواهی می‌نمایم چنانچه بر اساس مطالب پایان نامه خود اقدام به انتشار مقاله، کتاب، و ... نمایم ضمن مطلع نمودن استاد راهنما، با نظر ایشان نسبت به نشر مقاله، کتاب، و ... و به صورت مشترک و با ذکر نام استاد راهنما مبادرت نمایم.

نام و نام خانوادگی دانشجو سید حسن زهرایی

تاریخ و امضاء ۱۳۹۱/۶/۱

کلیه حقوق مادی مترتب از نتایج مطالعات، آزمایشات و نوآوری ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه متعلق به دانشگاه پیام نور می‌باشد.

آذر ماه ۱۳۹۱

تقدیم به

## پدر و مادر عزیزم

آنان که فروغ نگاهشان، گرمی کلامشان و روشنی رویشان

سرمایه های جاودانی زندگی من است.

آنان که راستی قامتم در شکستگی قامتشان تجلی یافت.

در برابر وجود گرامیشان زانوی ادب بر زمین می زنم و

با دلی مملو از عشق، محبت و خضوع بر دستشان بوسه

می زنم.

## تشکر و قدردانی

هیچ یادم نرود این معنی که مرا مادر من نادان زاد ، پدرم نیز چو استادم دید، گشت از تربیت من آزاد، پس مرا منت از استاد بود که به تعلیم من استاد.

بعد از سپاس از خالق بی همتا بر مصداق حدیث « من علمنی حرفاً فقد صیرنی عبدا »

بر خود لازم می دانم که مراتب تشکر و قدردانی خویش را از اساتید محترم ابراز دارم.

استاد عزیز و گرامی جناب آقای دکتر عبدالرسول قرائتی ، بهره مندی ام از محضر علم و اخلاقتان را همیشه با افتخار یاد می کنم و همواره خود را مرهون الطاف و نصایح خردمندانه و دلسوزانه تان می دانم.



## چکیده

### محاسبه مد نقص در موجبرهای بلور فوتونی دو بعدی متشکل از سه ضریب شکست متفاوت

توسط : سید حسن زهرایی

در این پایان نامه ساختار نواری موجبر بلور فوتونی دو بعدی با شبکه مربعی از استوانه‌های دی-الکتریک با سطح مقطع‌های دایره‌ای، بیضی و لوزی با استفاده از روش بسط موج تخت مورد مطالعه قرار داده‌ایم. اولین هندسه، موجبر بلور فوتونی با استوانه‌های دی‌الکتریک از جنس گالیم آرسناید با سطح مقطع دایره‌ای است که در دو مورد زمینه از جنس هوا و کربن قرار گرفته است. دومین هندسه، موجبر بلور فوتونی با استوانه‌های دی‌الکتریک با سطح مقطع بیضی است که در این مورد تأثیر تغییر کشیدگی المان‌ها و چرخش آن‌ها مورد بررسی قرار داده‌ایم. سومین هندسه، موجبر بلور فوتونی با استوانه‌های با سطح مقطع لوزی است که در این مورد تأثیر چرخش المان‌ها بر ساختار نواری مورد مطالعه قرار داده‌ایم. محاسبات بدین صورت انجام گرفته است که ابتدا با استفاده از روش بسط موج تخت، معادلات ویژه مقداری بلور فوتونی (با نقص و بدون نقص) را به دست آورده و سپس نقشه نوار گاف و ساختار نواری را برای هر دو مد قطبشی TE و TM رسم کرده‌ایم.

بنا به نتایج حاصل شده، استفاده از هندسه بیضی و حساسیت ساختار نواری آن به کشیدگی و جهت گیری المان‌ها، فرصت‌های بیشتری برای دست‌یابی به نوار گاف پهن‌تر و فرکانس هدایتی بزرگتر را فراهم می‌کند. همچنین با تغییر ضریب دی‌الکتریک نقص و افزایش آن برای هر موجبر متشکل از استوانه‌های دی‌الکتریک در زمینه هوا، شاهد کاهش فرکانس‌های هدایتی برای هر دو مد قطبشی TE و TM خواهیم بود. یافته‌ها همچنین نشان می‌دهند که موجبر بلور فوتونی با سه ضریب شکست متفاوت نسبت به موجبر با دو ضریب شکست متفاوت، جهت طراحی موجبر با سرعت گروه کمتری و با تغییرات کمتری مناسب خواهد بود.

**واژگان کلیدی:** بلور فوتونی، نوار گاف، موجبر بلور فوتونی، روش بسط موج تخت، مد نقص.

## عنوان

## صفحه

### فصل اول: مقدمه‌ای بر بلورهای فوتونی

۱	۱-۱ معرفی بلورهای فوتونی
۵	۲-۱ اصطلاحات پایه
۶	۳-۱ تاریخچه بلور فوتونی
۱۰	۴-۱ کاربردها
۱۰	۱-۴-۱ مدیریت تابش خودبخودی
۱۱	۲-۴-۱ عایق‌های اپتیکی
۱۱	۳-۴-۱ موجبرهای بلور فوتونی
۱۱	۴-۴-۱ تقسیم‌کننده‌ها

### فصل دوم: فرمولبندی هامیلتونی معادلات ماکسول

۱۲	۱-۲ انتشار موج: معادلات ماکسول
۱۵	۲-۲ روش‌های مکانیک کوانتومی در الکترومغناطیس
۱۹	۳-۲ تقارن‌ها، رفتار کلی پاسخ‌های معادلات ماکسول
۲۰	۱-۳-۲ تقارن انتقالی پیوسته یک بعدی
۲۰	۲-۳-۲ تقارن انتقالی گسسته دو بعدی و تقارن انتقالی پیوسته یک بعدی
۲۲	۳-۳-۲ تقارن چرخشی پیوسته
۲۳	۴-۳-۲ تقارن چرخشی گسسته

### فصل سوم: بلورهای فوتونی دو بعدی

۲۴	۱-۳ بلورهای فوتونی دو بعدی
۲۹	۲-۳ حل عددی معادلات ویژه مقدراری بلور فوتونی دو بعدی
۳۱	۳-۳ نتایج محاسبات

- ۳۴ ۱-۳-۳ بلور فوتونی دو بعدی متشکل از استوانه‌های با سطح مقطع بیضی
- ۳۸ ۲-۳-۳ بلور فوتونی دو بعدی با استوانه‌های سطح مقطع لوزی
- ۴۰ ۴-۳ نقشه نوار گاف بلور فوتونی دو بعدی

### فصل چهارم: موجبرهای بلور فوتونی دو بعدی

- ۴۲ ۱-۴ نقص خطی و نقطه‌ای در بلورهای فوتونی دو بعدی
- ۴۳ ۲-۴ روش بسط موج تخت برای بلور فوتونی دو بعدی با نقص خطی
- ۴۹ ۳-۴ پیاده سازی معادلات ویژه مقداری عددی موجبر بلور فوتونی دو بعدی با نرم افزار متلب
- ۵۰ ۴-۴ نتایج محاسبات ساختار نواری

### فصل پنجم: موجبرهای بلور فوتونی دو بعدی متشکل از استوانه‌هایی با سطح مقطع

#### بیضی

- ۵۳ ۱-۵ موجبر بلور فوتونی بیضی
- ۵۵ ۲-۵ چرخش المان‌های بیضی موجبر بلور فوتونی
- ۵۹ ۳-۵ تأثیر کشیدگی المان‌های بیضی بر ساختار نواری موجبر بلور فوتونی دو بعدی
- ۶۳ ۴-۵ بررسی قطبشگری موجبر بلور فوتونی با المان‌های بیضی

#### نتایج و پیشنهادات

- ۶۹ فهرست منابع و مراجع

## فهرست نمودارها

- شکل ۱-۵. ساختار نواری بلور فوتونی دو بعدی برای هر دو مد قطبشی ۶
- شکل ۱-۶. ساختار نواری بلور فوتونی سه بعدی با ساختار مکعبی مرکز سطحی ۷
- شکل ۱-۷. ساختار نواری بلور فوتونی سه بعدی با ساختار الماسی ۸
- شکل ۱-۸. ساختار نواری بلور فوتونی سه بعدی با ساختار مکعبی مرکز سطحی وارون ۹
- شکل ۳-۴. ساختار نواری بلور فوتونی دو بعدی متشکل از استوانه‌های دی‌الکتریک در زمینه هوا برای هر دو مد قطبشی ۳۱
- شکل ۳-۵. ساختار نواری بلور فوتونی دو بعدی متشکل از استوانه‌های توخالی در زمینه دی‌الکتریک برای هر دو مد قطبشی ۳۱
- شکل ۳-۶. ساختار نواری بلور فوتونی دو بعدی متشکل از استوانه‌های دی‌الکتریک در زمینه هوا برای هر دو مد قطبشی به ازای تغییر شعاع المان‌ها ۳۳
- شکل ۳-۸. ساختار نواری بلور فوتونی دو بعدی برای هندسه بیضی برای هر دو مد قطبشی به ازای تغییر کشیدگی المان‌ها ۳۷
- شکل ۳-۱۰. ساختار نواری بلور فوتونی دو بعدی متشکل از المان‌های لوزی برای هر دو مد قطبشی ۳۹
- شکل ۳-۱۱. نقشه نوار گاف بلور فوتونی دو بعدی برای هر دو مد قطبشی ۴۰
- شکل ۳-۱۲. ساختار نواری بلور فوتونی دو بعدی به ازای شعاع المان بهنجار شده  $r = 0.2a$  برای هر دو مد قطبشی ۴۱
- شکل ۳-۱۳. ساختار نواری بلور فوتونی دو بعدی به ازای شعاع المان بهنجار شده  $r = 0.32a$  برای هر دو مد قطبشی ۴۱
- شکل ۴-۳. ساختار نواری موجبر بلور فوتونی دو بعدی به ازای استوانه‌های دی‌الکتریک و زمینه و نقص هوا برای هر دو مد قطبشی ۵۰

شکل ۴-۴. ساختار نواری موجبر بلور فوتونی دو بعدی به ازای استوانه‌های دی‌الکتریک و زمینه هوا و نقص کربن برای هردو مد قطبشی

۵۰

شکل ۴-۵. ساختار نواری موجبر بلور فوتونی دو بعدی به ازای استوانه‌های دی‌الکتریک و زمینه کربن و نقص هوا برای هردو مد قطبشی

۵۱

شکل ۴-۶. ساختار نواری موجبر بلور فوتونی دو بعدی به ازای استوانه‌های دی‌الکتریک و زمینه و نقص کربن برای هردو مد قطبشی

۵۱

شکل ۴-۷. ساختار نواری موجبر بلور فوتونی دو بعدی به ازای استوانه‌های دی‌الکتریک و زمینه هوا با سه ردیف نقص خطی هوا برای هر دو مد قطبشی

۵۲

شکل ۵-۲. ساختار نواری موجبر بلور فوتونی دو بعدی متشکل از استوانه‌های با سطح مقطع بیضی برای نقص هوا و زمینه هوا برای هردو مد قطبشی

۵۴

شکل ۵-۳. ساختار نواری موجبر بلور فوتونی دو بعدی متشکل از استوانه‌های با سطح مقطع بیضی برای نقص کربن و زمینه هوا برای هردو مد قطبشی

۵۵

شکل ۵-۵. ساختار نواری موجبر بلور فوتونی دو بعدی متشکل از استوانه‌های با سطح مقطع بیضی به ازای زاویه چرخشی  $\theta = 0 \text{ rad}$  برای هردو مد قطبشی

۵۷

شکل ۵-۶. ساختار نواری موجبر بلور فوتونی دو بعدی متشکل از استوانه‌های با سطح مقطع بیضی به ازای زاویه چرخشی  $\theta = \pi / 6 \text{ rad}$  برای هردو مد قطبشی

۵۷

شکل ۵-۷. ساختار نواری موجبر بلور فوتونی دو بعدی متشکل از استوانه‌های با سطح مقطع بیضی به ازای زاویه چرخشی  $\theta = \pi / 3.27 \text{ rad}$  برای هردو مد قطبشی

۵۷

شکل ۵-۸. ساختار نواری موجبر بلور فوتونی دو بعدی متشکل از استوانه‌های با سطح مقطع بیضی به ازای زاویه چرخشی  $\theta = \pi / 3 \text{ rad}$  برای هردو مد قطبشی

۵۸

شکل ۵-۹. ساختار نواری موجبر بلور فوتونی دو بعدی متشکل از استوانه‌های با سطح مقطع بیضی به ازای زاویه چرخشی  $\theta = \pi / 2 \text{ rad}$  برای هردو مد قطبشی

۵۸

شکل ۵-۱۰. ساختار نواری موجبر بلور فوتونی دو بعدی متشکل از استوانه‌های با سطح مقطع بیضی به ازای زاویه چرخشی  $\theta = \pi / 1.44 \text{ rad}$  برای هردو مد قطبشی

۵۸

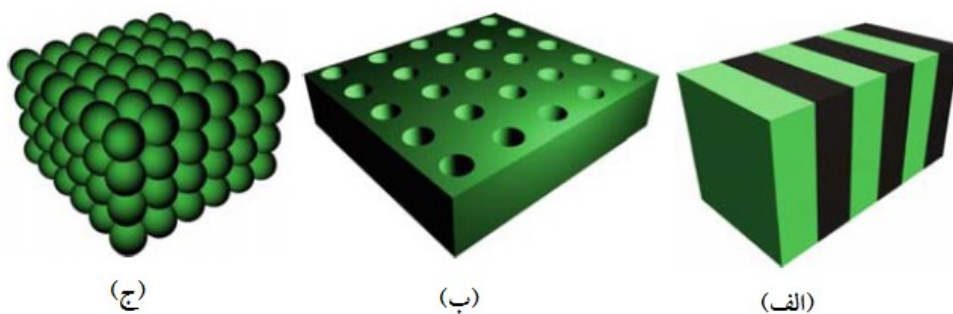
- شکل ۵-۱۲. ساختار نواری موجبر بلور فوتونی دو بعدی متشکل از استوانه‌های با سطح مقطع بیضی به ازای کشیدگی  $e=1$  برای هردو مد قطبشی  
 ۶۰
- شکل ۵-۱۳. ساختار نواری موجبر بلور فوتونی دو بعدی متشکل از استوانه‌های با سطح مقطع بیضی به ازای کشیدگی  $e=1.33$  برای هردو مد قطبشی  
 ۶۰
- شکل ۵-۱۴. ساختار نواری موجبر بلور فوتونی دو بعدی متشکل از استوانه‌های با سطح مقطع بیضی به ازای کشیدگی  $e=2$  برای هردو مد قطبشی  
 ۶۱
- شکل ۵-۱۵. ساختار نواری موجبر بلور فوتونی دو بعدی متشکل از استوانه‌های با سطح مقطع بیضی به ازای کشیدگی  $e=4$  برای هردو مد قطبشی  
 ۶۱
- شکل ۵-۱۶. ساختار نواری موجبر بلور فوتونی دو بعدی متشکل از استوانه‌های با سطح مقطع بیضی به ازای کشیدگی  $e=0.25$  برای هردو مد قطبشی  
 ۶۲
- شکل ۵-۱۷. ساختار نواری موجبر بلور فوتونی دو بعدی متشکل از استوانه‌های با سطح مقطع بیضی به ازای کشیدگی  $e=0.5$  برای هردو مد قطبشی  
 ۶۲
- شکل ۵-۱۸. ساختار نواری موجبر بلور فوتونی دو بعدی متشکل از استوانه‌های با سطح مقطع بیضی به ازای کشیدگی  $e=0.75$  برای هردو مد قطبشی  
 ۶۳
- شکل ۵-۱۹. نقشه نوار گاف بلور فوتونی دو بعدی برای هردو مد قطبشی  
 ۶۴
- شکل ۵-۲۰. ساختار نواری بلور فوتونی دو بعدی برای هردو مد قطبشی  
 ۶۵
- شکل ۵-۲۱. ساختار نواری موجبر بلور فوتونی دو بعدی برای هردو مد قطبشی  
 ۶۵

## فصل اول

### مقدمه‌ای بر بلورهای فوتونی

#### ۱- معرفی بلورهای فوتونی

ساختار بلور فوتونی مشابه با ساختار گاف انرژی در نیمه رساناها است که باعث ساخت وسایل جدیدی برای افزایش سرعت کامپیوترها و ابزارهای اپتیکی شده است. در حقیقت، با اطلاعاتی که از تکنولوژی نیمه رساناها در دست می‌باشد، به نظر می‌رسد که فراهم کردن یک کامپیوتر با سرعت  $10\text{GHz}$  مشکل است، اما می‌توان با انتقال سیگنال‌ها توسط نور به جای الکترون‌ها، کامپیوتری با سرعت در حدود  $100\text{THz}$  فراهم کنیم. بلورهای فوتونی<sup>۱</sup> محیط‌های اپتیکی با تغییر تناوبی از ضریب شکست می‌باشند. این ابزار اپتیکی شرایط را برای انتقال نور فراهم می‌کند و می‌تواند فوتون‌ها را به جای الکترون‌ها در نیمه رساناها هدایت کند. بسته به شکل هندسی ساختار، بلورهای فوتونی می‌توانند به سه گروه تقسیم شوند: ساختارهای یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی. مثال‌هایی از بلورهای فوتونی یک بعدی، دو و سه بعدی در شکل ۱-۱ نشان داده شده است.

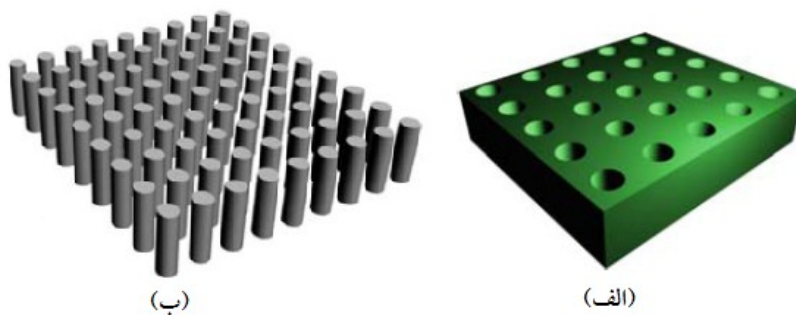


شکل ۱-۱. مثال‌هایی از بلورهای فوتونی (الف) یک بعدی، (ب) دو بعدی، (ج) سه بعدی.

<sup>1</sup>. Photonic Crystal

در بلورهای فوتونی یک بعدی، تغییر دوره‌ای در ضریب شکست فقط در یک بعد رخ می‌دهد، در حالی که در دو بعد دیگر ضریب شکست ساختار یکنواخت است [5-1]. به عنوان مثال از یک چنین بلور فوتونی، می‌توان از توری براگ<sup>۱</sup> نام برد که به طور وسیعی به عنوان پوشش‌های ضد بازتاب<sup>۲</sup> استفاده می‌شوند به طوری که باعث می‌شوند بازتاب از سطح به طور چشمگیری کاهش یابد، همچنین برای بهبود کیفیت لنزها یا عدسی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

بلورهای فوتونی دو بعدی تنوع بیشتری در ساختار دارند، زیرا که تغییر تناوبی در ضریب شکست در دو بعد وجود دارد، درحالی که در سومین جهت ضریب شکست محیط یکنواخت است. مثالی از بلور فوتونی دو بعدی، سیلیکون متخلخل با حفره‌های دوره‌ای آرایش یافته در دو جهت یا محیطی متشکل از میله‌های دی‌الکتریک در هوا است که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است.



شکل ۱-۲. بلور فوتونی دو بعدی (الف) با حفره‌های توخالی در زمینه دی‌الکتریک، (ب) میله‌های دی‌الکتریک در زمینه هوا.

بلورهای فوتونی همچنین می‌توانند در طبیعت یافت شوند. به عنوان مثال بال‌های بعضی پروانه‌ها و حشرات، با ساختارهای میکروسکوپیک متناوب پوشیده شده‌اند، که مانند بلور فوتونی عمل می‌کنند و انعکاس نور از این میکروساختارها باعث می‌شود که تحت زوایای مختلف به رنگ‌های متفاوتی دیده شوند.

1. Bragg Grating  
2. Antireflection



بلورهای فوتونی سه بعدی تغییر دوره‌ای از ضریب شکست را در سه جهت مختصاتی را دارا می‌باشند. در آن‌ها تنوع ساختاری به مراتب بیشتر از بلورهای فوتونی یک و دو بعدی است.

مشهورترین بلور فوتونی سه بعدی سنگ عقیق<sup>۱</sup> است که وقتی می‌چرخد رنگ‌های مختلفی از خود ساطع می‌کند. بدلیل چنین رفتاری مردم باستان باور داشتند که این سنگ انرژی جادویی دارد. اگرچه اکنون می‌دانیم که تمامی این ویژگی‌ها به دلیل میکروساختارهایی از کره‌هاست که در گره‌های یک ساختار مکعبی مرکز سطحی<sup>۲</sup> آرایش یافته‌اند. انعکاس از چنین ساختاری به شدت وابسته به زاویه تابش است، به طوری که وقتی شروع به چرخیدن کند، تابش‌های با طول موج‌های مختلف باز می‌تاباند. شکل ۱-۳ نمونه طبیعی از سنگ عقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۳. نمونه طبیعی از سنگ عقیق

فیزیک بلورهای معمولی و بلورهای فوتونی شباهت‌های زیادی با هم دارند. از این رو امکان مقایسه بعضی خواص و روش‌های به کار برده شده در آن‌ها را فراهم می‌سازد [۹-۶].

---

<sup>۱</sup>. Stone opal

<sup>۲</sup>. Face central cubic

مهمترین شباهت‌های بین فیزیک بلور فوتونی و بلورهای معمولی عبارتند از:

تغییر دوره‌ای از ضریب شکست در بلور فوتونی، شبکه‌ای مشابه با شبکه اتمی حالت جامد را تشکیل می‌دهد. رفتار فوتون‌ها در یک بلور فوتونی مشابه با رفتار الکترون‌ها و حفره‌ها در یک شبکه اتمی است؛ به علت تناوب در ساختار، هر دوی بلورها نوار گاف دارند که ناحیه‌ای از انرژی است که ذره یا فوتون نمی‌تواند در داخل ساختار انتشار یابد [۵-۱].

به همراه این شباهت‌ها، تفاوت‌هایی نیز وجود دارد. اول اینکه در ساختار بلورهای معمولی، الکترون‌ها از توزیع فرمی - دیراک تبعیت می‌کنند در حالی که فوتون‌ها از توزیع بوز - اینشتین پیروی می‌کنند. دوم این که الکترون‌ها توسط پتانسیل ناشی از اتم‌ها تأثیر می‌پذیرند در حالی که فوتون‌ها در بلور فوتونی توسط هیچ پتانسیل درون ساختاری تأثیر نمی‌پذیرد [۷].

مهمترین خاصیتی که اهمیت عملی بلورهای فوتونی را آشکار می‌کند حضور نوار گاف فوتونی<sup>۱</sup> در ساختار نواری بلورهای فوتونی است. نوار گاف فوتونی به همان ناحیه انرژی یا فرکانسی برمی‌گردد که انتشار نور با فرکانس واقع در این ناحیه در بلور فوتونی ممنوع است [۱۲-۱۰]. هنگامی که تابش با فرکانس واقع در نوار گاف به بلور فوتونی تابیده می‌شود، به طور کامل بازتابیده خواهد شد. همچنین با ایجاد نقص در ساختار کاملاً دوره‌ای بلور فوتونی، تأثیر چنین نقصی همانند تأثیر نقص در ساختار بلوری نیمه رساناهاست. با ایجاد نقص ویژه حالت جدیدی در ناحیه نوار گاف با انرژی یا فرکانس متناظر با ویژه حالت نقص در نوار گاف فوتونی ظاهر می‌شود که فقط قابل جایگزینی یا انتشار در نقص خواهد بود [۱۶-۱۳].

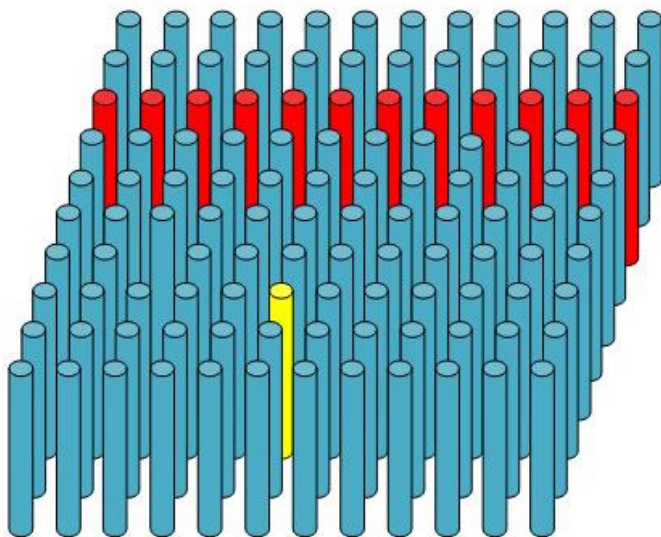
یکی از مهم‌ترین ابزارهای اپتیکی بر پایه بلورهای فوتونی، موجبرهای بلور فوتونی است که با ایجاد یک یا چند ردیف نقص خطی در ساختار دوره‌ای بلور فوتونی کامل ایجاد می‌شود.

موجبر بلور فوتونی را می‌توان با برداشتن یک یا چند ردیف خطی از پایه‌های بلور فوتونی در شبکه بلور فوتونی یا با جایگزین کردن یک یا چند ردیف خطی از پایه‌ها با پایه‌های با ضریب دی‌الکتریک متفاوت ایجاد نمود [۳-۱].

---

<sup>۱</sup> Photonic band gap (PBG)

در شکل ۱-۴ ایجاد یک ردیف نقص خطی با رنگ قرمز و یک نقص نقطه‌ای با رنگ زرد در ساختار بلور فوتونی دو بعدی نشان داده شده است.



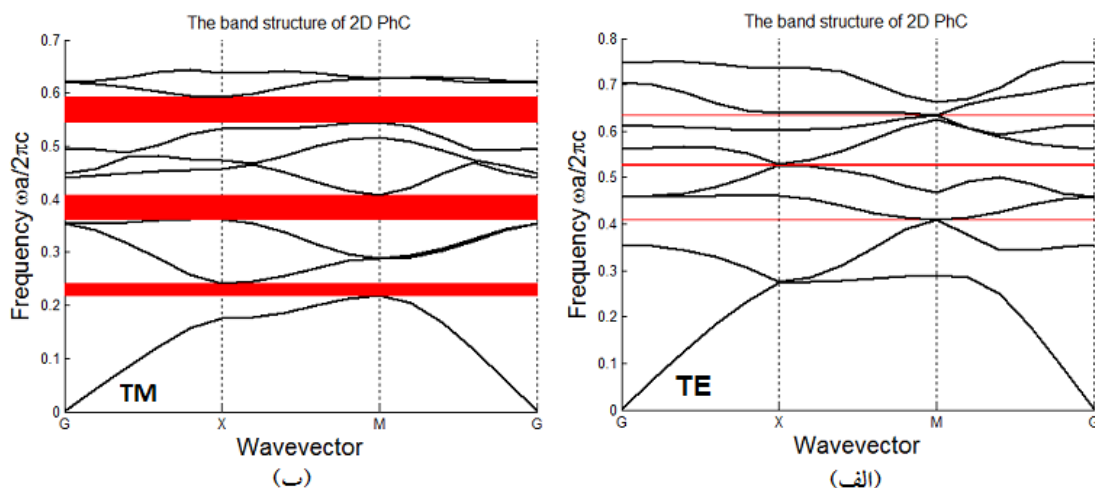
شکل ۱-۴. ایجاد نقص خطی و نقص نقطه‌ای در ساختار بلور فوتونی دو بعدی

یکی از مشخصه‌های قابل توجه در موجبرهای بلور فوتونی این است که ویژه فرکانس‌های واقع در نوار گاف، در مرز بین نقص و محیط در برگرنده نقص بازتابیده شده و در راستای نقص منتشر می‌شوند [۱].

## ۱-۲ اصطلاحات پایه

قبل از بحث در مورد تاریخچه بلور فوتونی بعضی اصطلاحات پایه را تعریف می‌کنیم. ساختار نواری یا نمودار پاشندگی بلور فوتونی، نموداری است که کلی‌ترین اطلاعات درباره خواص بلور فوتونی و ویژه مدهای مجاز و نوارهای گاف بلور فوتونی را نمایش می‌دهد. مستقل از بعد بلور فوتونی، ساختار نواری با یک نمودار دو بعدی نمایش داده می‌شود. مثالی از ساختار نواری برای بلور فوتونی دو بعدی متشکل از استوانه‌های با سطح مقطع دایره‌ای از جنس گالیم آرسناید با ضریب شکست

شکل ۱-۵ نشان داده شده است. قطبشی TE و TM در شکل ۱-۵ نشان داده شده است.  $n = 3.37$  و شعاع بهنجار شده  $r = 0.4a$  با ثابت شبکه  $a = 1\mu\text{m}$  در یک شبکه مربعی برای هر دو مد



شکل ۱-۵. ساختار نواری بلور فوتونی دو بعدی برای مد قطبشی TE (الف) و مد قطبشی TM (ب).

در شکل ۱-۵ محور افقی متناظر با بردار موج تابش و محور عمودی متناظر با فرکانس است. امواج الکترومغناطیسی با فرکانس‌های واقع در ناحیه قرمز رنگ، قابل انتشار در بلور فوتونی نخواهند بود و از سطح بلور بازتابیده خواهند شد. فرکانس‌های واقع در نواحی دیگر که با نوارهای مشکی مشخص شده‌اند قابلیت انتشار در بلور را خواهند داشت [۵].

### ۱-۳ تاریخچه بلور فوتونی

با وجود این که بلورهای فوتونی طی چند دهه اخیر، توجه زیادی به خود جلب کرده‌اند، اولین فرض‌های امکان کنترل انتشار نور با استفاده از ساختارهای متناوبی به سال ۱۸۸۷ برمی‌گردد. تقریباً پس از ۱۰۰ سال در سال ۱۹۷۲ دانشمند اتحادیه جماهیر شوروی، بایکوف<sup>۱</sup> مقاله‌ای مبنی بر امکان استفاده از ساختارهای متناوبی برای کنترل گسیل خودبخود نور منتشر نمود.

<sup>۱</sup> V. P. Bykov