

# الحمد لله الرحمن الرحيم

اللَّهُ نُورُ السَّمَاوَاتِ وَالْأَرْضِ مِثْلُ نُورِهِ كَمِشْكَاةٍ فِيهَا  
مِصْبَاحٌ الْمِصْبَاحُ فِي زُجْجَةٍ الزُّجْجَةُ كَأَنَّهَا كَوْكَبٌ  
دُرِّيٌّ يُوقَدُ مِنْ شَجَرَةٍ مُبَارَكَةٍ زَيْتُونَةٍ لَا شَرْقِيَّةٍ وَلَا غَرْبِيَّةٍ  
يَكَادُ زَيْتُهَا يُضِيءُ وَلَوْ لَمْ تَمْسَسْهُ نَارٌ نُورٌ عَلَى نُورٍ  
يَهْدِي اللَّهُ لِنُورِهِ مَنْ يَشَاءُ وَيَضْرِبُ اللَّهُ الْأَمْثَالَ لِلنَّاسِ  
وَاللَّهُ بِكُلِّ شَيْءٍ عَلِيمٌ (سورة مباركة نور، آیه ۳۵)

۱۰ / ۴ / ۱۳۸۸

۱۱۴۲۳۱



دانشکده فیزیک  
گروه حالت جامد و الکترونیک

پایان نامه

جهت دریافت مدرک کارشناسی ارشد در رشته فیزیک حالت جامد

عنوان

# مطالعه نظری نقص در بلورهای فوتونی دوبعدی

استاد راهنما

دکتر علی سلطانی والا

استاد مشاور

مهندس بهروز رضائی

اطلاعات درج شده در این سند  
توسط سیستم مرکزی

۱۳۸۸ / ۴ / ۱۰

پژوهشگر

امیر ابوالحسنی نیازی

شهریور ماه ۱۳۸۷

۱۱۴۲۳۱

تقدیم به پدر و مادر عزیزتر از جانم که هر چه دارم و حرکاتم

به برکت حضور و وجود آنان بوده و هست.

## پاسکزاری

خداوند بزرگ و مهربانم را بخاطر نعمتهای بی‌منت و آفرینش بی‌همایش شکر و سپاس می‌گویم.

از استاد راهنمای دانا، دلسوز و پرتلاش خود، جناب آقای دکتر علی سلطانی والا، بخاطر راهنمایی‌های علمی و اخلاقی ایشان قدردانی می‌کنم. می‌دانم آنچه را که از ایشان در این دوره علمی آموختم بسیار بارزتر است از آنست که با چنین جملات کوتاهی توصیف کرد و ولی امیدوارم بتوانم دانشی را که از این راه کسب کرده‌ام در راه خدمت به هموطنانم بکار گیرم تا شاید ایشان را از این طریق اندکی خوشحال بنمایم.

از جناب آقای مهندس بهروز رضایی که بعنوان استاد مشاور این پایان‌نامه زحمات قابل‌توجهی را متحمل شدند شکر نموده و برای ایشان آرزوی موفقیت و سربلندی می‌نمایم.

از استاد ارجمند دوره کارشناسی و کارشناسی ارشد خود، جناب آقای دکتر منوچهر کلانی که زحمات و دوری این پایان‌نامه را تقبل فرمودند بسیار سپاسگزارم و همواره به وجود ایشان در شهر و کشور خود افتخار می‌کنم.

از پدر و مادر عزیز و مهربانم که در تمام مراحل زندگی مرا یاری و همراهی کرده‌اند با تمام وجودم شکر و قدردانی می‌کنم و از خداوند بزرگ برای آنان طول عمر با عزت توأم با سلامت و سعادت آرزو مندم.

از سایر اساتید دلسوز و کاکل‌نران پرتلاش دانشکده فیزیک و پژوهشگاه فیزیک کاربردی دانشگاه تبریز نیز شکر می‌کنم.

از تک‌تک دوستان عزیز و همکلاسی‌هایم که دوران خاطره‌انگیزی از زندگی مرا رقم زدند سپاسگزارم و امیدوارم هر جا که هستند و با هر که هستند شاد و سربلند و پرتوان باشند.

امیرابوالحسن نیازی

شهر یونساه ۱۳۸۷

نام خانوادگی: ابوالحسنی نیازی	نام: امیر
استاد راهنما: دکتر علی سلطانی والا	استاد مشاور: مهندس بهروز رضائی
عنوان پایان نامه: مطالعه نظری نقص در بلورهای فوتونی دوبعدی	
مقطع: کارشناسی ارشد رشته: فیزیک	گرایش: حالت جامد و الکترونیک
دانشگاه: تبریز دانشکده: فیزیک	تعداد صفحه: ۱۰۳ تاریخ فارغ التحصیلی: شهریور ۸۷
کلید واژه: بلورهای فوتونی دوبعدی، مدهای نقص، روش بسط موج تخت، روش ابرسلول.	
<p><b>چکیده</b></p> <p>بلورهای فوتونی با توجه به پارامترهای فیزیکی و نوع آرایش شبکه آنها دارای نوارهای ممنوعه فرکانسی هستند که به این نوارها، باند ممنوعه فوتونی گفته می شود. امواج الکترومغناطیسی با فرکانس واقع در این باند ممنوعه نمی توانند داخل بلور فوتونی انتشار پیدا کنند. می توان با ایجاد نقص در یک بلور فوتونی، درون باند ممنوعه فوتونی مدھائی را بوجود آورد که به آنها مدھای نقص گفته می شود. با پیدایش این مدھای مجاز مربوط به نقص، می توان امواج الکترومغناطیسی را در فضا جایگزیده کرد که این عمل میتواند کاربردهای متعددی داشته باشد.</p> <p>نظر به اهمیت وجود نقص در بلورهای فوتونی، در این پایاننامه ضمن بهره گیری از روش بسط موج تخت برای ساختارهای دارای نقص، اقدام به معرفی و پیاده سازی روش ابرسلول مبتنی بر روش بسط موج تخت می نمائیم. نتایج محاسبات مربوط به روش ابرسلول ما را قادر می سازد تا بتوانیم موقعیت مدھای نقص ناشی از وجود انواع نقص های نقطه ای ( از نقطه نظر جنس، اندازه و تعداد ) در یک بلور فوتونی دو بعدی با شبکه مربعی را مطالعه کنیم. در ادامه به منظور مشاهده نحوه توزیع و جایگزیدگی میدان های الکتریکی و مغناطیسی حول موقعیت نقص های ایجاد شده، بطور خاص توزیع فضایی شدت میدان الکتریکی مربوط به هر یک از مدھای نقص حاصل از انواع مختلف نقص های نقطه ای برای قطبش الکتریکی، محاسبه و گزارش شده اند. نتایج محاسبات</p>	

ادامه چکیده - عددی و مقایسه شکل توزیع شدت میدان ها نشان می دهد که تعداد، فرکانس و موقعیت مدهای نقص ایجاد شده در داخل نوار ممنوعه بلور فوتونی، تحت تاثیر مستقیم پارامترهای فیزیکی نقص از قبیل: جنس، اندازه و تعداد آنها می باشد. مطالعه وابستگی موقعیت مدهای نقص به پارامترهای فیزیکی آنها می تواند در جهت کنترل، تنظیم و بهبود عامل کیفیت ابزارها و سیستمهای نوری مبتنی بر بلورهای فوتونی مفید واقع شود و به توسعه بیشتر حوزه های کاربردی اپتیک و فوتونیک بیانجامد. کاربردهای عملی وجود نقص در بلورهای فوتونی بطور وسیع در زمینه موجبرهای فوتونی، فیلترهای بلورفوتونی، سوئیچهای فوتونی بسیار سریع، بازتابنده ها و آشکارسازها و مهمتر از آنها طراحی، تولید و بهبود بازده فیبرهای بلور فوتونی و قطعات الکترواپتیکی است که خود بیانگر ضرورت و اهمیت تحقیق و بررسی در این زمینه می باشد.

## فهرست عناوین

مقدمه..... ۱

### فصل اول: بررسی منابع..... ۴

۱-۱- مقدمه ای بر بلورهای فوتونی..... ۴

۱-۲- نقص در بلورهای فوتونی..... ۱۹

### فصل دوم: مبانی و روشها..... ۲۷

۱-۲- مقدمه..... ۲۷

۲-۲- مقدمه ای بر الکترومغناطیس محیط های ناهمگن..... ۲۸

۳-۲- روشهای عددی..... ۳۰

۴-۲- ساختار یک بعدی متناوب و قضیه بلوخ..... ۳۲

۴-۲-۱- قضیه بلوخ..... ۳۳

۵-۲- تحلیل بلور فوتونی یک بعدی به روش بسط موج تخت..... ۳۵

۵-۲-۱- محاسبه ضریب فوریه عکس تابع دی الکتریک  $\eta(G)$  برای یک بلور فوتونی کامل..... ۴۰

۶-۲- محاسبه مدهای نقص به روش ابرسلول..... ۴۴

۶-۲-۱- روش ابرسلول..... ۴۵

۶-۲-۲- محاسبه مدهای نقص بلور فوتونی یک بعدی..... ۴۵

۷-۲- محاسبه ساختار باند بلور فوتونی دو بعدی..... ۵۰

۷-۲-۱- بلور فوتونی دوبعدی..... ۵۰

۷-۲-۲- محاسبه ضرایب فوریه  $\eta_G$ ..... ۵۳

۸-۲- محاسبه مدهای نقص بلور فوتونی دو بعدی با شبکه مربعی با استفاده از روش ابرسلول..... ۵۶

### فصل سوم: نتایج و بحث..... ۶۰

۱-۳- مقدمه..... ۶۰

- ۲-۳- ساختار متناوب یک بعدی بدون لایه نقص..... ۶۰
- ۱-۲-۳- تابش قائم ( بردار موجی  $\vec{k}$  مولفه موازی ندارد.  $\beta = 0$  )..... ۶۱
- ۲-۲-۳- تابش مایل..... ۶۲
- ۳-۳- ساختار متناوب یک بعدی در حضور لایه نقص..... ۶۴
- ۴-۳- ساختار متناوب دو بعدی بدون سلول(های) نقص..... ۶۷
- ۵-۳- ساختار متناوب دو بعدی در حضور سلول (های) نقص..... ۶۸
- ۱-۵-۳- مقدمه..... ۶۸
- ۲-۵-۳- میله های آلومینا در زمینه هوا - ایجاد نقص توسط تغییر شعاع یک میله..... ۶۹
- ۳-۵-۳- نمودار تغییرات موقعیت مدهای نقص بر حسب شعاع سلول نقص،  $r_D$ ..... ۷۱
- ۴-۵-۳- حفره های هوا در زمینه سیلیکون - ایجاد نقص توسط حذف یک حفره هوا..... ۷۲
- ۵-۵-۳- حفره های هوا در زمینه سیلیکون - ایجاد نقص توسط تغییر جنس حفره هوا..... ۷۵
- ۶-۵-۳- نمودار تغییرات موقعیت مدهای نقص بر حسب ثابت دی الکتریک نقص،  $\epsilon_D$ ..... ۷۶
- ۷-۵-۳- حفره های هوا در زمینه سیلیکون - ایجاد نقص توسط حذف سه حفره هوا  
(نقص L3)..... ۷۸
- ۶-۳- توزیع فضائی شدت میدان الکتریکی متناظر با مدهای نقص بلور فوتونی..... ۸۰
- ۱-۶-۳- توزیع فضائی شدت میدان الکتریکی حول موقعیت نقص ایجاد شده ناشی از تغییرات شعاع یکی از میله های آلومینا واقع در زمینه هوا..... ۸۱
- ۲-۶-۳- توزیع فضائی شدت میدان الکتریکی حول موقعیت نقص ایجاد شده بدلیل حذف یک حفره هوا (نقص نقطه ای)..... ۸۵
- ۳-۶-۳- توزیع فضائی شدت میدان الکتریکی حول موقعیت نقص ایجاد شده بدلیل حذف سه حفره هوا (نقص L3)..... ۸۸
- پیوست الف..... ۹۲
- منابع و مراجع..... ۱۰۱



## فهرست شکل ها

### فصل اول: بررسی منابع

- شکل (۱-۱): بلور فوتونی یک بعدی و پاسخ آن به دو طول موج متفاوت..... ۴
- شکل (۲-۱): نمایش دو هندسه پایه بلور فوتونی دوبعدی. راست: شبکه مربعی. چپ: شبکه مثلثی..... ۵
- شکل (۳-۱): نمایش تقارن دورانی و سلول واحد در بلورهای فوتونی دو بعدی..... ۶
- شکل (۴-۱): بلورهای فوتونی گرافیت (شکل راست) و فیبر براگ (شکل چپ)..... ۷
- شکل (۵-۱): تصاویری از بلورهای فوتونی مثلثی (چپ) و گرافیت (راست)..... ۸
- شکل (۶-۱): تصاویر مربوط به تیغه بلور فوتونی دوبعدی مثلثی با سوراخ های مثلثی..... ۸
- شکل (۷-۱): بلور فوتونی گرافیت با تیغه اتصال میان استوانه ها..... ۸
- شکل (۸-۱): ساختار هندسی شبه بلور با تقارن دورانی پنج گون..... ۱۰
- شکل (۹-۱): شبه بلور فوتونی با تقارن دورانی دوازده گون..... ۱۰
- شکل (۱۰-۱): تصویری از بلور فوتونی یابلونوویت..... ۱۲
- شکل (۱۱-۱): نمایی از ساختار افزاه چوبی در طیف ریز موج..... ۱۳
- شکل (۱۲-۱): ساختار ماریچ درهم بافته..... ۱۳
- شکل (۱۳-۱): تصویر میکروسکوپ الکترونی از ساختار واقعی ماریچ درهم بافته در طیف فرسرخ..... ۱۴
- شکل (۱۴-۱): دو نوع فیبر بلور فوتونی..... ۱۶
- شکل (۱۵-۱): نمودار دامنه میدان مغناطیسی عرضی مود پایه در سطح مقطع یک فیبر نوری بلور فوتونی..... ۱۶
- شکل (۱۶-۱): استفاده از ابرمنشور در تفکیک کانال های چگال مخابرات نوری..... ۱۷
- شکل (۱۷-۱): شکست منفی و بازسازی کامل تصویر منبع نقطه ای نور توسط بلور فوتونی..... ۱۸
- شکل (۱۸-۱): عبور از مرز پراش کلاسیک. راست: تصویر میکروسکوپ الکترونی. چپ: تصویر نور مرئی با کمک بلور فوتونی..... ۱۹
- شکل (۱۹-۱): طرح شماتیک حالت های ممکن ایجاد نقص نقطه ای، خطی و سطحی در یک بلور فوتونی دو بعدی..... ۲۰
- شکل (۲۰-۱): کاواک بلور فوتونی با ضریب کیفیت بسیار بالا و حجم مود کوچک..... ۲۱
- شکل (۲۱-۱): دیود نوری *GaN* با بهره گیری از بلور فوتونی..... ۲۳

- شکل (۱-۲۲): دیود نوری نانوذرات سیلیکون با آینه بازیافت بلور فوتونی..... ۲۳
- شکل (۱-۲۳): آرایه کاواک های مزدوج بلور فوتونی. راست: ساختار دوبعدی آرایه در بلور فوتونی مربعی. وسط: شبیه سازی دامنه میدان الکتریکی لیزر. چپ: طیف تشعشع لیزر بدست آمده در  $1354/2$  نانومتر..... ۲۳
- شکل (۱-۲۴): نمایش توزیع میدانهای فوتون ها و فونون های کاواک بدست آمده در بلور فوتونی دوبعدی..... ۲۴
- شکل (۱-۲۵): تعداد مقالات منتشر شده سالانه در ارتباط با بلورهای فوتونی..... ۲۵

## فصل دوم: مبانی و روشها

- شکل (۲-۱): دو گروه اصلی در روشهای عددی..... ۳۰
- شکل (۲-۲): روشهای عددی حوزه زمان..... ۳۱
- شکل (۲-۳): روشهای عددی در حوزه بسامد..... ۳۱
- شکل (۲-۴): نمایش ساختار لایه ای متناوب در یک بعد..... ۳۲
- شکل (۲-۵): طرح شماتیک یک بلور فوتونی یک بعدی کامل. تابع دی الکتریک این بلور فوتونی در جهت  $Z$  متناوب است..... ۳۵
- شکل (۲-۶): سلول واحد یک بلور فوتونی یک بعدی..... ۴۲
- شکل (۲-۷): طرح شماتیک یک ابرسلول یک بعدی شامل یک لایه نقص و چهار لایه کامل..... ۴۶
- شکل (۲-۸): (a) بردارهای اصلی و برخی نقاط شبکه وارون برای یک شبکه مربعی دو- بعدی را نشان می دهد..... ۵۱
- شکل (۲-۹): سلول واحد یک بلور فوتونی دوبعدی شامل میله هایی با سطح مقطع دایروی..... ۵۳
- شکل (۲-۱۰): نمایش شماتیک یک ابرساختاری که شامل ابرسلول هایی با ابعاد معادل  $9 \times 9$  سلول کامل است (ناحیه های درون خط چین).  $L = na$  ثابت شبکه ابرساختار می باشد..... ۵۷

## فصل سوم: نتایج و بحث

- شکل (۳-۱): بلور فوتونی یک بعدی. تابع دی الکتریک فقط در جهت محور  $Z$  متناوب است..... ۶۱
- شکل (۳-۲): ساختار باندهای بلور فوتونی یک بعدی. نواحی هاشور خورده باندهای ممنوعه فوتونی را نشان می دهد..... ۶۱

شکل (۳-۳): نمودار تغییرات ساختار باند فرکانس بر حسب مولفه موازی بردار موج، مربوط به قطبش نوع H..... ۶۲

شکل (۴-۳): نمودار تغییرات ساختار باند فرکانس، مربوط به قطبش نوع E، بر حسب مولفه موازی بردار موج..... ۶۳

شکل (۵-۳): نمایش شماتیک یک ابرساختار یک بعدی. ناحیه نقطه چین محدوده یک ابرسلول را نشان میدهد که شامل لایه نقص  $L_D$  و ۴ سلول کامل دیگر است. مبداء مختصات در مرکز لایه نقص واقع است..... ۶۴

شکل (۶-۳): پاشندگی مدهای نقص قطبش H مربوط به پیکربندی شکل (۵-۳). نواحی پررنگ و سفید بترتیب نوار فرکانسی مجاز و ممنوعه را نشان می دهند..... ۶۵

شکل (۷-۳): پاشندگی مدهای نقص قطبش E مربوط به پیکربندی شکل (۵-۳). نواحی پررنگ و سفید بترتیب نوار فرکانسی مجاز و ممنوعه را نشان می دهند..... ۶۶

شکل (۸-۳): ساختار شماتیک یک بلور فوتونی دو بعدی با شبکه مربعی با ثابت شبکه  $a$ ..... ۶۷

شکل (۹-۳): ساختار باند فوتونی مربوط به آرایه ای مربعی از میله های دی الکتریک آلومینا به شعاع  $r$  در زمینه هوا..... ۶۸

شکل (۱۰-۳): پاشندگی مدنقص مربوط به میله های آلومینا قرار گرفته در زمینه هوا..... ۷۰

شکل (۱۱-۳): نمودار تغییرات مدهای نقص نسبت افزایش شعاع میله نقص. شعاع  $r_D = 0.2a$  متناظر با بلور فوتونی بدون نقص است..... ۷۱

شکل (۱۲-۳): ابرسلول به ابعاد  $9 \times 9$  شامل حفره های هوا در زمینه سیلیکون. ایجاد نقص با حذف یک حفره هوا..... ۷۳

شکل (۱۳-۳): مدهای نقص ایجاد شده ناشی از حذف یک حفره هوا. تعداد دو مد نقص در محدوده باند ممنوعه فوتونی ایجاد شده است..... ۷۴

شکل (۱۴-۳): نقص ناشی از تغییر جنس یکی از حفره های هوا ایجاد شده در داخل باند ممنوعه فوتونی..... ۷۵

شکل (۱۵-۳): نمودار چگونگی تغییرات مدهای نقص بر حسب تغییر جنس سلول نقص..... ۷۷

شکل (۱۶-۳): نمایش ابر سلول به  $11 \times 11$  که در آن نقص (L3) ایجاد شده است..... ۷۸

- شکل (۳-۱۷): موقعیت مدهای نقص (L3). پیکربندی ابرسلول در گوشه بالا-چپ نشان داده شده است. فرکانس مدهای نقص در سمت راست شکل نوشته شده است. ۷۹.....
- شکل (۳-۱۸): توزیع فضایی شدت میدان الکتریکی،  $|E^2|$ ، مربوط تغییر شعاع یک میله آلومینا. ۸۲.....
- شکل (۳-۱۹): توزیع فضایی شدت میدان الکتریکی،  $|E^2|$ ، مربوط تغییر شعاع یک میله آلومینا. ۸۲.....
- شکل (۳-۲۰) - (f): توزیع فضایی شدت میدان الکتریکی متناظر با مد شش قطبی. (g): توزیع متناظر با مد دوقطبی-۲. ۸۲.....
- شکل (۳-۲۱): نمایش سه بعدی نحوه توزیع شدت میدان الکتریکی مربوط به مد نقص تک قطبی (مد a)، بازای شعاع نقص  $r_a=0$ . ۸۳.....
- شکل (۳-۲۲): نمایش سه بعدی نحوه توزیع شدت میدان الکتریکی مربوط به مد نقص چهار قطبی XY- (مد c)، بازای شعاع نقص  $r_a=0.55 a$ . ۸۳.....
- شکل (۳-۲۳): نمایش سه بعدی نحوه توزیع شدت میدان الکتریکی مربوط به مد نقص شش قطبی (مد f)، بازای شعاع نقص  $r_a=0.7 a$ . ۸۴.....
- شکل (۳-۲۴): نمایش سه بعدی نحوه توزیع شدت میدان الکتریکی مربوط به (b): مد نقص دو قطبی، بازای شعاع نقص  $r_a=0.34 a$  و (g): مد نقص دو قطبی-۲، بازای شعاع نقص  $r_a=0.7 a$ . ۸۵.....
- شکل (۳-۲۵): توزیع فضایی شدت میدان الکتریکی،  $|E^2|$ ، مربوط به حذف یک حفره هوا. (a) و (b): مد تبهگن با فرکانس  $0.2748 (2\pi c/a)$  را نشان می دهند. محورهای X و Y فاصله را برحسب ثابت شبکه a نشان می دهند. ۸۶.....
- شکل (۳-۲۶): توزیع فضایی شدت میدان الکتریکی،  $|E^2|$ ، مربوط به حذف یک حفره هوا. مد غیرتبهگن با فرکانس  $0.2814 (2\pi c/a)$  محورهای X و Y فاصله را برحسب ثابت شبکه a نشان می دهند. ۸۷.....
- شکل (۳-۲۷): نمایش سه بعدی نحوه توزیع شدت میدان الکتریکی  $|E^2|$ ، حول ناحیه نقص برای مد نقص  $0.2814 (2\pi c/a)$ . ۸۸.....
- شکل (۳-۲۸): توزیع فضایی شدت میدان الکتریکی،  $|E^2|$ ، مربوط به نقص سه تایی (L3). الگوهای نمایش داده شده مربوط به شش مد نقص می باشند. محورهای X و Y فاصله را برحسب ثابت شبکه a نشان می دهند. ۸۹.....
- شکل (۳-۲۹): نمایش سه بعدی نحوه توزیع شدت میدان الکتریکی  $|E^2|$ ، حول ناحیه نقص. (b): مد نقص با فرکانس  $0.2609 (2\pi c/a)$ . (f) مد نقص با فرکانس  $0.2927 (2\pi c/a)$ . ۹۰.....

## مقدمه

چه نوع موادی می توانند کنترل کامل انتشار نور را برای ما فراهم سازند؟ برای پاسخ به این پرسش، به مانسته الکترونیکی این سوال باز میگردیم. مواد یا بلورهای الکترونیکی که وظیفه کنترل و هدایت رفتار الکترون را بر عهده دارند در نقطه مقابل و مشابه موادی هستند که انتظار داریم عمل کنترل انتشار امواج نوری را انجام دهند. بلور، آرایش متناوب از اتمها و مولکولها است. یعنی یک شبکه بلوری، وقتی به وجود می آید که بلوکهای ساختمانی پایه و کوچکی از اتمها یا مولکولها در فضا تکرار شده باشند. بلور پتانسیل متناوبی برای الکترونی که در میان آن منتشر می شود فراهم می کند و هندسه بلور بسیاری از خواص ساختاری بلور را مشخص می کند. وجود انرژی پتانسیل متناوب درون شبکه بلور، گافهایی را در داخل ساختار باند انرژی بلور بوجود می آورد به طوری که (به خاطر تشابه پراش براگ از اتمها) انتشار الکترونها درون بلور و با انرژیهای خاص در راستاهای خاص ممنوع می شود. اگر پتانسیل شبکه به اندازه کافی قوی باشد، ممکن است که گاف برای تمام راستاهای ممکن ظاهر شود. برای مثال نیمرسانا دارای یک گاف باند کامل بین نوارهای ظرفیت و رسانش می باشد.

مشابه نوری موادی که در بالا به آن اشاره شد، بلورهای فوتونی نام دارد. که در آن، پتانسیل پریودیک به خاطر وجود یک شبکه ماکروسکوپی از مواد دیالکتریک بوجود آمده است. اگر ثابتهای دیالکتریک مواد در بلور به اندازه کافی متفاوت باشند و جذب نور توسط ماده حداقل مقدار را داشته باشد، آن گاه پراکندگی در سطح مشترک می تواند بسیاری از پدیدههایی را که پتانسیل اتمی برای الکترونها به وجود می آورد، به طور مشابه برای فوتونها (مدهای نور) ایجاد نماید. یک پاسخ برای مسئله کنترل نور و دستکاری

آن و عبارات دیگر تنظیم نحوه انتشار آن، استفاده از بلور فوتونی می‌باشد، یعنی یک محیط دی‌الکتریک متناوب با اتلاف پایین. بلورهای فوتونی معمولاً به عنوان مشابه نوری نیمرساناها در نظر گرفته می‌شوند و خواص نوری را مشابه با یک شبکه اتمی میکروسکوپی که گاف باند نیمرسانا را برای الکترون تولید می‌کند، تغییر می‌دهند.

بلورهای فوتونی موادی هستند که ضریب شکست آنها به صورت دوره‌ای با یک مقیاس طولی در حدود طول موج نور عمل‌کننده تغییر می‌کند. کلمه بلور از آنجا بکار می‌رود که این مواد از تکرار یک سری واحدهای ساختاری مصنوعی مشابه تشکیل می‌شوند و کلمه فوتونی به این دلیل اضافه شده است که این بلورها برای تاثیر گذاشتن بر خواص انتشار فوتون‌ها ساخته شده‌اند.

به طور کلی می‌دانیم یک موج هنگامی تحت تاثیر قرار خواهد گرفت که وارد محیطی شود که بعضی مشخصه‌های درون این محیط که به این موج مربوط می‌شود مدوله شده باشند. در مورد موج نوری یا فوتون‌ها این مشخصه ضریب شکست است. برای سیستم‌های دیگر که به صورت موج منتشر می‌شوند مانند صوت یا الکترون‌های درون یک نیمرسانا، این مشخصه‌ها مدول یانگ برای صوت و پتانسیل الکتریکی برای الکترون‌ها می‌باشد.

رفتار یک فوتون با فرکانس خاص وابسته به جهت انتشار فوتون درون بلور فوتونی است. مدولاسیون ضریب شکست باعث خواهد شد که بعضی انرژی‌ها و جهت‌ها برای فوتون‌ها در داخل بلور ممنوع شوند. یعنی مشابه با مورد نیمرساناها در بلورهای فوتونی، ساختار باند فوتونی داشته باشیم. اگر برای برخی گستره‌های فرکانسی، بلور فوتونی نور را با هر قطبش و هر زاویه‌ای که می‌تابد بازتاب کند، گفته می‌شود که بلور یک گاف باند فوتونی کامل دارد. در یک چنین بلوری، اگر مدهای نوری دارای فرکانس‌هایی داخل

گستره فرکانسی معرفی شده باشند، نمی‌توانند منتشر شوند. برای خلق یک ماده‌ای باگاف باند فوتونی کامل باید مواد دی‌الکتریک را با ثابت‌های دی‌الکتریک متفاوت در یک شبکه‌ای که در طول سه محورش متناوب باشد بچینیم.

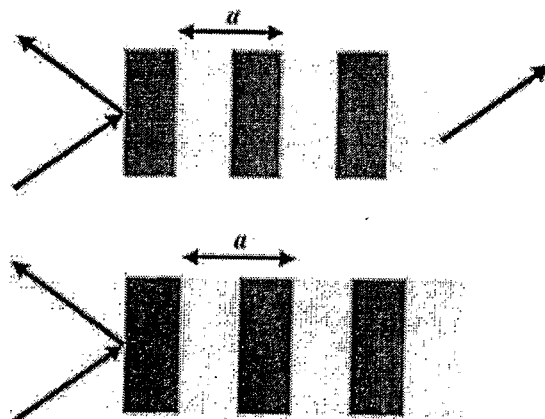
بلورهای فوتونی، از نقطه نظر ساخت، توسط ساختارهای مصنوعی با آرایه متناوب یک، دو و سه بعدی از مواد دی‌الکتریک در حد نانومتر ساخته می‌شوند. مشخصه عمده بلورهای فوتونی باند ممنوعه آنهاست، که یک محدوده فرکانسی را ارائه می‌دهد که انتشار امواج الکترومغناطیسی در آن محدوده ممنوع می‌گردد. در بلورهای فوتونی نیز همانند بلورهای نیمرسانا می‌توان با ایجاد نقص به شکل نقطه‌ای یا خطی، حالت‌هایی با فرکانس واقع در منطقه ممنوعه فرکانسی ایجاد کرد که به آنها مد نقص گفته می‌شود. امواج الکترومغناطیسی هم فرکانس با مد نقص حول موقعیت نقص جایگزیده بوده و بدلیل ویژگی نوار ممنوعه، در بلور فوتونی میرا می‌شوند. در این ساختارها، فرکانس مدهای نقص را می‌توان با تغییر دادن اندازه، جنس، شکل و تعداد سلول‌های نقص تغییر داد. مطالعه وابستگی موقعیت مدهای نقص و همچنین چگونگی توزیع میدان‌های الکترومغناطیسی به پارامترهای فیزیکی نقص، در طراحی مشددهای حفره‌ای با بهره بالا و موجبرهای نوری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اخیراً نانومشدهای بلور فوتونی از نوع  $L3$  بدلیل دارا بودن عامل کیفیت بسیار بزرگ، از نظر تجربی مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

در این پایاننامه، مدهای نقص مربوط به بلورهای فوتونی دو بعدی با شبکه مربعی برای انواع مختلف نقص‌ها مطالعه و بررسی می‌شوند همچنین چگونگی توزیع شدت میدان الکتریکی در ناحیه نقص برای حالت‌های مختلف محاسبه و نتایج مربوط گزارش می‌شود.

# فصل اول

## ۱-۱- مقدمه ای بر بلورهای فوتونی

بلور فوتونی را به طور ساده می توان یک محیط با خواص اپتیکی متناوب تعریف کرد. برای مثال یک محیط اپتیکی متناوب در شکل (۱) نشان داده شده است که قسمتهای تیره دارای گذردهی الکتریکی  $\epsilon$  و مغناطیسی  $\mu$  همگن و متفاوت نسبت به قسمتهای روشن هستند. این سیستم را می توان به عنوان یک بلور ساده ی یک بعدی در نظر گرفت. بلور فوتونی بسیار پاشنده است و میزان گذردهی و انعکاس آن به شدت وابسته به طول موج می باشد. این ویژگی در شکل زیر برای یک بلور فوتونی که ضریب گذردهی آن برای نور آبی بزرگتر از صفر و برای نور قرمز تقریباً صفر می باشد نمایش داده شده است.



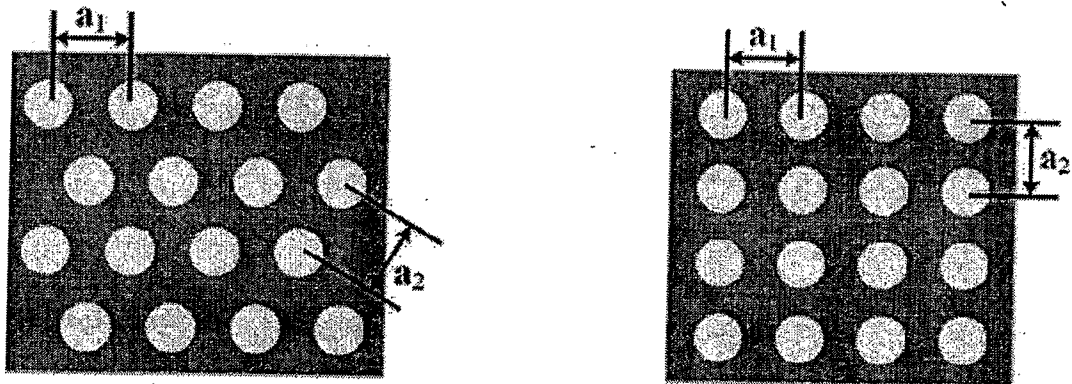
شکل (۱-۱): بلور فوتونی یک بعدی و پاسخ آن به دو طول موج متفاوت [۲۰۱]

در شکل فوق  $a$  ثابت شبکه و یا دوره ی تناوب نامیده می شود و نمایانگر حداقل طول فضایی است که ساختار شبکه در آن تکرار می گردد. به بیان دیگر  $\epsilon(x) = \epsilon(x + a)$  که در آن  $\epsilon(x)$  تابع مکانی گذردهی الکتریکی است. می توان نشان داد که که مهمترین اثر ناشی از تناوب وجود محدوده هایی پیوسته



و کران دار در حوزه بسامد است که در آنها امکان انتشار موج در ساختار وجود ندارد. به این نواحی گاف فوتونی یا نوار ممنوع بسامد گفته می شود. بین هر دو گاف فوتونی متوالی یک نوار مجاز بسامد قرار دارد (و بر عکس) که انتشار موج در آن تحت شرایطی امکان پذیر است. اگر یک گاف فوتونی با بازه بسامد  $[f_1, f_2]$  مشخص شود که در آن  $f_1 < f_2$  ، آنگاه  $f_c \triangleq (f_1 + f_2)/2$  بسامد مرکزی گاف و  $\Delta f_c \triangleq f_2 - f_1$  پهنای گاف نامیده می شوند. معمولاً در طراحی هندسه های گوناگون بلورهای فوتونی علاقه مندیم ساختارهایی با عریض ترین پهنای گاف را که بصورت  $m \triangleq \Delta f_c / f_c$  تعریف میشود به دست آوریم.

در دو بعد یک بلور فوتونی را می توان مانند یک آرایه متناوب از دو دی الکتریک فرض نمود. ساده ترین هندسه ها با این احتساب در دو بعد همانند گروه های بلوری براوایس در فیزیک حالت جامد به پنج خانواده اصلی قابل تقسیم خواهند بود. اما به دلایل گوناگون که برخی از آنها در طول این نوشتار خواهد آمد تنها دو گروه بلوری در دو بعد از اهمیت برخوردارند که در شکل (۲-۱) نمایش داده شده اند.



شکل (۲-۱): نمایش دو هندسه پایه بلور فوتونی دوبعدی. راست: شبکه مربعی. چپ: شبکه مثلثی. [۲۱]

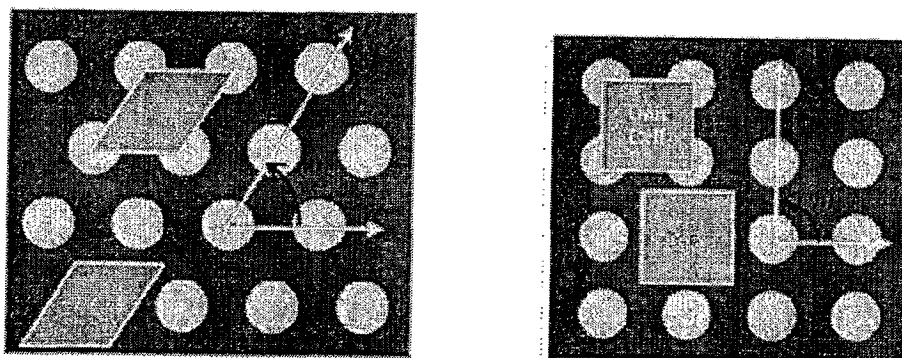
در اینجا  $a_1$  و  $a_2$  بردارهای پایه شبکه نامیده می شوند. در ساختارهای بیش از یک بعد تناوب مکانی به ابعاد فضایی تقارن انتقالی باز می گردد که در این جا به صورت  $\varepsilon(\mathbf{r}) = \varepsilon(x, y) = \varepsilon(\mathbf{r} + \mathbf{a}_i)$

نمایش داده می شود و در دو بعد (سه بعد)  $i = 1, 2, 3$  می باشد. بدیهی است حاصل ضرب خارجی بردارهای شبکه در دو بعد (سه بعد) به فرم  $|a_1 \times a_2|$  یا  $|a_1 \times a_2 \cdot a_3|$  باید غیر صفر باشد. برای هر دو ساختار دو بعدی مربعی و مثلثی بردارهای پایه از نظر طول با یکدیگر یکسانند یعنی:

$$a_1 \triangleq |a_1| = |a_2| \triangleq a_2 = a .$$

از طرف دیگر برای ساختار مربعی  $\angle(a_1, a_2) = \pi/2$  در حالی که برای ساختار مثلثی  $\angle(a_1, a_2) = \pi/3$  می باشند.

به سادگی دیده می شود که علاوه بر تقارن انتقالی که همان ویژگی تناوب مکانی است گونه دیگری از تقارن در اثر دوران حول مبدا وجود دارد که بلور فوتونی را بدون تغییر باقی می گذارد. به بیان دیگر بلور فوتونی نسبت به آن تبدیل ناوردا است. در ساختار مربعی (مثلثی) این زاویه برابر  $90^\circ$  ( $60^\circ$ ) است که موجب تقارن دورانی چهارگون (شش گون) می گردد و در اشکال زیر نمایش داده شده است.

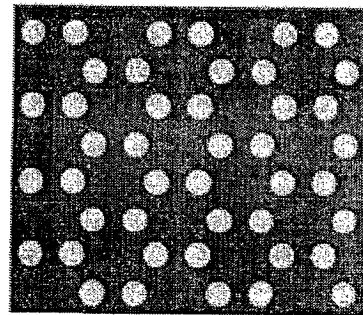
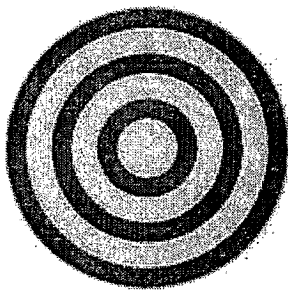


شکل (۱-۳): نمایش تقارن دورانی و سلول واحد در بلورهای فوتونی دو بعدی [۲۱]

همان طور که در شکل فوق با نواحی صورتی رنگ مشخص شده است سلول واحد در دو بعد (سه بعد) سطح (حجم) متشکل از دو (سه) بردار پایه است و در واقع از نظر سطح (حجم) کوچک ترین جزیی

است که با انتقال و تکرار آن بتوان کل بلور فوتونی را بازسازی نمود. گرچه این انتخاب منحصر به فرد نیست ولی معمولاً ساده ترین انتخاب برای بلور فوتونی مربعی و مثلثی به ترتیب مربع و لوزی با اضلاع برابر با ثابت شبکه  $a$  می باشند.

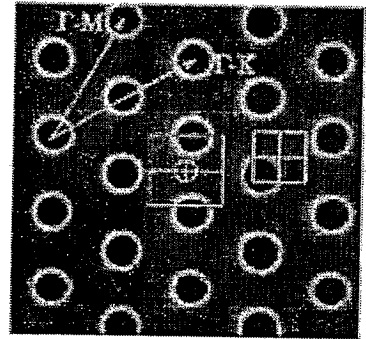
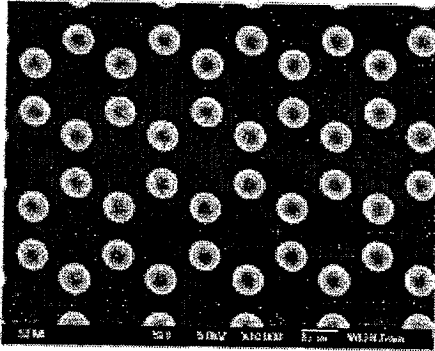
شبکه مشهور دو بعدی دیگری که در واقع از خانواده بلور فوتونی مثلثی شمرده می شود شبکه گرافیت یا لانه زنبوری است که در شکل بعد نمایش داده شده است و دارای تقارن دورانی شش گون می باشد. همچنین فیبر براگ در شکل زیر را می توان حالت خاصی از بلور فوتونی دو بعدی در دستگاه مختصات استوانه ای فرض نمود.



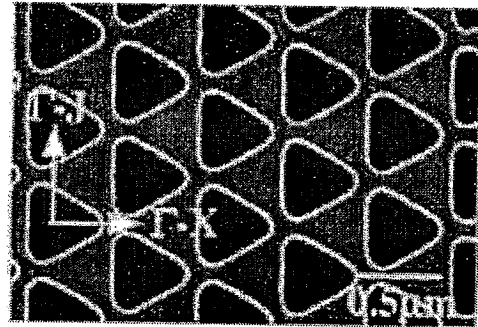
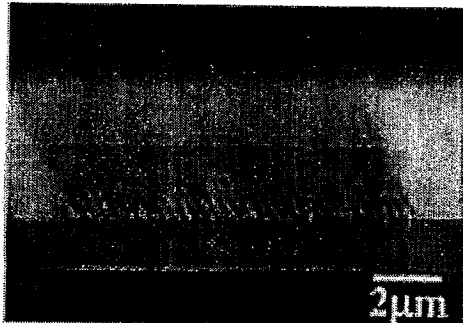
شکل (۱-۴): بلورهای فوتونی گرافیت (شکل راست) و فیبر براگ (شکل چپ) [۱ و ۲]

در عمل ساخت بلورهای فوتونی شامل مراحل و فرآیندهای متعدد و پیچیده ای است که ذکر آنها را به بخش انتهایی موقوف می کنیم. ولی در عمل ساختار بلور فوتونی بسیار مانند آن چه است که در اشکال فوق آورده شده است. در شکل (۱-۵) تصاویری از ساختارهای واقعی دو بعدی مثلثی و گرافیت نمایش داده شده که با میکروسکوپ الکترونی گرفته شده است. البته مادامی که ویژگی های تقارن دو یا چند ساختار بلور فوتونی یکسان می باشد امکان پذیر است که آنها را هنوز از یک خانواده محسوب کنیم، حتی اگر فرضاً برای مثال شکل سوراخها (یا استوانه ها) گرد نباشد. این حالت برای دو بلور فوتونی از گونه مثلثی با سوراخهای مثلثی در شکل (۱-۶) [۵] و گرافیت با اتصالات پل مانند میان استوانه ها در شکل (۱-۱)

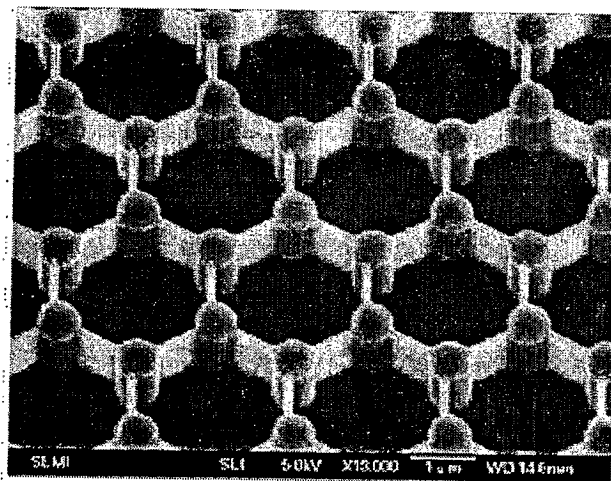
(۷) [۴] نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که ساختارهای دو بعدی در واقع در امتداد محور عمود بر صفحه دارای ضخامت محدود (ساختار تیغه ای) و معولا در حد ۲۰۰ تا ۵۰۰ نانومتر می باشند.



شکل (۱-۵): تصاویری از بلورهای فوتونی مثلثی (چپ) [۳] و گرافیت (راست) [۴].



شکل (۱-۶): تصاویر مربوط به تیغه بلور فوتونی دوبعدی مثلثی با سوراخ های مثلثی [۵].



شکل (۱-۷): بلور فوتونی گرافیت با تیغه اتصال میان استوانه ها [۴].