



دانشگاه پیام نور

دانشکده علوم پایه

پایان نامه

برای دریافت مدرک کارشناسی ارشد

رشته فیزیک اتمی و مولکولی

گروه علمی فیزیک

عنوان پایان نامه :

مطالعه بلورهای فوتونی دو بعدی متشکل از دو نانو استوانه‌ی

دی‌الکتریک – فلز

زهرا روزی طلب

استاد راهنما:

دکتر عبدالرسول قرائتی جهرمی

تیرماه ۱۳۹۱

# بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

اللَّهُ نُورُ السَّمَاوَاتِ وَالْأَرْضِ مِثْلُ نُورِهِ كَمِشْكَاةٍ فِيهَا  
مِصْبَاحٌ الْمِصْبَاحُ فِي زُجَاجَةٍ الزُّجَاجَةُ 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 (سوره مبارکه نور، آیه ۳۵)



دانشگاه پیام نور

دانشکده علوم پایه

مرکز شیراز

پایان نامه

برای دریافت مدرک کارشناسی ارشد

رشته فیزیک اتمی و مولکولی

گروه علمی فیزیک

عنوان پایان نامه :

**مطالعه بلورهای فوتونی دو بعدی متشکل از دو نانو استوانه‌ای**

**دی‌الکتریک – فلز**

زهرا روزی طلب

استاد راهنما:

دکتر عبدالرسول قرائتی جهرمی

تیرماه ۱۳۹۱

تاریخ : ۹۱/۰۴/۲۲

شماره : ۰۵۱۱۶۲۷۵۰

پیوست :



دانشگاه پیام نور استان فارس  
باسم 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 خانم زهرا روزیطلب دانشجوی رشته فیزیک گرایش اتمی و مولکولی به شماره دانشجویی ۸۸۰۰۰۳۶۵۹ با عنوان:

" مطالعه بلورهای فوتونی دوبعدی متشکل از دو نانو استوانه‌ی دی الکترونیک-فلز "

با حضور هیات داوران در روز پنج‌شنبه مورخ ۱۳۹۱/۴/۲۲ ساعت ۹ در محل ساختمان غدیر دانشگاه پیام نور شیراز برگزار شد و هیأت داوران پس از بررسی، پایان‌نامه مذکور را شایسته نمره به عدد ۱۴/۵ به حروف ... با درجه ... تشخیص داد.

ردیف	نام و نام خانوادگی	هیأت داوران	مرتبه دانشگاهی	دانشگاه	امضاء
۱	دکتر عبدالرسول قرائتی جهرمی	راهنما	دانشیار	پیام نور شیراز	
۲	دکتر محمود حسینی فرزاد	داور	استادیار	شیراز	
۳	امیر اکبری	نماینده تحصیلات تکمیلی	مربی	پیام نور شیراز	

رئیس اداره تحصیلات تکمیلی

شیراز- شهرک گلستان، بلوار دهخدا  
قبل از نمایندگان بین المللی  
تلفن : ۰۷۱۱-۶۲۲۲۴۰-۳  
دورنگار : ۰۷۱۱-۶۲۲۲۴۹  
صندوق پستی : ۱۳۶۸- ۷۱۹۵۵  
www.spnu.ac.ir  
Email : admin@spnu.ac.ir

اینجانب زهرا روزیطلب دانشجوی ورودی سال ۱۳۸۸ مقطع کارشناسی ارشد رشته فیزیک گرایش اتمی و مولکولی 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 می‌دانم 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 زهرا روزیطلب

تاریخ و امضاء

اینجانب زهرا روزیطلب دانشجوی ورودی سال ۱۳۸۸ مقطع کارشناسی ارشد رشته فیزیک گرایش اتمی و مولکولی 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 ... به صورت مشترک و با ذکر نام استاد راهنما مبادرت نمایم.



نام و نام خانوادگی دانشجو زهرا روزیطلب

تاریخ و امضاء

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

تیر ماه ۱۳۹۱

تقدیم به

-----

پدر و مادرم که اولین آموزگاران من بودند،

مادر مهربانم و پدر بزرگووارم: که حامی زندگیم هستند،

آنان که وجودم برایشان همه رنج بود و وجودشان برایم همه مهر، توانشان رفت تا رویم سپید بماند،

آنان که راستی قامتم در شکستگی قامتشان تجلی یافت،

در برابر وجود گرامیشان زانوی ادب بر زمین می‌نهم و با دلی مالا مال از عشق و محبت بر دستشان  
بوسه می‌زنم،

حال این برگ سبزی است تحفه درویش تقدیم آنان.

تشکر و قدردانی

منت خدای را که توفیق اتمام این پایان نامه به من ارزانی داشت. سپاس می‌نهم زحمات بی دریغ  
استاد ارجمند، جناب آقای دکتر عبدالرسول قرائتی که راهنمایی‌های ارزشمند ایشان امر تحقیق را بر  
من آسان نمود و تمام استادان گران قدری که در محضرشان شاگردی نمودم.

## چکیده

در این پایان نامه بلور فوتونی دو بعدی متشکل از دو نانو استوانه هم مرکز دی الکتریک-فلز را در شبکه مربعی با استفاده از روش بسط موج تخت اصلاح یافته شبیه سازی و مورد مطالعه قرار داده ایم. چهار ساختار در نظر گرفته شده، اولین ساختار، بلور فوتونی دو بعدی متشکل از نانو میله های دی الکتریک با پوسته ای از جنس فلز نقره می باشد که در زمینه ای از هوا قرار گرفته است. دومین ساختار، متشکل از نانو میله هایی از جنس فلز نقره با پوسته ای دی الکتریک می باشد که در زمینه ای از هوا قرار گرفته است. سومین ساختار، متشکل از نانو حلقه هایی از جنس فلز نقره می باشد که در زمینه ای از هوا قرار گرفته است. چهارمین ساختار، متشکل از نانو میله هایی از جنس فلز مس می باشد که پوسته ای از جنس دی الکتریک آن را در زمینه ای از فلز نقره احاطه کرده است. ثابت شبکه برای هر چهار مدل به گونه ای انتخاب شده تا نوار گاف در محدوده اپتیکی مشاهده شود. کلیه محاسبات با استفاده از مدل درود برای فلزات با در نظر گرفتن میرایی فلزات انجام شده است. ابتدا با استفاده از روش بسط موج تخت اصلاح یافته، معادلات ویژه مقدراری را برای چهار مدل به دست آورده سپس نمودار پاشندگی، نمودار چگالی حالات و نقشه گاف را برای هر دو  $TM$  و  $TE$  رسم و وجود نوار گاف را مورد بررسی قرار داده ایم.

یافته ها نشان می دهد که استفاده از دو نانو استوانه هم مرکز دی الکتریک فلز یا به عبارتی استفاده از سه ضریب شکست متفاوت فلز-دی الکتریک-هوا باعث به وجود آمدن نوار گاف با پهنای زیاد شده است هر که چه فضای فلز در بلور افزایش یابد پهنای نوار گاف هم افزایش می یابد. در هر چهار مدل نواحی در نقشه گاف دیده می شوند، که نور تحت هر قطبشی که به این بلور بتابد، در بازه فرکانس خاصی بازتاب خواهد شد.

**کلید واژه:** نانو بلور فوتونی، بلور فوتونی دو بعدی، نوار گاف فوتونی، روش بسط موج تخت، بلور فوتونی سه لایه و بلور فوتونی فلز-دی الکتریک.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	<b>فصل اول. آشنایی با بلورهای فوتونی</b>
۱	مقدمه
۲	۱-۱ معرفی بلور فوتونی
۵	۲-۱ مفهوم دقیق تر نوار گاف
۶	۳-۱ ویژگی‌های بلور فوتونی
۶	۱-۳-۱ شبکه
۸	۲-۳-۱ قطبش
۹	۳-۳-۱ چگالی حالات
۱۱	۴-۳-۱ نقشه گاف
۱۲	۴-۱ کاربردهای بلور فوتونی
۱۲	۱-۴-۱ موجبرها
۱۴	۲-۴-۱ صافی‌ها
۱۴	۳-۴-۱ فیبرهای بلور فوتونی
۱۵	۵-۱ لزوم شبیه سازی ساختار
	<b>فصل دوم. خواص اپتیکی فلزات و بلور فوتونی فلزی دو بعدی</b>
۱۷	مقدمه
۱۷	۱-۲ خواص الکترومغناطیسی فلزات
۱۸	۲-۲ تابع دی الکترونیک در فلزات
۲۰	۳-۲ بلور فوتونی فلزی
۲۴	۴-۲ پلاریتون‌های پلاسمون سطحی
	<b>فصل سوم. روش بسط موج تخت در بلور فوتونی دو بعدی</b>
۳۵	مقدمه



- ۳-۱ روش بسط موج تخت ۳۵
- ۳-۱-۱ اثبات روابط ویژه مقداری برای هر مُدهای TE و TM ۳۷
- ۳-۲ محاسبه ضریب فوریه برای مُدهای TE و TM ۴۲
- ۳-۲-۱ بلور فوتونی دوبعدی میله‌گونه ۴۲
- ۳-۲-۲ بلور فوتونی دو بعدی متشکل از دو نانو استوانه هم مرکز ۴۵

### فصل چهارم. شبیه سازی بلور فوتونی دو بعدی متشکل از دو نانو استوانه فلز-دی الکتریک

- مقدمه ۴۸
- ۴-۱ مطالعه بلور فوتونی دو بعدی متشکل از نانو میله دی الکتریک با پوسته‌ای از جنس فلز نقره در زمینه‌ای از هوا ۴۸
- ۴-۲ مطالعه بلور فوتونی دو بعدی متشکل از نانو میله فلزی از جنس نقره با پوسته‌ای دی الکتریک در زمینه هوا ۵۶
- ۴-۳ مطالعه بلور فوتونی دو بعدی متشکل از نانو حلقه‌های فلزی از جنس نقره در زمینه‌ای از هوا ۶۲
- ۴-۴ مطالعه بلور فوتونی دو بعدی متشکل از نانو میله فلزی از جنس فلز مس با پوسته‌ای دی الکتریک در زمینه فلز نقره ۶۹

### فصل پنجم. نتایج و پیشنهادات

- ۱-۵ نتایج ۷۸
- ۲-۵ پیشنهادات ۸۰
- منابع ۸۲

### فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ نمونه‌هایی از بلور فوتونی در طبیعت. ۲
- شکل ۲-۱ انواع بلور فوتونی تناوبی در یک، دو و سه بعد. ۳
- شکل ۳-۱ نمایش هندسه شبکه بلور فوتونی دو بعدی. ۴
- شکل ۴-۱ ساختار بلور فوتونی سه بعدی *woodpile* ۵
- شکل ۵-۱ انتشار موج در ساختار دو بعدی. ۵
- شکل ۶-۱ نمایش ناحیه بریلوین در بلور فوتونی دو بعدی. ۷
- شکل ۷-۱ نمایش قطبش در بلور فوتونی دو بعدی ۸
- شکل ۸-۱ تصویری از نمودار چگالی حالات برای مد **TM** ۱۰
- شکل ۹-۱ تصویری از نقشه گاف. ۱۱
- شکل ۱۰-۱ تصویری از موجبرهای ساخته شده توسط بلور فوتونی ۱۳
- شکل ۱۱-۱ تصویری از صافی‌های ساخته شده توسط بلور فوتونی ۱۴
- شکل ۱۲-۱ چند نمونه فیبر نوری ساخته شده توسط بلور فوتونی ۱۵
- شکل ۱-۲ نمودار پاشندگی برای بلور فوتونی متشکل از میله‌های فلزی در مد **TM** ۲۱
- شکل ۲-۲ نمودار پاشندگی برای بلور فوتونی متشکل از میله‌های فلزی در مد **TE** ۲۲
- شکل ۳-۲ تصویری از انتشار پلاریتون‌های پلاسمون سطحی ۲۵
- شکل ۴-۲ نمودار پاشندگی در یک جسم فلزی و مرز بین فلز و دی الکتریک. ۲۸
- شکل ۵-۲ تصویر مرز بین فلز و دی الکتریک ۲۹
- شکل ۶-۲ نمودار پاشندگی برای بلور فوتونی متشکل از میله‌های فلزی در مد **TE** ۳۲

- شکل ۳-۱ تصویری از بلور فوتونی دو بعدی. ۳۶
- شکل ۳-۲ نمایش شبکه و ساختار بلور فوتونی دو بعدی ۴۲
- شکل ۳-۳ تجزیه یک تک سلول از بلور فوتونی دو بعدی میله گونه ۴۳
- شکل ۳-۴ تجزیه یک تک سلول از بلور فوتونی متشکل از دو نانو استوانه هم مرکز ۴۶
- شکل ۴-۱ نمایی از بلور فوتونی دو بعدی و ناحیه بریلوئن مطرح شده در ساختار ۱ ۴۹
- شکل ۴-۲ نمودار چگالی حالات و پاشندگی برای ساختار ۱ در مُد  $TM$ . ۵۳
- شکل ۴-۳ نمودار چگالی حالات و پاشندگی برای ساختار ۱ در مُد  $TE$ . ۵۴
- شکل ۴-۴ نقشه گاف (الف) تغییرات ضخامت پوسته فلزی (ب) تغییرات ثابت دی الکتریک میله مرکزی ۵۵
- شکل ۴-۵ نمایی از بلور فوتونی دو بعدی و ناحیه بریلوئن مطرح شده در ساختار ۲ ۵۶
- شکل ۴-۶ نمودار چگالی حالات و پاشندگی برای ساختار ۲ در مُد  $TM$ . ۶۰
- شکل ۴-۷ نمودار چگالی حالات و پاشندگی برای ساختار ۲ در مُد  $TE$ . ۶۱
- شکل ۴-۸ نقشه گاف (الف) تغییرات شعاع میله فلزی (ب) تغییرات ثابت دی الکتریک پوسته ۶۲
- شکل ۴-۹ نمایی از بلور فوتونی دو بعدی و ناحیه بریلوئن مطرح شده در ساختار ۳ ۶۳
- شکل ۴-۱۰ نمودار چگالی حالات و پاشندگی برای ساختار ۳ در مُد  $TM$ . ۶۶
- شکل ۴-۱۱ نمودار چگالی حالات و پاشندگی برای ساختار ۳ در مُد  $TE$ . ۶۷
- شکل ۴-۱۲ نقشه گاف تغییرات ضخامت حلقه فلزی ۶۸
- شکل ۴-۱۳ نمایی از بلور فوتونی دو بعدی و ناحیه بریلوئن مطرح شده در ساختار ۴ ۶۹

شکل ۴-۱۴ نمودار چگالی حالات و پاشندگی برای ساختار ۴ در مُد  $TM$ ، متشکل از میله‌هایی فلزی از جنس مس به شعاع  $R = 0.25a$  با پوسته‌ای دی الکتریک به ضخامت  $d = 0.2a$  که در زمینه‌ای فلزی از جنس نقره قرار گرفته است.

۷۴

شکل ۴-۱۵ نمودار چگالی حالات و پاشندگی برای ساختار ۴ در مُد  $TM$ ، متشکل از میله‌هایی فلزی از جنس مس به شعاع  $R = 0.15a$  با پوسته‌ای دی الکتریک به ضخامت  $d = 0.15a$  که در زمینه‌ای فلزی از جنس نقره قرار گرفته است.

۷۵

شکل ۴-۱۶ نمودار چگالی حالات و پاشندگی برای ساختار ۴ در مُد  $TE$ ، متشکل از میله‌هایی فلزی از جنس مس به شعاع  $R = 0.25a$  با پوسته‌ای دی الکتریک به ضخامت  $d = 0.2a$  که در زمینه‌ای فلزی از جنس نقره قرار گرفته است.

۷۵

شکل ۴-۱۷ نمودار چگالی حالات و پاشندگی برای ساختار ۴ در مُد  $TE$ ، متشکل از میله‌هایی فلزی از جنس مس به شعاع  $R = 0.15a$  با پوسته‌ای دی الکتریک به ضخامت  $d = 0.15a$  که در زمینه‌ای فلزی از جنس نقره قرار گرفته است.

۷۶

شکل ۴-۱۸ نقشه گاف (الف) تغییرات شعاع میله فلزی از جنس مس (ب) تغییرات ثابت دی

۷۷

الکتریک پوسته

## فهرست جدول‌ها

۵۴	جدول ۴-۱ بازه فرکانسی نوار گاف در بلور فوتونی در مد TM برای شکل ۴-۲.
۵۵	جدول ۴-۲ بازه فرکانسی نوار گاف در بلور فوتونی در مد TE برای شکل ۴-۳.
۶۰	جدول ۴-۳ بازه فرکانسی نوار گاف در بلور فوتونی در مد TM برای شکل ۴-۶.
۶۱	جدول ۴-۴ بازه فرکانسی نوار گاف در بلور فوتونی در مد TE برای شکل ۴-۷.
۶۷	جدول ۴-۵ بازه فرکانسی نوار گاف در بلور فوتونی در مد TM برای شکل ۴-۱۰.
۶۸	جدول ۴-۶ بازه فرکانسی نوار گاف در بلور فوتونی در مد TE برای شکل ۴-۱۱.

## فصل اول

### آشنایی با بلور فوتونی

#### مقدمه

ساختار بلور فوتونی<sup>۱</sup> مشابه با ساختار گاف انرژی در نیمه رساناها است که باعث ساخت وسایل جدیدی برای افزایش سرعت کامپیوترها و وسایل اپتیکی شده است. بلورهای فوتونی این مزیت را به این دستگاه‌ها داده است که سرعت‌شان دو برابر و قیمت آنها به نصف خواهد رسید. در حقیقت، با اطلاعاتی که ما از تکنولوژی نیمه رساناها می‌دانیم به نظر می‌رسد که فراهم کردن یک کامپیوتر با سرعت ۱۰GH مشکل است، اما می‌توانیم با انتقال سیگنال‌ها توسط نور به جای الکترون‌ها، کامپیوتری با سرعتی در حدود ۱۰۰TH فراهم کنیم. بلور فوتونی وسیله اپتیکی است که شرایط را برای این انتقال نور فراهم می‌کند این وسیله اپتیکی می‌تواند فوتونها را به جای الکترون‌ها در نیمه

---

<sup>1</sup> Photonic crystal

رساناها هدایت و یک نوارِ گاف را ارائه کند که در آن فوتونها با این انرژی نمی‌توانند در بلور انتشار پیدا کنند.

انتشار موج الکترومغناطیسی در محیط‌های متناوب اولین بار توسط لرد ریلی<sup>۱</sup> در سال ۱۹۰۸ مورد مطالعه قرار گرفت. این ساختارها، بلورهای فوتونی یک بعدی بودند با یک نوارِ گاف<sup>۲</sup> نازک که از انتشار نور در صفحه منع می‌شدند [۱]. ساختار متناوب دو بعدی در سال‌های اخیر مورد مطالعه قرار گرفته است. اما بلور فوتونی سه بعدی اولین بار توسط یابلونویچ و جان در سال ۱۹۸۷ پیشنهاد شد. یابلونویچ پیشنهاد کرد که ساختار سه بعدی دی‌الکتریک می‌تواند یک نوارِ گاف الکترومغناطیسی را ارائه دهد. یک محدوده از فرکانس‌ها که نور در هیچ جهتی در سراسر این ساختار نمی‌تواند انتشار یابد. او پیش بینی کرد که گذار ناخواسته و خود به خود در یک نیمه رسانا می‌تواند توسط ساختار مواد تشکیل دهنده جلوگیری شود. بنابراین گذارهایی با این فرکانس‌ها می‌توانند در یک نوارِ گاف افت کنند که در آن هیچ حالتی در این فرکانس‌ها برای انتشار وجود نداشته باشد، آنگاه گذار ممنوع می‌شود. [۴-۲].

بلورهای فوتونی نیز در طبیعت وجود دارند، اما انسان در سال‌های اخیر این پتانسیل را کشف کرده است. به عنوان مثال بال‌های بعضی پروانه‌ها و حشرات، با ساختارهای میکروسکوپی متناوب پوشیده شده‌اند، که مانند بلور فوتونی عمل می‌کنند شکل ۱-۲-الف را ببینید. بال‌های پروانه‌ها نوری را که دارای طول موجی در محدوده‌ی نوارِ گاف فوتونی باشد، بازتاب می‌کند. این اثر سبب می‌شود که بال‌ها تحت زاویه‌های مختلف به رنگ‌های متفاوت دیده شود. بعضی از مواد معدنی نیز نمونه‌هایی از بلورهای فوتونی هستند، مانند سنگ معدنی opal. شکل ۱-۱-ب را ببینید [۲].

---

<sup>2</sup> Lord Rayleig

<sup>3</sup> Photonic band gap



(ب)

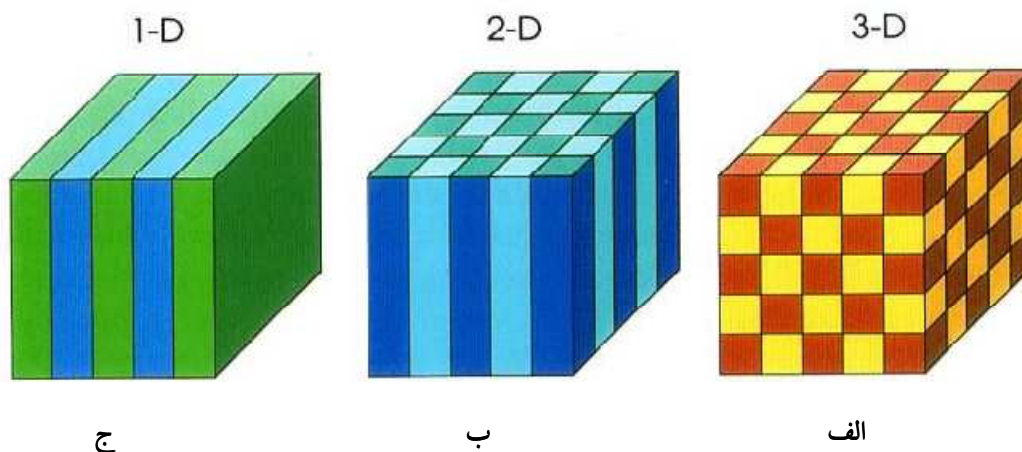


(الف)

شکل ۱-۱. چند نمونه ساختار طبیعی که دارای نوار گاف فوتونی هستند. الف) نوعی پروانه در حوزه رودخانه آمازون که بال‌های آبی رنگ درخشان دارد و با حرکت دادن بال‌هایش و جابه‌جا شدن نوار گاف فوتونی رنگ قهوه‌ای تیره ظاهر می‌شود. ب) کانی opal [۲].

## ۱-۱ معرفی بلور فوتونی

بلورهای فوتونی ساختارهای متناوبی هستند که از مواد دی‌الکتریک تشکیل شده‌اند. نواحی با ثابت‌های دی‌الکتریک متفاوت به طور متناوب تکرار می‌شوند و امواج الکترومغناطیسی در بازه‌های فرکانسی خاصی، توانایی عبور از آنها را ندارند. بلور فوتونی یک بعدی شامل چند لایه تخت موازی است که در یک جهت مانند  $X$  متناوباً تکرار می‌شود، بلور فوتونی دو بعدی شامل مجموعه‌ای از سلول‌ها است که در دو جهت  $X$  و  $Y$  متناوباً تکرار می‌شود، بلور فوتونی سه بعدی آرایشی از مکعب‌ها، کره‌ها یا حفره‌ها با اشکال متفاوت است، که در جهت  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  متناوباً تکرار می‌شوند. [۴] (شکل ۲-۱)



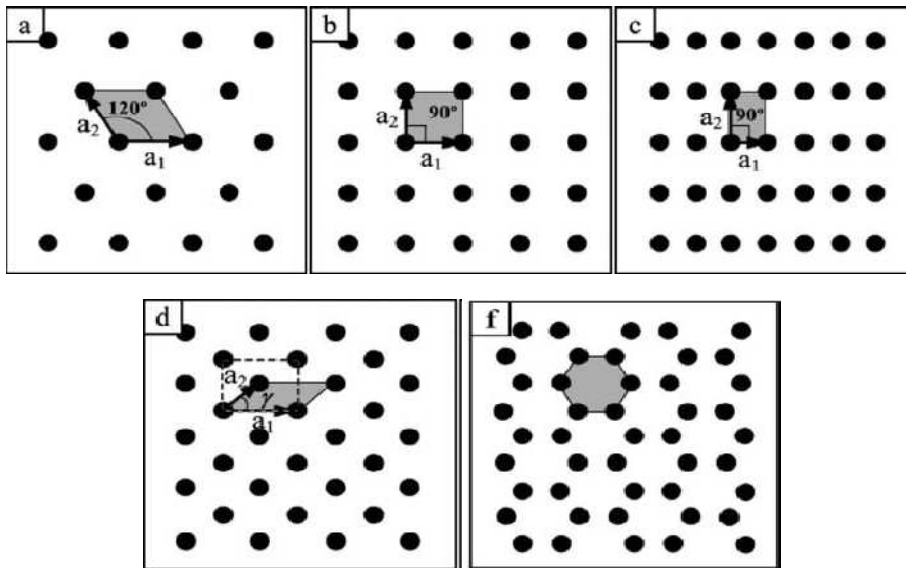
شکل ۱-۲. انواع بلور فوتونی . الف) یک بعدی. ب) دو بعدی. ج) سه بعدی [۴]

از نظر ساخت و تجزیه تحلیل فیزیکی، بلور فوتونی یک بعدی ساده ترین ساختار را دارد. این بلور کاربردهای فراوانی دارد، مانند کاواک فابری پرو<sup>۱</sup>، صافی های نوری<sup>۲</sup>، لیزرهای بازخورد توزیع شده<sup>۳</sup>. زمانی که نور روی این بلور فرود می آید بازتابها با هم تداخل می کنند. اگر ضخامت هر لایه مناسب انتخاب شود، میدان های بازتابیده شده می توانند با هم ترکیب شوند. نتیجه این ترکیب سازنده، بازتاب های قوی است. از مقایسه بلورهای فوتونی یک بعدی با دو بعدی و سه بعدی در می یابیم، برای اینکه یک بلور فوتونی دو بعدی و سه بعدی به بازتابش برسند به تعداد زیادتری تناوب احتیاج است نسبت به زمانی که یک بلور فوتونی یک بعدی به بازتابش برسد. در موادی که جذب اپتیکی کم باشد، با استفاده از این لایه های دی الکتریک می توان، آینه هایی را طراحی کرد که صد در صد نور فرودی را در محدوده فرکانس های مشخصی باز بتاباند. یکی از محدودیت های این آینه های دی الکتریک، محدود بودن به زاویه های فرودی است. [۲]

در دو بعد، یک بلور فوتونی را می توان مانند آرایه ی متناوب از دو دی الکتریک فرض نمود که در دو جهت X و Y متناوباً تکرار شده اند. ساده ترین هندسه ها در دو بعد همانند، شبکه براوا<sup>۴</sup> در فیزیک حالت جامد است. این شبکه به پنج خانواده ی اصلی تقسیم می شود، شکل ۱-۳.

<sup>1</sup> Fabry-perot cavities  
<sup>2</sup> Optical filters  
<sup>3</sup> Distributed feedback lasers  
<sup>4</sup> Bravais lattices



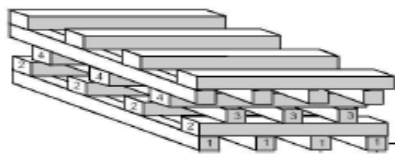


شکل ۳-۱. نمایش پنج هندسه شبکه پایه‌ی بلور فوتونی دو بعدی: (a) هگزاگونال (b) مربعی (c) مستطیلی (d) مرکز مستطیلی (f) لانه زنبوری، محیط خاکستری رنگ در هر شبکه نشان دهنده نشان دهنده سلول واحد<sup>۱</sup> است. [۵]

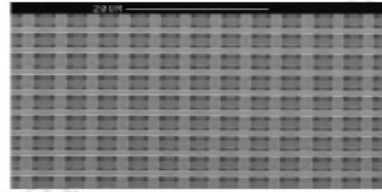
در شکل ۳-۱  $a_1$  و  $a_2$  بردارهای پایه شبکه نامیده می‌شوند. در ساختارهایی با بیش از یک بعد تناوب مکانی به صورت  $\mathcal{E}(r) = \mathcal{E}(x, y) = \mathcal{E}(r + a_i)$  نمایش داده می‌شود. که در دو بعد  $i=1,2$  می‌باشد. سلول واحد کوچکترین جزیی است که با انتقال و تکرار آن می‌توان کل بلور فوتونی را بازسازی کرد، این ناحیه در شکل فوق با نواحی خاکستری رنگ نشان داده شده است.

ساختارهای سه بعدی بیشترین اهمیت را برای ساختن دارند، از آنجا که ساخت بلور فوتونی دو بعدی از ساختارهای یک بعدی مفیدتر است، ساخت بلور فوتونی سه بعدی به گسترش و تکنیک‌های جدیدی احتیاج دارد. ساختارهای سه بعدی مجموعه‌ای از حفره‌ها یا کره‌ها یا اشکال گوناگون است که در سه جهت به طور متناوب تکرار شده‌اند ساختارهای متفاوتی از این بلور فوتونی وجود دارد مانند بلور فوتونی سه بعدی توده‌ای<sup>۲</sup> که در شکل ۴-۱ نشان داده شده است. [۶]

<sup>2</sup> Unit cell  
<sup>1</sup> woodpile



ب

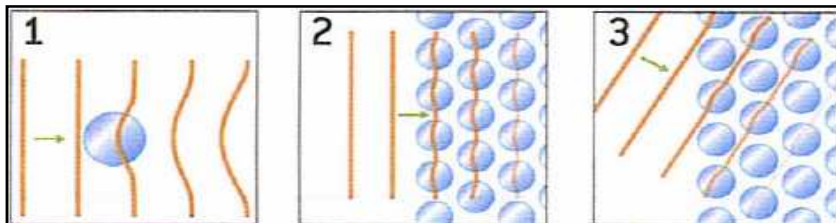


الف

شکل ۱-۴. ساختار بلور فوتونی سه بعدی توده‌ای (الف) تصویر SEM از یک ساختار بلور فوتونی سه بعدی توده-ای حقیقی که از سیلیکون ساخته شده است (ب) تصویری از یک بلور فوتونی سه بعدی توده‌ای ایده آل [۷].

## ۱-۲ مفهوم دقیق تر نوار گاف در بلور فوتونی دو بعدی

برای نوار گاف در ساختار دو بعدی، هر سلول دارای ساختاری مانند شکل ۱-۶ است. هر گاه نور در این ساختار منتشر شود موج بازتابیده و شکسته شده با هم ترکیب می‌شوند و موج ورودی را از بین می‌برند جهت در این انتشار اهمیت ندارد. محدوده طول موج‌هایی که در آن امواج فرودی بازتاب می‌شوند یک نوار توقف نامیده می‌شود. نوارهای توقف یک نوار گاف فوتونی کامل را تشکیل می‌دهند. موج در بلور فوتونی دو بعدی، در هر جهت می‌تواند انتشار یابد.



شکل ۱-۵. انتشار موج در ساختار دو بعدی

بلور فوتونی با تغییر سه ساختار مشخص می‌شود: تناوب میله‌ها، اختلاف ضریب شکست مواد، تناوب فضایی. با انتخاب مناسب این پارامترها یک نوار گاف می‌تواند بوجود آید.

تناوب میله‌ها: بی‌نظمی در ترتیب قرارگرفتن میله‌ها باعث پهن شدن نوار گاف می‌شود دلیل این امر کوچک‌تر شدن ناحیه اول بریلوئن است.

اختلاف ضریب شکست مواد: اولاً اختلاف نسبتاً زیاد بین ورقه و میله‌ها یک میدان قوی را فراهم می‌کند، که محدود به جهت عمودی است و اجازه می‌دهد که کسر زیادی از مُدها در بلور فوتونی هدایت شود. دوماً یک اختلاف بین نمایه‌های ضریب شکست در ماده دی‌الکتریک و میله لازم است تا نوار گاف بوجود آید. [۷]

تناوب فضایی: در بلور فوتونی بسته به این که تناوب در جهت X یا Y یا X ، Y و Z باشد سه بلور فوتونی یک، دو و سه بعدی معرفی می‌شود، که در بخش قبل شرح داده شد.

### ۳-۱ ویژگی های بلور فوتونی

#### ۱-۳-۱ شبکه

یک بلور فوتونی از سلول‌های واحد تشکیل شده است که متناوباً در فضا تکرار شده است. ترتیب قرار گرفتن این تک سلول‌ها را شبکه می‌نامند. از آنجا که محاسبه رابطه ویژه مقداری در فضای وارون راحت تر می‌باشد، لذا دو شبکه؛ شبکه اصلی<sup>۱</sup> و شبکه وارون<sup>۲</sup> توسط بردار شبکه اندازه گیری می‌شود. بردار شبکه اصلی را  $a_1$  ،  $a_2$  و  $a_3$  در نظر می‌گیریم که منطبق بر بردار شبکه وارون  $b_1$  ،  $b_2$  و  $b_3$  است. این بردارها توسط عبارات زیر تعریف می‌شود.

$$\vec{a}_i \cdot \vec{b}_j = 2\pi\delta_{ij} \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad (1-1)$$

بردارهای وارون توسط دسته معادلات زیر به دست می‌آیند

$$b_1 = 2\pi \frac{a_2 \times a_3}{V_c} \quad b_2 = 2\pi \frac{a_3 \times a_1}{V_c} \quad b_3 = 2\pi \frac{a_1 \times a_2}{V_c} \quad (2-1)$$

که در آن  $V_c = a_1 \cdot (a_2 \times a_3)$  حجم یک تک سلول از شبکه بلور است. حجم وارون این تک سلول  $V'_c = b_1 \cdot (b_2 \times b_3)$  است که به صورت زیر با  $V_c$  متناسب است

$$V'_c = \frac{8\pi^3}{V_c} \quad (3-1)$$

<sup>1</sup> Real lattices

<sup>2</sup> Reciprocal lattices

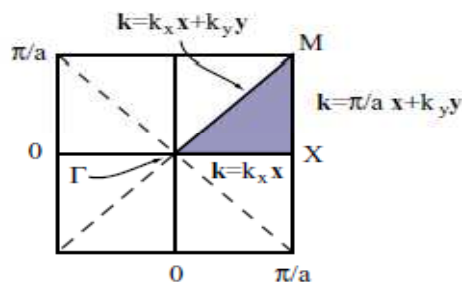
در این پایان نامه شبکه را شبکه مربعی در نظر گرفتیم، بردار شبکه برای شبکه مربعی به صورت زیر است

$$\vec{a}_1 = a(1,0) \text{ و } \vec{a}_2 = a(0,1) \quad (4-1)$$

که در آن  $a$  ثابت شبکه است. بردارهای شبکه وارون مربوطه به صورت زیر می‌باشند

$$\vec{b}_1 = \frac{2\pi}{a}(1,0) \text{ و } \vec{b}_2 = \frac{2\pi}{a}(0,1) \quad (5-1)$$

بر اساس ویژگی‌های تقارن شبکه مربعی، می‌توان نشان داد که اطلاعات برای حصول ساختار نوارهای گاف فرکانس، در تنها بخش کوچکی از ناحیه بریلوئن<sup>۱</sup> کافی است [۸]. ساختارهای متناوب به خصوص ساختارهای متناوب دو بعدی و سه بعدی دارای تقارن بسیار بالایی هستند. بنابراین انتشار در سراسر این محیط مستلزم کاهش دادن این تقارن‌ها است. ناحیه واحدی را می‌توان پیدا کرد که دارای این تقارن باشد. این ناحیه را ناحیه بریلوئن می‌نامند. برای شبکه مربعی تمام جهات انتشار ممکن در یک هشتم شبکه جمع شده است. این ناحیه برای شبکه مربعی در شکل ۱-۶ نشان داده شده است، ناحیه رنگی در شکل نشان دهنده ناحیه بریلوئن از شبکه مربعی است. این ناحیه توسط نقاط روی شبکه  $\Gamma$ ،  $X$  و  $M$  تعریف می‌شود. مختصات این نقاط به ترتیب  $(0,0)$ ،  $(2\pi/a, 0)$  و  $(2\pi/a, 2\pi/a)$  تعریف می‌شود. [۹]



شکل ۱-۶. نمایش ناحیه بریلوین، ناحیه اول بریلوین با مثلث قائم الزاویه متساوی الساقین هاشور خورده با نمادهای یونانی  $\Gamma$ ،  $M$  و  $X$  مشخص شده است.

<sup>1</sup> Brillouin zone