



دانشگاه پیام نور  
دانشکده علوم

پایان نامه

برای دریافت مدرک کارشناسی ارشد

رشته فیزیک اتمی و مولکولی

گروه فیزیک

عنوان پایان نامه :

بررسی نوار گاف کریستال‌های فوتونی سه لایه‌ای با نقص

مرضیه دادخواه

استاد راهنما : دکتر عبدالرسول قرائتی

شهریورماه ۱۳۹۰



دانشگاه پیام نور  
دانشکده علوم  
مرکز شیراز

**پایان نامه**

**برای دریافت مدرک کارشناسی ارشد**

**رشته فیزیک اتمی و مولکولی**

**گروه فیزیک**

**عنوان پایان نامه :**

**بررسی نوار گاف کریستال‌های فوتونی سه لایه‌ای با نقص**

**مرضیه دادخواه**

**استاد راهنما : دکتر عبدالرسول قرائتی**

شهریور ۱۳۹۰

تاریخ : .....  
شماره : .....  
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 مرضیه دادخواه دانشجوی رشته فیزیک گرایش اتمی و مولکولی به شماره دانشجویی ۸۷۰۰۰۰۸۴۷ با عنوان:  
" بررسی نوار گاف کریستال های فوتونی سه لایه ای با نقص "

با حضور هیات داوران در روز دوشنبه مورخ ۱۳۹۰/۶/۲۸ ساعت ۱۰ صبح در محل ساختمان غدیر دانشگاه پیام نور شیراز برگزار شد و هیات داوران پس از بررسی، پایان نامه مذکور را شایسته نمره به عدد ۱۹/۵ به حروف بیست و نه و پنج با درجه عالی تشخیص داد.

ردیف	نام و نام خانوادگی	هیات داوران	مرتبۀ دانشگاهی	دانشگاه	امضاء
۱	دکتر عبدالرسول قرائتی جهرمی	راهنما	دانشیار	پیام نور شیراز	
۲	دکتر حسین شاهمیرزایی	داور	استادیار	صنعتی مالک اشتر	
۳	دکتر محبوبه حسین یزدی	نماینده تحصیلات تکمیلی	استادیار	پیام نور شیراز	

رئیس اداره تحصیلات تکمیلی  
دانشگاه پیام نور  
شیراز

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

## گواهی اصالت نشر و حقوق مادی و معنوی اثر

اینجانب مرضیه دادخواه دانشجوی ورودی سال ۱۳۸۷ مقطع کارشناسی ارشد رشته فیزیک اتمی 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 مرضیه دادخواه

تاریخ و امضاء

اینجانب مرضیه دادخواه دانشجوی ورودی سال ۱۳۸۷ مقطع کارشناسی ارشد رشته فیزیک اتمی 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 ... و به صورت مشترک و با ذکر نام استاد راهنما مبادرت نمایم.

نام و نام خانوادگی دانشجو مرضیه دادخواه

تاریخ و امضاء

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

ماه و سال شهریور ۱۳۹۰

## تقدیم به:

این پایان نامه را به پدر و مادر عزیزم اسوهی ایثار و فداکاری تقدیم می‌کنم که در این راه همیشه پشتیبان من بوده‌اند و همسر مهربان و دلسوزم که با راهنمایی‌هایش سختی‌های راه را بر من آسان کرد.

## تقدیر و تشکر از:

در این پژوهش از جناب آقای دکتر عبدالرسول قرائتی کمال قدردانی و سپاس را دارم که با تلاش بی کران و با راهنمایی‌های علمی خود اینجانب را در انجام این پروژه یاری نمودند و از خداوند متعال توفیق روز افزون ایشان را خواهانم.

## چکیده

### بررسی نوار گاف کریستال‌های فوتونی سه لایه‌ای با نقص

مرضیه دادخواه

بلورهای فوتونی ساختارهای طبیعی یا مصنوعی هستند که در آن‌ها ضریب شکست به‌طور تناوبی تغییر می‌کند. این ساختارها اجازه انتشار امواج الکترومغناطیسی را درون ناحیه فرکانسی معینی نمی‌دهند بنابراین نور در این ناحیه کاملاً منعکس می‌شود. این نواحی ممنوعه، نوار گاف فوتونی نامیده می‌شود. با وارد کردن لایه‌ای با ضریب شکست یا ضخامت متفاوت در یک بلور فوتونی می‌توان مدهای عبوری در نوار گاف مشاهده کرد. هدف اصلی این پایان نامه، بررسی نوار گاف بلورهای فوتونی سه لایه‌ای با نقص است. در ابتدا بلورهای فوتونی سه لایه‌ای با نقص با هندسه متقارن و نامتقارن را معرفی می‌کنیم و سپس ماتریس انتقال هر کدام را محاسبه می‌کنیم. در مورد وابستگی مدهای عبوری در نوار گاف به زاویه تابش و ضخامت و ضریب شکست لایه نقص بحث می‌کنیم. با مشاهده طیف انتقال، گاف‌ها و مدهای بیشتری را در ساختارهای سه لایه‌ای نسبت به ساختارهای دو لایه‌ای مشابه یافتیم. مشاهده می‌کنیم که مدهای نقص در بلور سه لایه‌ای نسبت به تغییرات ضریب شکست و ضخامت لایه نقص بسیار حساس‌تر از مدهای نقص در بلور فوتونی دو لایه‌ای هستند. همچنین در نوار گاف بلور فوتونی سه لایه‌ای متقارن با نقص دو مد نقص وجود دارد اما در نوار گاف بلور فوتونی سه لایه‌ای نامتقارن با نقص یک مد نقص وجود دارد. با افزایش زاویه تابش برای دو هندسه متقارن و نامتقارن و برای هر دو قطبش  $TE$  و  $TM$  مدهای نقص به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر حرکت می‌کنند. با افزایش ضریب شکست لایه نقص برای بلور فوتونی سه لایه‌ای نامتقارن مدها به سمت طول موج‌های بزرگ‌تر حرکت می‌کند و این تاثیر در بلور فوتونی سه لایه‌ای متقارن به حرکت مدها به سمت مرکز نوار گاف منجر می‌شود. به علاوه با افزایش ضخامت لایه نقص در هر دو بلور فوتونی مدها به سمت طول موج‌های بزرگ‌تر حرکت می‌کنند. و هر چه لایه نقص در بلور فوتونی متقارن‌تر قرار گیرد مد عبوری بهتری در نوار گاف مشاهده می‌شود.

## فهرست مطالب

صفحه

عنوان

### فصل اول : آشنایی با بلورهای فوتونی

۲	۱-۱ مقدمه
۳	۲-۱ معرفی بلورهای فوتونی
۶	۳-۱ مفهوم نوار گاف فوتونی
۷	۱-۳-۱ نحوه تشکیل نوار گاف فوتونی در بلور فوتونی یک بعدی
۱۰	۲-۳-۱ اهمیت ضریب شکست بالا برای ساختارهای متناوب
۱۰	۴-۱ تاریخچه
۱۴	۵-۱ کاربرد بلورهای فوتونی
۱۵	۱-۵-۱ کاواک‌ها و میکروکاواک‌ها
۱۷	۲-۵-۱ موجبرها
۱۹	۳-۵-۱ فیلترها

### فصل دوم : انتشار موج در ساختارهای متناوب

۲۲	۱-۲ مقدمه
۲۲	۲-۲ یک محیط نوری چیست؟
۲۳	۳-۲ انتشار موج - معادلات ماکسول
۲۵	۱-۳-۲ معادله موج در خلا
۲۷	۲-۳-۲ موج‌ها در محیط دی الکتریک
۲۸	۳-۳-۲ ضریب شکست محیط دی الکتریک
۲۸	۴-۳-۲ محاسبه توزیع میدان در بلور فوتونی یک بعدی
۳۰	۴-۲ اپتیک محیط‌های چندلایه‌ای دی الکتریک
۳۰	۱-۴-۲ تئوری ماتریسی اپتیک چند لایه



۳۲	۲-۴-۲ ماتریس انتقال موج
۳۳	۳-۴-۲ ماتریس پراکندگی
۳۳	۴-۴-۲ ارتباط بین ماتریس انتقال موج و ماتریس پراکندگی
۳۴	۵-۴-۲ روابط پایستگی برای محیط‌های بدون اتلاف
۳۵	۶-۴-۲ سیستم‌های بدون اتلاف دو طرفه
۳۵	۵-۲ موج تخت در فصل مشترک دو محیط
۳۶	۱-۵-۲ محاسبه ضرایب عبور و انعکاس قطبش $TE$
۴۰	۲-۵-۲ محاسبه ضرایب عبور و انعکاس قطبش $TM$
۴۲	۶-۲ ماتریس انتقال در یک محیط همگن
۴۳	۷-۲ تابش مایل در محیط‌های لایه‌ای
۴۴	۱-۷-۲ ماتریس انتقال یک تیغه

### فصل سوم : بلور فوتونی دو لایه‌ای با نقص

۴۸	۱-۳ مقدمه
۴۸	۲-۳ روش ماتریس انتقال برای بلور فوتونی یک بعدی دو لایه‌ای
۵۰	۱-۲-۳ ساختار پشته‌ای موج یک چهارم
۵۱	۳-۳ آشکار سازی مدها در بلورهای فوتونی با نقص
۵۳	۳-۳-۱ نتایج عددی و بحث
۵۴	۴-۳ ماتریس انتقال برای بلور فوتونی یک بعدی دو لایه‌ای متقارن با نقص
۵۶	۳-۴-۱ بررسی مدهای نقص با تغییرات زاویه تابش برای قطبش $TE$
۵۸	۳-۴-۲ تاثیر تغییرات ضریب شکست لایه نقص بر مدهای نقص
۵۹	۳-۴-۳ تاثیر تغییرات لایه‌های تناوب بر مد نقص
۶۰	۳-۴-۴ تاثیر تغییرات ضخامت لایه نقص بر مدهای نقص
۶۳	۵-۳ ماتریس انتقال برای بلورهای فوتونی یک بعدی دو لایه‌ای نامتقارن با نقص
۶۴	۳-۵-۱ بررسی مدهای نقص با تغییرات زاویه تابش برای قطبش $TE$
۶۵	۳-۵-۲ تاثیر تغییرات ضریب شکست لایه نقص بر مدهای نقص

- ۶۶ ۳-۵-۳ تغییرات پهنای طول موج نقص بر حسب تعداد لایه‌ها
- ۶۸ ۴-۵-۳ تاثیر تغییرات ضخامت لایه نقص بر مدهای نقص

## فصل چهارم : بلور فوتونی سه لایه‌ای با نقص

- ۷۲ ۱-۴ مقدمه
- ۷۳ ۲-۴ روش ماتریس انتقال برای بلور فوتونی یک بعدی سه لایه‌ای
- ۷۶ ۳-۴ ماتریس انتقال برای بلور فوتونی یک بعدی سه لایه‌ای متقارن با نقص
- ۷۸ ۱-۳-۴ نتایج عددی و بحث
- ۷۸ ۲-۳-۴ بررسی مدهای نقص با تغییرات زاویه تابش برای قطبش  $TE$
- ۸۱ ۳-۳-۴ بررسی مدهای نقص با تغییرات زاویه تابش برای قطبش  $TM$
- ۸۳ ۴-۳-۴ تاثیر تغییرات ضریب شکست لایه نقص بر مدهای نقص
- ۸۴ ۵-۳-۴ تغییرات پهنای طول موج نقص بر حسب تعداد لایه‌ها
- ۸۵ ۶-۳-۴ تاثیر تغییرات ضخامت لایه نقص بر مدهای نقص
- ۸۹ ۷-۳-۴ جابه‌جایی لایه نقص در بلور فوتونی سه لایه‌ای متقارن با نقص
- ۹۲ ۴-۴-۴ ماتریس انتقال برای بلور فوتونی یک بعدی سه لایه‌ای نامتقارن با نقص
- ۹۳ ۱-۴-۴ نتایج عددی و بحث
- ۹۳ ۲-۴-۴ بررسی مدهای نقص با تغییرات زاویه تابش برای قطبش  $TE$
- ۹۴ ۳-۴-۴ بررسی مدهای نقص با تغییرات زاویه تابش برای قطبش  $TM$
- ۹۶ ۴-۴-۴ تاثیر تغییرات ضریب شکست لایه نقص بر مد نقص
- ۹۷ ۵-۴-۴ تغییرات پهنای طول موج نقص بر حسب تعداد لایه‌ها
- ۹۸ ۶-۴-۴ تاثیر تغییرات ضخامت لایه نقص بر مد نقص
- ۱۰۱ ۵-۴-۴ مقایسه بلور فوتونی دولایه‌ای نامتقارن با نقص و بلور فوتونی سه لایه‌ای نامتقارن با نقص
- ۱۰۲ ۱-۵-۴ تغییرات زاویه فرودی در قطبش  $TE$
- ۱۰۶ ۲-۵-۴ تغییرات ضریب شکست لایه نقص

- ۱۱۰ ۳-۵-۴ تغییرات ضخامت لایه نقص
- ۱۱۶ ۶-۴ مقایسه بلور فوتونی دولایه‌ای متقارن با نقص و بلور فوتونی سه لایه‌ای متقارن با نقص
- ۱۱۶ ۱-۶-۴ تغییرات زاویه فرودی در قطبش  $TE$
- ۱۲۰ ۲-۶-۴ تغییرات ضریب شکست لایه نقص
- ۱۲۳ ۳-۶-۴ تغییرات ضخامت لایه نقص

### فصل پنجم : نتیجه گیری و پیشنهادات

- ۱۳۰ ۱-۵ نتیجه گیری
- ۱۳۱ ۲-۵ پیشنهادات
- ۱۳۲ منابع

## فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۷۳	شکل ۴-۱ ساختار بلور فوتونی سه لایه‌ای با ضرایب شکست $n_3, n_2, n_1$
۷۶	شکل ۴-۲ بلور فوتونی سه لایه‌ای متقارن با نقص
۸۱	شکل ۴-۳ عبور محاسبه شده قطبش TE برای بلور فوتونی سه لایه‌ای متقارن با نقص به عنوان تابعی از طول موج با زوایای فرود مختلف. الف) $\theta_A = 0^\circ$ ب) $\theta_A = 15^\circ$ پ) $\theta_A = 30^\circ$ ت) $\theta_A = 45^\circ$ ث) $\theta_A = 60^\circ$ ج) $\theta_A = 75^\circ$
۸۲	شکل ۴-۴ عبور محاسبه شده قطبش TE برای بلور فوتونی سه لایه‌ای متقارن با نقص به عنوان تابعی از طول موج با زوایای فرود مختلف. الف) $\theta_A = 0^\circ$ ب) $\theta_A = 15^\circ$ پ) $\theta_A = 30^\circ$ ت) $\theta_A = 45^\circ$ ث) $\theta_A = 60^\circ$ ج) $\theta_A = 75^\circ$
۸۳	شکل ۴-۵ نمایش تغییرات ضریب عبور بر حسب طول موج برای تغییرات ضریب شکست لایه نقص برای قطبش TE و TM
۸۵	شکل ۴-۶ نمایش تغییرات ضریب عبور بر حسب طول موج با تغییرات سلول‌های واحد برای قطبش TE و TM الف) $N=6$ ب) $N=8$ پ) $N=10$ ت) $N=12$
۸۶	شکل ۴-۷ نمایش تغییرات ضریب عبور بر حسب طول موج با تغییرات ضخامت لایه نقص برای بلور فوتونی سه لایه‌ای در قطبش TE و TM
۸۵	شکل ۴-۸ نمایش تغییرات ضریب عبور بر حسب طول موج با تغییرات ضخامت لایه نقص برای بلور فوتونی سه لایه‌ای در قطبش TE و TM الف) $q=1$ ب) $q=2$ پ) $q=3$ ت) $q=4$ ث) $q=5$

$$q = 6 \text{ (ج)} \quad q = 7 \text{ (ح)} \quad q = 8 \text{ (خ)} \quad q = 9 \text{ (د)} \quad q = 10$$

شکل ۴-۹ نمایش تغییرات ضریب عبور بر حسب طول موج با تغییرات مکان لایه نقص در بلور فوتونی سه لایه‌ای الف) ۱۹ سلول واحد در سمت چپ و ۱ سلول واحد سمت راست لایه نقص و نوار گاف مربوط به آن ب) ۱۶ سلول واحد در سمت چپ و ۴ سلول واحد سمت راست لایه نقص و نوار گاف مربوط به آن پ) ۱۰ سلول واحد در سمت چپ و ۱۰ سلول واحد سمت راست لایه نقص و نوار گاف مربوط به آن

۹۱

۹۲

شکل ۴-۱۰ بلور فوتونی سه لایه‌ای نامتقارن با نقص

شکل ۴-۱۱ عبور محاسبه شده قطبش  $TE$  برای بلور فوتونی سه لایه‌ای متقارن با نقص به عنوان تابعی

از طول موج با زوایای فرود مختلف. الف)  $\theta_A = 0$  ب)  $\theta_A = 15$  پ)  $\theta_A = 30$  ت)  $\theta_A = 45$

۹۴

ث)  $\theta_A = 60$  ج)  $\theta_A = 75$

شکل ۴-۱۲ عبور محاسبه شده قطبش  $TM$  برای بلور فوتونی سه لایه‌ای متقارن با نقص به عنوان تابعی

از طول موج با زوایای فرود مختلف. الف)  $\theta_A = 0$  ب)  $\theta_A = 15$  پ)  $\theta_A = 30$  ت)  $\theta_A = 45$

۹۶

ث)  $\theta_A = 60$  ج)  $\theta_A = 75$

شکل ۴-۱۳ نمایش تغییرات ضریب عبور بر حسب طول موج بر اساس تغییرات ضریب شکست

۹۷

لایه نقص برای قطبش  $TE$  و  $TM$

شکل ۴-۱۴ نمایش تغییرات ضریب عبور بر حسب طول موج با تغییرات سلول‌های واحد برای قطبش

۹۸

$TE$  الف)  $N=6$  ب)  $N=8$  پ)  $N=10$  ت)  $N=12$

شکل ۴-۱۵ نمایش تغییرات ضریب عبور بر حسب طول موج با تغییرات ضخامت لایه نقص برای

۹۹

بلور فوتونی سه لایه‌ای

شکل ۴-۱۶ نمایش تغییرات ضریب عبور بر حسب طول موج با تغییرات ضخامت لایه نقص برای

بلور فوتونی سه لایه‌ای در قطبش  $TE$  و  $TM$ . الف)  $q = 1$  ب)  $q = 2$  پ)  $q = 3$  ت)  $q = 4$

۱۰۱

ث)  $q = 5$  ج)  $q = 6$  چ)  $q = 7$  ح)  $q = 8$  خ)  $q = 9$  د)  $q = 10$

شکل ۴-۱۷ تغییرات ضریب عبور بر حسب طول موج برای بلور فوتونی دولایه‌ای و سه لایه‌ای

نامتقارن با نقص با تغییرات زاویه فرودی. الف)  $\theta_A = 0$  ب)  $\theta_A = 15$  پ)  $\theta_A = 30$  ت)  $\theta_A = 45$

ث)  $\theta_A = 60$  ج)  $\theta_A = 75$  (خط تیره نشان دهنده بلور فوتونی دو لایه‌ای و خطوط توپر نشان

۱۰۶

دهنده بلور فوتونی سه لایه‌ای)

شکل ۴-۱۸ نمایش تغییرات ضریب عبور بر حسب طول موج با تغییرات ضریب شکست لایه نقص

برای بلور فوتونی دو و سه لایه‌ای. الف)  $n_D = 1/4$  ب)  $n_D = 1/9$  پ)  $n_D = 2/4$  ت)  $n_D = 2/9$

ث)  $n_D = 3/4$  ج)  $n_D = 3/9$  (خط تیره نشان دهنده بلور فوتونی دولایه‌ای و خطوط توپر نشان دهنده

۱۰۹

بلور فوتونی سه لایه‌ای)

شکل ۴-۱۹ نمایش تغییرات ضریب عبور بر حسب طول موج با تغییرات ضخامت لایه نقص برای

بلور فوتونی دو و سه لایه‌ای نامتقارن با نقص در قطبش  $TE$  و  $TM$

الف)  $n_D d_D = q \frac{\lambda_0}{4}, q = 1$  ب)  $n_D d_D = q \frac{\lambda_0}{4}, q = 2$

پ)  $n_D d_D = q \frac{\lambda_0}{4}, q = 3$  ت)  $n_D d_D = q \frac{\lambda_0}{4}, q = 4$

ث)  $n_D d_D = q \frac{\lambda_0}{4}, q = 5$  ج)  $n_D d_D = q \frac{\lambda_0}{4}, q = 6$

چ)  $n_D d_D = q \frac{\lambda_0}{4}, q = 7$  ح)  $n_D d_D = q \frac{\lambda_0}{4}, q = 8$

خ)  $n_D d_D = q \frac{\lambda_0}{4}, q = 9$  د)  $n_D d_D = q \frac{\lambda_0}{4}, q = 10$

۱۱۵

(خط تیره نشان دهنده بلور فوتونی دولایه‌ای و خطوط توپر نشان دهنده بلور فوتونی سه لایه‌ای)

شکل ۴-۲۰ تغییرات ضریب عبور بر حسب طول موج برای بلور فوتونی دولایه‌ای و سه لایه‌ای

مقارن با نقص با تغییرات زاویه فرودی الف)  $\theta_A = 0$  (ب)  $\theta_A = 15$  (پ)  $\theta_A = 30$  (ت)  $\theta_A = 45$   
 ث)  $\theta_A = 60$  (ج)  $\theta_A = 75$  (خط تیره نشان دهنده بلور فوتونی دولایه‌ای و خطوط توپر نشان  
 دهنده بلور فوتونی سه لایه‌ای)

۱۱۹

شکل ۴-۲۱ نمایش تغییرات ضریب عبور بر حسب طول موج با تغییرات ضریب شکست لایه نقص

برای بلور فوتونی دو و سه لایه‌ای. الف)  $n_D = 1/4$  (ب)  $n_D = 1/9$  (پ)  $n_D = 2/4$  (ت)  $n_D = 2/9$   
 ث)  $n_D = 3/4$  (ج)  $n_D = 3/9$  (خط تیره نشان دهنده بلور فوتونی دولایه‌ای و خطوط توپر نشان  
 دهنده بلور فوتونی سه لایه‌ای)

۱۲۳

شکل ۴-۲۲ نمایش تغییرات ضریب عبور بر حسب طول موج با تغییرات ضخامت لایه نقص برای

بلور فوتونی دو و سه لایه‌ای مقارن با نقص در قطبش  $TE$  و  $TM$

$$\text{الف) } n_D d_D = q \frac{\lambda_0}{4}, q = 1 \quad \text{ب) } n_D d_D = q \frac{\lambda_0}{4}, q = 2$$

$$\text{پ) } n_D d_D = q \frac{\lambda_0}{4}, q = 3 \quad \text{ت) } n_D d_D = q \frac{\lambda_0}{4}, q = 4$$

$$\text{ث) } n_D d_D = q \frac{\lambda_0}{4}, q = 5 \quad \text{ج) } n_D d_D = q \frac{\lambda_0}{4}, q = 6$$

$$\text{چ) } n_D d_D = q \frac{\lambda_0}{4}, q = 7 \quad \text{ح) } n_D d_D = q \frac{\lambda_0}{4}, q = 8$$

$$\text{خ) } n_D d_D = q \frac{\lambda_0}{4}, q = 9 \quad \text{د) } n_D d_D = q \frac{\lambda_0}{4}, q = 10$$

(خط تیره نشان دهنده بلور فوتونی دولایه‌ای و خطوط توپر نشان دهنده بلور فوتونی سه لایه‌ای)

۱۲۸

## فهرست جدول‌ها

صفحه

عنوان

جدول ۴-۱ مقایسه تعداد مدهای نقص در بلور فوتونی دو لایه‌ای و سه لایه‌ای با تغییرات زاویه

۱۰۳

فرودی



# فصل اول

## آشنایی با بلورهای فوتونی

## ۱-۱ مقدمه

بلورهای فوتونی<sup>۱</sup> از لایه‌های متناوبی از مواد، که ثابت دی الکتریک آن‌ها با هم تفاوت دارند، تشکیل شده است [۱]. این ساختارها در واقع مانند بلورهای نیمه هادی هستند. در واقع این موضوع از مشابهت معادله شرودینگر در فیزیک حالت جامد و معادله هلمهولتز در میدان ناشی می‌شود. ضریب شکست همان نقشی را در معادله هلمهولتز بازی می‌کند که پتانسیل الکتریکی در معادله شرودینگر، بنابراین عملکرد بلورهای فوتونی در برابر فوتون‌ها مشابه عملکرد بلورهای نیمه‌هادی در برابر الکترون‌ها است [۲]. بلورهای فوتونی در برابر امواج نوری همان رفتاری را دارند که نیمه رساناها در مقابل امواج الکترونی شبکه از خود نشان می‌دهند. مشخصه اصلی بلورهای فوتونی که نوعاً به صورت مصنوعی ساخته می‌شوند، دوره‌ای بودن ثابت دی الکتریک در آن‌هاست. این ویژگی منجر به ایجاد نوار ممنوعه فرکانسی در بلور می‌شود، به طوری که امواج الکترومغناطیسی که با فرکانس منطقه ممنوعه تابش می‌شوند، قادر به عبور از بلور نمی‌باشند [۱]. به همین خاطر امروزه به جای استفاده از الکترون‌ها، از فوتون‌های سرعت بالا، برای انتقال اطلاعات استفاده می‌شود و همین امر سبب ایجاد تحول چشم‌گیری در صنعت ارتباطات شده است [۳]. همچنین مشکلاتی که توسط الکترون‌ها در روند انتقال اطلاعات به وجود می‌آید برای بلورهای فوتونی مطرح نمی‌باشد. به این صورت که، طی انتقال اطلاعات از تراشه‌های سیلیکون، الکترون‌ها از درگاه‌های الکترونیکی عبور می‌کنند و در برهم‌کنش با یکدیگر باردار شده و گرمای فراوانی ایجاد می‌کنند، در نتیجه حرکت الکترون‌ها محدود می‌شود. اما در بلورهای فوتونی، فوتون‌ها طی انتقال اطلاعات باردار نمی‌شوند و این مزیتی در استفاده از بلورهای فوتونی می‌باشد [۳]. با تغییر دادن پارامترهای فیزیکی نظیر ثابت دی الکتریک و یا عرض لایه‌ها، می‌توان یک نقص در بلور ایجاد کرد. نقص در بلورهای فوتونی مشابه ناخالصی در بلورهای نیمه‌رسانا می‌باشد. همانطور که ورود ناخالصی در بلور کامل یک نیمه‌رسانا منجر به ایجاد تراز انرژی جایگزیده در نوار ممنوعه انرژی می‌شود، وجود نقص در بلور فوتونی موجب ایجاد مدهای نقص در داخل نوار ممنوعه بلور می‌گردد که چنین مدی مجبور است در ناحیه نقص محدود گردد. نقص در بلور فوتونی همانند کاواکی عمل می‌کند که دیواره-

<sup>1</sup> Photonic crystal

<sup>2</sup>Gates

هایش نور را کاملاً منعکس می‌کند. اگر نوری هم فرکانس با فرکانس مد نقص به نزدیکی ناحیه نقص تابانده شود، این نور قادر نخواهد بود که این ناحیه را ترک کند [۱]. در فصل اول درباره بلورهای فوتونی و انواع مختلف آن توضیح داده شده و سپس در مورد مجموعه اصطلاحات اساسی و نوارگاف و چگونگی تشکیل آن بحث کرده‌ایم. سرانجام تاریخچه‌ای از پیدایش بلورهای فوتونی ارائه داده‌ایم. در پایان فصل کاربردهای مختلف بلورهای فوتونی در ارتباطات نوری را بیان می‌کنیم.

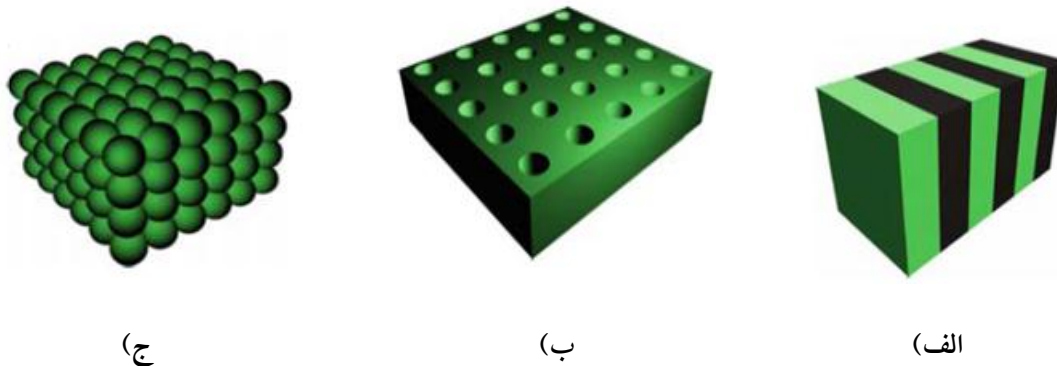
## ۲-۱ معرفی بلورهای فوتونی

بلورهای فوتونی ساختارهایی هستند که توانایی کنترل و دستکاری در جریان فوتون‌ها را دارند. با توجه به متناوب بودن ضریب شکست لایه‌ها در یک، دو و سه جهت، بلورهای فوتونی یک بعدی<sup>۱</sup>، دو بعدی<sup>۲</sup>، سه بعدی<sup>۳</sup> به وجود آمده‌اند [۴-۹]. شکل (۱-۱) انواع این بلورها را نشان می‌دهد. در بلوره‌های فوتونی یک بعدی تناوب نفوذپذیری الکتریکی فقط در یک بعد اتفاق می‌افتد در حالی که در دو جهت دیگر، ساختار یکنواخت است. اولین بلورهای فوتونی شناخته شده بلورهای فوتونی یک بعدی هستند که به علت نوع بازتابش ایجاد شده از آنها، در ساخت آینه‌ها کاربرد دارند این نوع آینه‌ها مزیت‌هایی نسبت به آینه‌های فلزی معمولی دارند. در هنگام برخورد نور به آینه‌های فلزی، جذب نور بیشتر از بازتاب است و این جذب در طول موج‌های کوتاه (فرو سرخ و مرئی)، که برای لیزرها و ارتباطات نوری مهم هستند، بیشتر می‌شود. ولی در بلورهای فوتونی که بر پایه برهمکنش‌های ضعیف بین نور و ماده استوار است، می‌توانند جذب پائینی را تقریباً در هر طول موج داشته باشند ولی محدودیت اصلی آینه‌های دی الکتریک این است که تنها برای ناحیه محدودی از زوایای نزدیک به فرود عمودی عمل می‌کنند. به عنوان مثالی از یک بلور فوتونی یک بعدی، شبکه براگ را که به طور گسترده به عنوان یک منعکس کننده توزیع شده در لیزرهای خروجی سطحی با کاواک عمودی استفاده می‌شوند می‌توان ارائه داد. می‌توان به مواد معدنی نیز به عنوان نمونه‌هایی از بلورهای فوتونی اشاره کرد (شکل ۱-۲).

<sup>1</sup> One Dimensional Photonic Crystal

<sup>2</sup> Two Dimensional Photonic Crystal

<sup>3</sup> Three Dimensional Photonic Crystal



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

این مواد زیبا شامل لایه‌های میکروسکوپی متناوب از دو ماده یا دو آرایش از یک ماده می‌باشند که در یک جهت متناوب هستند، و به صورت بلور فوتونی یک بعدی مشخص می‌شوند. وقتی نور روی لایه‌ها می‌تابد توسط نوار گاف فوتونی، بازتاب شده و به علت تفاوت ناچیز ضریب شکست لایه‌ها، نوار گاف باریک می‌شود و تنها یک رنگ خاص بازتاب می‌شود که ظاهر درخشانی را نتیجه می‌دهد. با تغییر زاویه نور فرودی، تناوب در آن جهت تغییر می‌کند و طول موج‌های محدوده نوار گاف جابه‌جا شده و در نتیجه رنگ‌های متفاوتی در زوایای متفاوت بازتاب می‌شوند که وقتی به طور مایل نگاه کنیم رنگ‌های مختلف مشاهده می‌کنیم [۴]. چنین مواد معدنی بلوری، در سال ۱۸۸۶ نظر لرد ریلی<sup>۱</sup> را به خود جلب کرد و به نظر می‌رسد که او اولین کسی است که یک تئوری دقیق از چنین پدیده‌هایی را فرمول بندی کرد. در واقع ریلی به طور اتفاقی به یک شکل از تئوری بلایخ - فلاکت که همان استخراج حل عمومی در محیط متناوب یک بعدی بود، پی برد. او به درستی نشان داد که هر محیط مشابه با آن نیز یک نوار گاف را نمایش می‌دهد اما متأسفانه او در پیگیری نتیجه و تعمیم به کل، شکست خورد و بعداً دست از آن کشید و به بیان روش مستقیم تر ولی با درخشش کمتری که همان روش جمع کردن موج‌های بازتاب شده و شکسته شده از هر سطح بود، پرداخت.

<sup>1</sup>Lord Rayleigh