١٠٣٩٢٦

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده علوم پایه

پایان نامه دورهٔ کارشناسی ارشد فیزیک (اتمی-مولکولی)

بررسی خواص اپتیکی بلورهای فتونیکی حاوی گاف نواری

نگارش
سارا شادمهری

۱۳۸۷ /۵/ ۲۴

استاد راهنما
دکتر یوسف سید جلیلی

استاد مشاور
دکتر محمد رضا ابوالحسنی

اسفند ۱۳۸۶

۱۰۲۹۲۶

دانشکده علوم پایه

بسمه تعالی

تأییدیه اعضای هیأت داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

اعضای هیئت داوران نسخهٔ نهایی پایان نامه خانم **سارا شادمهری** رشته **فیزیک (اتمی و مولکولی)** تحت عنوان: «**بررسی خواص اپتیکی بلورهای فتونیکی حاوی گاف نواری**» از نظر فرم و محتوا بررسی نموده و آنرا برای اخذ درجهٔ کارشناسی ارشد مورد تائید قرار دادند.

اعضای هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبهٔ علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر یوسف سیدجلیلی	استادیار	
۲- استاد مشاور	دکتر محمدرضا ابوالحسنی	استادیار	
۳- استاد ناظر داخلی	دکتر اسماعیل ساعی ور	استادیار	
٤- استاد ناظر خارجی	دکتر احمد امجدی	دانشیار	
٥- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر اسماعیل ساعی ور	استادیار	

انشگاه تربیت مدرس
دانشکده علوم پایه

بسمه تعالی

آیین‌نامهٔ چاپ پایان‌نامه (رساله) های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان‌نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش‌آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

مادهٔ ۲ در صفحهٔ سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه)، عبارت ذیل را چاپ کند

«کتاب حاضر حاصل پایان‌نامهٔ کارشناسی‌ارشد/رسالهٔ دکتری نگارنده در رشتهٔ فیزیک گرایش امی-مولکولی است که در سال ۱۳۸۶ در دانشکدهٔ علوم پایه دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر یوسف سیدجلیلی ، مشاورهٔ سرکار خانم/جناب آقای دکتر محمدرضا ابوالحسنی و مشاورهٔ سرکار خانم/جناب آقای دکتر ——— از آن دفاع شده است.»

مادهٔ ۳ به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

مادهٔ ۴- درصورت عدم رعایت مادهٔ ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ‌شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس ، تادیه کند.

مادهٔ ۵- دانشجو تعهد و قبول می‌کند درصورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در مادهٔ ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه‌شدهٔ نگارنده برای فروش، تأمین نماید.

مادهٔ ۶- اینجانب ساراسادهری دانشجوی رشته فیزیک گرایش امی-مولکولی مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می‌شوم.

نام و نام خانوادگی: ساراسادهری

تاریخ و امضا:

دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیات علمی، دانشجویان، دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشند.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین نامه های مصوب انجام می‌شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری خواهد بود.

ستاری
۸۷/۲/۹

تقدیم به پدر و مادر عزیزم،

آنان‌که

همواره نگران، دلسوز و پشتیبان من بوده‌اند.

و من در پاسخ به این همه فداکاری چه کرده‌ام؟

جز

خودخواهانه دنبال‌کردن آرزوهای خویش؟ ....

تشکر و قدردانی

پیش از آغاز کلام مایلم از دوستانی تشکرکنم که اگر کمک و یاریشان نبود، این پروژه به سرانجام نمی رسید. علاقمندم از واژهٔ دوست استفاده کنم چون آنچه آنها در حق من انجام دادند، تنها در این واژه به تمامی معنا پیدا می‌کند.

پیش از همه از استاد راهنمای خود، دکتر یوسف سید جلیلی، کمال تشکر و سپاسگزاری را دارم. ایشان فقط راهنمای من نبودند بلکه بیش از آن، همراه و مشوقم بودند، با من که در عرصهٔ تحقیق نوآموزی بیش نبودم، گام به گام پیش‌آمدند و در این مسیر به من نکاتی را آموختند که همواره به خاطر آنها مدیون و سپاسگزار ایشان خواهم بود.

از دکتر محمد رضا ابوالحسنی به خاطر راهنماییهای ارزنده‌ای که در این مدت در مقام مشاور و بیش و پیش از آن در مقام استادی برای من داشته‌اند، بسیار متشکرم.

از پروفسور پندری که با در اختیار قراردادن برنامهٔ کامپیوتری روش ماتریس انتقال و پاسخ گفتن به سؤالاتم، لطف بزرگی در حق من نمودند، کمال تشکر و سپاسگزاری را دارم.

از برادرم، محسن و دکتر مرتضی اصلانی‌نژاد و آقای علی آشکاران به خاطر فراهم‌آوردن متن کامل مقالات مفیدی که دسترسی به آنها به تنهایی برایم ممکن نبود، بسیار سپاسگزارم.

از دوستان حاضر در سایت MaplePrimes که صمیمانه به سؤالات و مشکلات من در مورد برنامه‌نویسی به زبان میپل پاسخ گفتند، بی‌نهایت متشکرم.

و در پایان از کلیهٔ دوستانم که شاید ذکر نام تمامی آنها صفحه‌ای جداگانه بطلبد، به خاطر آنکه همواره همراه من بوده‌اند و من را در مقابله با مشکلات یاری و راهنمایی نموده‌اند، هزار هزار بار متشکرم.

چکیده

امروزه بلورهای فتونیکی به دلیل قابلیتهای فراوانی که در کنترل انتشار نور دارند، بسیار مورد توجهند و در صنعت اپتوالکترونیک کاربردهای فراوانی دارند. یکی از موارد جالب توجه در این بلورها ظاهرشدن گاف نوار فتونی در منحنی پاشندگی آنها است. به منظور پیش بینی این گافها و نیز دیگر خواص اپتیکی این بلورها روشهای مدلسازی متعددی وجود دارد.

در این پایان‌نامه سعی شده ضمن ارائهٔ شرح کاملی از دو روش بسط موج تخت و ماتریس انتقال، خواص اپتیکی بلور فتونیکی یک بعدی و نیز یک بلور فتونیکی دوبعدی (شبکهٔ مربعی از میله‌های دی‌الکتریک در هوا) به کمک این دو روش مورد بحث و بررسی قرارگیرد.

ذکر این نکته ضروری است که تمامی برنامه‌های کامپیوتری مورد نیاز به کمک نرم‌افزار میپل نوشته شده است.

واژگان کلیدی: بلور فتونیکی، گاف نوار فتونی، منحنی پاشندگی، روش بسط موج تخت، روش ماتریس انتقال، فتونیک، اپتوالکترونیک، نانو فن‌آوری، نانو ساختارهای نوری

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فصل اول: مقدمه

۱-۱ سرگذشت نور ۲

۱-۲ بلور فتونیکی چیست؟ ۳

۱-۳ تاریخچهٔ تحقیق دربارهٔ بلور فتونیکی ۴

۱-۴ انواع بلورهای فتونیکی ۵

۱-۵ چگالی حالتهای نور در بلور فتونیکی ۸

۱-۵-۱ توصیف حالت نور در خلأ ۸

۱-۵-۲ حالت نور و چگالی آن برای بلور فتونیکی ۹

۱-۶ مدلسازی بلورهای فتونیکی ۱۱

۱-۷ مروری بر روشهای مدلسازی ۱۲

۱-۷-۱ روش بسط موج تخت ۱۳

۱-۷-۲ روش المان محدود ۱۴

۱-۷-۳ روش تفاضل محدود زمانی ۱۴

۱-۷-۴ روش ماتریس انتقال، ماتریس پراکندگی و RCWA ۱۵

فصل دوم: کاربردها

۲-۱ تیغه‌های بلورفتونیکی ۱۸

۲-۲ نقص در بلورهای فتونیکی..... ۱۹
۲-۳ چگونه می‌توان از ویژگیهای بلور فتونیکی استفاده‌کرد؟..... ۲۰
۲-۴ لیزرها..... ۲۲
۲-۴-۱ لیزر لبهٔ نواری..... ۲۲
۲-۴-۲ لیزر نقص نقطه‌ای..... ۲۳
۲-۵ موجبرهای نوری..... ۲۳
۲-۶ فیبرهای نوری..... ۲۴
۲-۶-۱ فیبر حفره‌دار..... ۲۵
۲-۶-۲ فیبر گاف نوار فتونی..... ۲۵
۲-۶-۳ فیبر براگ..... ۲۶
۲-۷ ابر منشور..... ۲۶

فصل سوم: بلور فتونیکی یک بعدی

۳-۱ محاسبهٔ ساختار نوارفتونیکی..... ۲۹
۳-۱-۱ معادلهٔ موج و حل مسألهٔ ویژه‌مقداری به روش بسط موج تخت..... ۲۹
۳-۱-۲ مقیاس بدون بعد..... ۳۲
۳-۱-۳ شرط همگرایی جوابها در فرکانسهای بالا..... ۳۴
۳-۲ وجوه مشخصهٔ نوارهای فتونیکی..... ۳۵
۳-۲-۱ سرعت گروه پایین..... ۳۵
۳-۲-۲ چگالی حالتهای فوتونی..... ۳۶
۳-۲-۳ وابستگی به قطبش..... ۳۷

۳-۳ منشأ گاف نوار فتونی..... ۳۹
۳-۳-۱ مقایسهٔ معادلهٔ موج با معادلهٔ شرودینگر..... ۴۰
۳-۳-۲ یک اختلال تناوبی..... ۴۱

فصل چهارم: بلورهای فتونیکی چند بعدی

۴-۱ معادلات ماکسول..... ۴۴
۴-۲ مسألهٔ ویژه مقداری در بلورهای فتونیکی دوبعدی..... ۴۷
۴-۲-۱ قطبش E..... ۴۸
۴-۲-۲ قطبش H..... ۴۸
۴-۳ بسط فوریهٔ توابع دی‌الکتریک..... ۴۹
۴-۳-۱ میلهٔ دایروی..... ۴۹
۴-۴ یک بلور فتونیکی دوبعدی: شبکهٔ مربعی از میله‌های دایروی..... ۵۱
۴-۴-۱ ساختار نوار فتونی..... ۵۲
۴-۴-۲ بررسی تأثیر پارامترهای ساختاری بر گاف نوار فتونی..... ۵۵

فصل پنجم: روش ماتریس انتقال

۵-۱ مفهوم کلی روش ماتریس انتقال..... ۵۹
۵-۲ یک ساختار چندلایهٔ یک بعدی..... ۶۰
۵-۲-۱ ساختار نوار فتونی..... ۶۳
۵-۲-۲ طیف عبوری و بازتابی..... ۶۵
۵-۳ ماتریس انتقال در ابعاد بالاتر..... ۶۷

۵-۳-۱ معادلات ماکسول روی شبکه..... ۶۸
۵-۳-۲ محاسبهٔ بازتابندگی وعبور..... ۷۲
۵-۳-۳ محاسبهٔ ساختار نوار فتونی..... ۷۸
۵-۳-۴ نتایج برای یک بلور فتونیکی دوبعدی: شبکهٔ مربعی از میله‌های دی‌الکتریک..... ۷۸

فصل ششم: نتیجه‌گیری..... ۸۲

مراجع..... ۸۵
ضمیمه..... ۸۸

فصل اول

مقدمه

۱-۱ سرگذشت نور

در طول تاریخ دانشمندان و فیلسوفان همواره در تلاش بوده‌اند تا نور، یکی از بنیادی‌ترین پدیده‌های موجود در طبیعت را درک‌کنند. در سالهای ۲۸۰ پیش از میلاد دانشمندان یونانی نظیر اقلیدس[۱] و پس از آن بطلمیوس[۲] به مطالعهٔ رفتار نور پرداختند و اینگونه نتیجه‌گیری‌کردند که نور تحت قوانین هندسی ساده رفتار می‌کند. اپتیک هندسی پیشرفت‌کرد به‌گونه‌ای که بسیاری از پدیده‌های نوری مثل بازتاب را به‌خوبی توضیح می‌داد. گامهای بزرگ بعدی در مسیر درک مفاهیم نوردر قرن ۱۶ میلادی توسط کسانی نظیر گالیله و کپلر برداشته‌شد. در قرن هفدهم ماهیت نور موضوع بحث بسیاری از محافل علمی بود. دکارت و نیوتن از حامیان سرسخت نظریهٔ ذره‌ای بودن نور بودند؛ نظریه‌ای که نور را به صورت جریانی از ذرات می دانست. هویگنس و دیگران این نظریه را ردکردند و نظریهٔ موجی بودن نور را ارائه دادند. آزمایش معروف دوشکاف یانگ در اوایل قرن نوزدهم به روشنی خاصیت موجی‌بودن نور را اثبات کرد.

در ادامهٔ کارهای کولمب[۳]، فیزو[۴]، فاراده و دیگران، در سال ۱۸۶۵م جیمز سی ماکسول، قهرمان داستان ما، چنین نتیجه‌گیری‌کرد که نور یک موج الکترومغناطیس است. ماکسول در این اقدام مهم مفاهیم اپتیک و الکترومغناطیس را که پیش از آن کاملاً تفکیک‌شده بودند، با هم ترکیب‌کرده، در چهار قانون خلاصه‌کرد. معادلات ماکسول علاوه بر توصیف ماهیت نور، شالودهٔ رادیو، تلویزیون و تمام وسایل مخابراتی مدرن را پی‌ریزی‌کرد.امروزه بشر شروع به آموختن چگونگی کنترل و بهره‌برداری از فرایندهای اپتیکی نموده است. هدایت نور در جهتهای دلخواه، سدکردن[۵]، قطبیده‌کردن، جایگزیدگی[۶] و انباشتن[۷] نور ازجمله مواردی است که امیدواریم کنترل کاملی بر روی آنها به‌دست‌آوریم. پیشرفتهای بسیاری در اغلب این موارد صورت‌گرفته‌است.

---

1. Euclid
2. Ptolemy
3. Coulomb
4. Fizeau
5. Blocking
6. Localizing
7. Storing

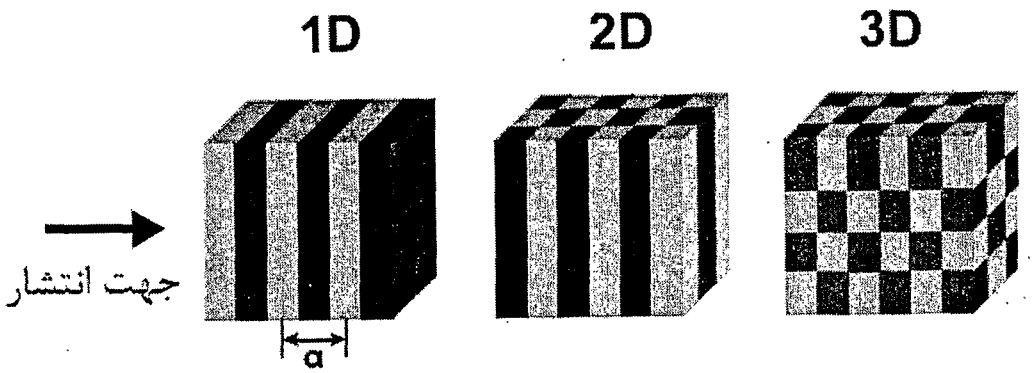
برای آنکه به تمامی از فواید بیشمار فن‌آوری نوری بهره‌بریم نیازمند کارهای بیشتری هستیم. بلور (نانوساختار)های فتونیکی[8] موادی هستند که ما معتقدیم قابلیت حل اغلب این مشکلات را دارند. مطالعهٔ بلورهای فتونیکی درحقیقت از سال ۱۹۸۷ با مقالهٔ الی یبلونویچ[9] آغازشد[۱]. بسیاری از مفاهیم و اصطلاحات به‌کاررفته در این زمینه از فیزیک نیم‌رسانا گرفته‌شده‌است. (فرض‌شده که خواننده با مفاهیم بنیادی فیزیک حالت جامد آشناست.)

۱-۲ بلور فتونیکی چیست؟

بلور فتونیکی آرایهٔ منظمی از موادی با ضریب شکست متفاوت است. بهتر است مقایسه‌ای با سیستم الکترونی داشته باشیم. چیدمان منظم اتمها تغییر انرژی پتانسیل بین هسته و فضای بین‌هسته‌ای را موجب می‌شود. خصوصیات شبکه چگونگی هدایت الکترون را در شبکه تعیین‌کرده، در نتیجه منجر به تشکیل نوارهای انرژی، محل انتشار آزادانهٔ الکترونها، و گافهای نواری که در آن هیچ حالت الکترونی مجاز نیست، می‌شود. در سیستم اپتیکی تغییر در ثابت دی‌الکتریک جایگزین تغییر انرژی پتانسیل می شود. به جای نواحی با انرژی پتانسیل بالا و پایین، یک بلور فتونیکی از نواحی با ثابت دی‌الکتریک زیاد و کم تشکیل‌شده‌است. خصوصیات فیزیکی چنین ساختاری تعیین‌کنندهٔ ساختار نوار فتونی ماده[10] خواهد بود. گافهای نوار فتونی[11] تحت شرایطی در موادی با ثابت دی‌الکتریک متغیر تناوبی ظاهر می‌شوند. بسته به اینکه تغییر تناوبی ثابت دی‌الکتریک در یک، دو و یا سه جهت فضا رخ دهد، بلورهای فتونیکی ۱، ۲ یا ۳ بعدی را خواهیم‌داشت (شکل ۱-۱).

پیش از آنکه بشر با ویژگیهای جالب توجه بلورهای فتونیکی آشناشود، این بلورها در طبیعت حضورداشته‌اند. آنچه باعث به وجودآمدن رنگهای منحصربه‌فرد در برخی از پروانه‌ها، سوسکها و... می‌شود، نانوساختار(بلور) فتونیکی به‌کاررفته در پر یا پوست این موجودات است که یک گاف نوار فتونی در محدودهٔ طول موج رنگ

8. Photonic Crystals (PhCs) (Nano-photonic Structures)
9. Eli Yablonovitch
10. Photonic Band Structure (PBS)
11. Photonic Band Gap (PBG)



شکل ۱-۱ طرح‌واره‌ای از بلورهای فتونیکی ۱، ۲ و ۳بعدی. رنگهای مختلف نشاندهندهٔ موادی با ثابت دی‌الکتریک متفاوتند. ***a*** ثابت شبکه است و تناوب فضایی ساختار را نشان می‌دهد.

بازتابی دارد[۲و۳]. اُپال[۱۲] یکی از آشناترین نمونه‌های طبیعی بلور فتونیکی ۳ بعدی است. ابعاد و کیفیت این نمونه‌های PhC را با بهترین فن‌آوریهای روز نمی‌توان بازتولیدکرد. هرچند نمونه‌های مفیدی را می‌توان در مقیاسهای کوچک زیرمیکرون تولیدکرد. به هنگام ساخت چنین ساختارهایی می‌توان خواص فیزیکی شبکه و ماده را به‌طورکامل کنترل‌کرد، به‌گونه‌ای‌که نور تحت فرمان ما در بلور حرکت‌کند!

یکی از مهمترین ویژگیهای اپتیکی قابل کنترل در بلورهای فتونیکی، چگالی حالتهای نور است که در بخش۱-۵ توضیح داده خواهد شد.

۱-۳ تاریخچهٔ تحقیق دربارهٔ بلورفتونیکی

همانگونه که همواره محدودیتها آغازگر تفکر، کشف و اختراع بوده‌اند، در اینجا نیز یک محدودیت انگیزهٔ حرکت به سمت بلورهای فتونیکی شد؛ محدودیت عملکرد لیزرهای نیم‌رسانا، ترانزیستورهای غیرپیوندی دوقطبی[۱۳] و سلولهای خورشیدی به دلیل وجود گسیل خودبخودی در تمام جهات و بخصوص افزایش این نوع اتلاف در

12. Opal
13. Heterojunction Bipolar

فرکانسهای بالا. در سال ۱۹۸۷[۴] یبلونویچ کنترل سه‌بعدی طیف گسیلی نور را پیشنهادداد، به‌طوریکه بتوان مدهای الکترومغناطیسی را که در فرایند تابش اصلی درگیر نیستند، حذف‌کرد. پیش از آن سالها این پدیده شناخته‌شده بود که تغییر تناوبی ضریب شکست در یک بعد در تیغه‌های ربع موج یا آینه‌های دی‌الکتریک چندلایه به یک گاف نوار فتونی تحت تابش عمود می‌انجامد. یبلونویچ بر این اساس اینگونه نتیجه‌گیری‌کرد که ساخت نمونه‌ای با تغییر تناوبی ضریب شکست در سه جهت فضا می‌تواند به یک گاف نوار فتونی سه‌بعدی بیانجامد؛ یعنی در محدودهٔ فرکانسی مشخصی هیچ موج الکترومغناطیسی، صرف‌نظراز جهت انتشارش در فضا، نمی‌تواند در بلور منتشرشود. این ساختارها بلور فتونیکی نامیده‌شدند.

در سال ۱۹۹۱[۴] یبلونویچ و همکارانش برای اولین بار اقدام به طراحی و ساخت چنین ساختاری با یک گاف نوار فتونی سه‌بعدی و ثابت شبکه‌ای در محدودهٔ میکرومتر نمودند[۴].

محققان به‌تدریج متوجه‌شدند که بلورهای فتونیکی خواص جالب توجه دیگری نیز دارند که در نمونه‌های فاقد گاف نوار فتونی، قابل‌مشاهده است. به‌این‌ترتیب در نیمهٔ دوم دههٔ ۹۰ تعداد گروههای تحقیقاتی در این زمینه افزایش قابل‌توجهی یافت.

۱-۴ انواع بلورهای فتونیکی

همانطور که گفته‌شد بلورفتونیکی به صورت بلوری تعریف می‌شود که در آن ثابت دی‌الکتریک (ε) به‌طورمتناوب در فضا و در جهات مختلف تغییرمی‌کند. در اینجا به معرفی چند نمونهٔ مشهور می‌پردازیم.

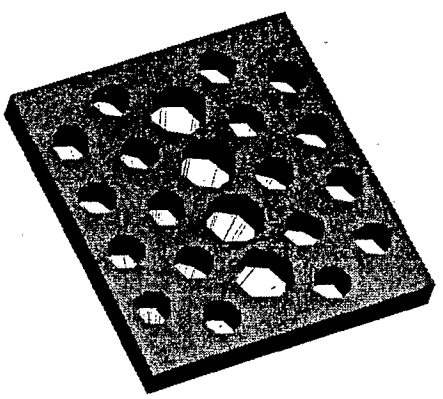
مثال مشهور بلورفتونیکی یک‌بعدی، فیلم دی‌الکتریک چندلایه است. درمورد بلورفتونیکی دوبعدی، به عنوان مثال ازتقاطع میله‌های هوا یا دی‌الکتریک با صفحه‌ای عمود بر آنها شبکهٔ دوبعدی شکل‌می‌گیرد، بنابراین به این صفحه، صفحهٔ بلورفتونیکی دوبعدی[۱۴] می‌گویند. بیایید مورد سادهٔ 1D PC را درنظربگیریم. حالتهای نور در داخل این نمونهٔ PC یا به‌عبارتی ویژه‌مدهای نور با بردار موج k کاملاً متفاوت از ویژه‌مدهای نور در یک

14. 2D PC Plane

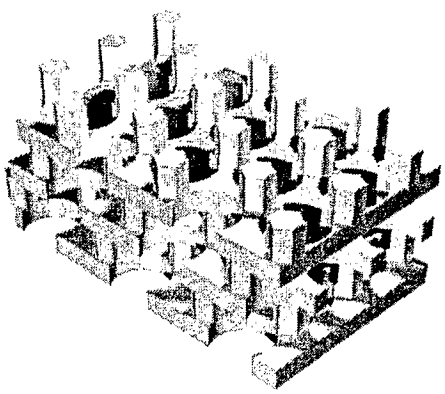
دی‌الکتریک یکنواخت است. همچنین ویژه‌مدهای نور با بردار موجی در صفحهٔ دوبعدی درمورد 2D PC و در یک جهت دلخواه در موردسه‌بعدی بازهم درمقایسه با دی‌الکتریک دو و سه‌بعدی همگن منحصربه‌فردند.

درشکل۱-۲ نمونهٔ دوبعدی تیغهٔ بلور فتونیکی[۱۵] نشان‌داده‌شده که وضعیتی بسیار متفاوت از نمونه‌های۱ و ۲بعدی بلور فتونیکی دارند. برای مثال شرایط برای تیغهٔ بلور فتونیکی یک و دوبعدی که ضخامتی از همان مرتبهٔ طول موج نور مربوطه یا کوچکتر دارد، کاملاً متفاوت از بلور فتونیکی یک و دوبعدی است که فرض‌می‌شود ضخامتی بینهایت بزرگ دارد. برای این مورد اخیر انتشار موج تخت در امتداد یک جهت (بلور فتونیکی ۱بعدی) یا در صفحهٔ ۲بعدی می تواند به‌خوبی تعریف‌شود، درحالیکه برای مورد اول (تیغه) دیگر نمی‌توان چنین موج تختی را تعریف‌کرد به‌طوریکه نیازمند رفتاری مثلاً ۳بعدی با یک مسألهٔ 2D PC هستیم.

شکل۱-۴ طرحی از یک فیبر بلورفتونیکی را نشان‌می‌دهد؛ نمونهٔ مهم دیگری از بلورهای فتونیکی که در آن صفحهٔ عمود بر فیبر یا میله‌ها، بجز قسمت مرکزی، یک شبکهٔ 2D PC را شکل‌می‌دهد [۵]. نور در قسمت مرکزی در امتداد فیبر منتشرشود[۶].



شکل ۱-۲ نمونه ای از تیغهٔ بلور فتونیکی دو بعدی

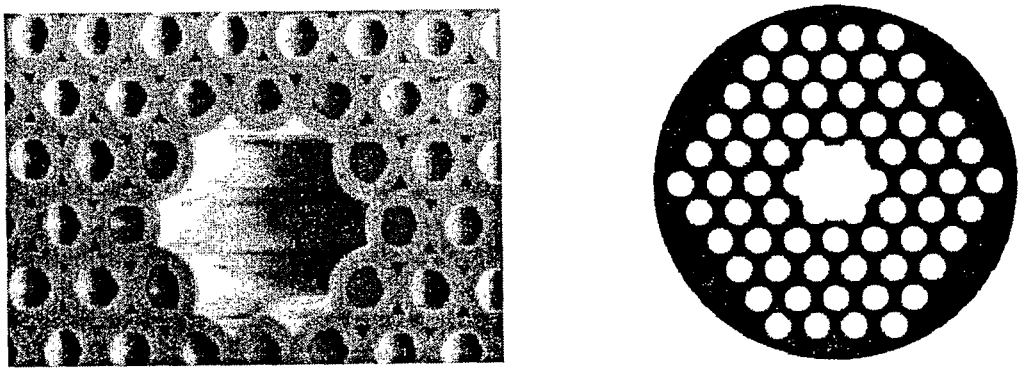


شکل۱-۳ نمونه ای از بلور فتونیکی ۳بعدی (scaffold structure)

15. PC Slab

برای بلورفتونیکی۳بعدی فقط یک مثال به‌صورت نمادین در شکل۱-۳ ارائه‌شده‌است. مثالهای مهم دیگری نیز از این نوع چیدمان ذرات وجوددارد. به عنوان مثال، نمونه‌هایی که درحال‌حاضر به‌طورگسترده‌ای مورد مطالعه قرارمی‌گیرند، آرایهٔ ۳بعدی ذرات اُپال هستند[۸،۷] و نیز آنچه که به اُپال وارون[۱۶] معروف است[۹].

تاکنون بلورهای فتونیکی را با توجه به ابعادشان طبقه‌بندی‌کردیم، اما انواع متفاوتی از آنها هستند که به طبقه‌بندیهای دیگری تعلق‌دارند؛ ازقبیل بلورفتونیکی ساخته‌شده از مواد فلزی[۱۱،۱۰]، بلورفتونیکی با ساختار شبه‌بلوری[۱۲]، یا بلوری فتونیکی با دو تناوب[۱۴،۱۳] و ... .



شکل ۱-۴ سطح مقطع یک فیبر نوری بلور فتونیکی (PCF)

در مورد چگونگی ساخت این نمونه‌ها روشهای متنوعی تاکنون اختراع یا معرفی‌شده‌است. پیشرفتهای اخیر در نانو فن‌آوری[۱۷] سبب شده ساخت بلورهای فتونیکی در اپتیک امکان‌پذیر شده، ساده‌تر شود. نانو مواد نوری از قبیل بلورهای فتونیکی، تحولی مهم در فن‌آوری نانو فتونیک[۱۸] به شمار می‌روند. نانو ساختارها یا بلورهای گاف نوار فتونی[۱۹] کاربردهای بالقوهٔ فراوانی در نسل جدید فن‌آوری ارتباطات نوری و ادوات زیست نوری[۲۰] دارند. نانو ساختارهای گاف نواری نقش مهمی را در قرن ۲۱ ایفا خواهند کرد؛ به کمک این فن‌آوری بسیاری از

16. Inverse Opal
17. Nano-technology
18. Nano-Photonics Technology
19. Photonic Band Gap Crystals
20. Biophotonic Devices

محدودیتهای گریبانگیر سیستمها و ادوات اپتیکی در صنعت ارتباطات نوری[۲۱]، محاسبات نوری[۲۲] و ادوات اپتیکی بیوپزشکی[۲۳] رفع خواهد شد.

همانگونه که معمول هر سیستم نانو فتونیک است، تجزیه وتحلیل دقیق نظری این ساختارها اهمیتی فوق‌العاده در تحلیل داده‌های تجربی و پیش بینی و درک پدیده‌های فیزیکی جدیدی دارد که در بلورهای فتونیکی ظاهر می‌شود. بیایید تحلیل نظری خود را با مبحث چگالی حالتهای نور شروع کنیم.

۱-۵ چگالی‌حالتهای نور در بلورفتونیکی

۱-۵-۱ توصیف حالت نور در خلأ

ابتدا بیایید حالت سادهٔ یک محیط یکنواخت و شفاف را درنظربگیریم. دراین صورت، ویژه حالت (مد) نور با مجموعه ای از شاخصهای e و k و $\hbar\omega$ مشخص می شود که $\hbar\omega$ و k به ترتیب به انرژی و بردار موج فوتون مربوط می شوند و e نشاندهندهٔ حالت قطبش است. برای هر ویژه حالت یک الگوی فضایی مشخصهٔ میدان الکتریکی (E) و میدان مغناطیسی (H) تعیین می شود که آن را مد می‌نامند. برای هر قطبشی رابطه‌ای بین $\hbar\omega$ و k وجوددارد؛ خاصیت پاشندگی محیط در این رابطهٔ پاشندگی منعکس می‌شود. به عنوان مثال در نمونه‌ای از فضای بینهایت بزرگی از خلأ، این رابطه به صورت $\omega=ck$ ($k=|k|$) بیان می‌شود (c نشاندهندهٔ سرعت نور در خلأ است) که وجود ویژه حالت یک موج تخت عرضی از k با بزرگی و جهت دلخواه را مجاز می‌سازد.

حال بیایید به عنوان مثالی از مدهای مشخصهٔ امواج الکترومغناطیسی در یک فضای بسته (خلأ)، این مورد را در مکعبی به طول l درنظربگیریم. با اعمال شرایط تناوبی روی سطوح این مکعب داریم:

$$k_i=(\frac{2\pi}{l})n_i \qquad (i=x,y,z \quad n_i=0,\pm1,\pm2,\pm3,...) \qquad (۱-۱)$$

21. Optical Communication Industry
22. Optical Computation
23. Biomedical Photonic Devices