



دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر
گروه الکترونیک

پایان نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد
در رشته الکترونیک گرایش مدارات مجتمع نوری

عنوان
آنالیز خواص نوری محیط‌های تصادفی

اساتید راهنما
دکتر علی رستمی
دکتر رضا یدی پور

استاد مشاور
دکتر سامیه مطلوب

پژوهشگر
ناصر نقدی

بهمن ماه ۱۳۹۰

به پاس

تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایثار

و

از خودگذشتگان

به پاس

عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان

که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است

به پاس

قلب های بزرگشان که فریاد رس است و

سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می گراید

و

به پاس

محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند

این مجموعه را به پدر و مادر عزیز و همسر مهربانم تقدیم می کنم

سپاسگزاری

در اینجا بر خود لازم می‌دانم، از اساتید عزیز و گرانمایه‌ام جناب دکتر علی رستمی و جناب آقای دکتر رضاییدی پور که راهنمایی پایان‌نامه بنده را در طی این مدت قبول نموده‌اند و از خانم دکتر مطلوب که به بنده مشاوره دادند، نهایت تشکر و قدردانی نمایم و از تمام کسانی که برایم زحمت کشیده و همیشه دعاگوی من بوده‌اند، کمال تشکر را دارم.

<p>نام خانوادگی : نقدی</p> <p>نام : ناصر</p>
<p>عنوان پایان نامه : آنالیز خواص نوری محیط‌های تصادفی</p>
<p>اساتید راهنما : دکتر علی رستمی و دکتر رضا یدی‌پور</p> <p>استاد مشاور : دکتر سامیه مطلوب</p>
<p>مقطع تحصیلی : کارشناسی ارشد</p> <p>رشته : مهندسی برق - الکترونیک</p> <p>گرایش : طراحی مدارات مجتمع نوری</p> <p>دانشگاه : تبریز</p> <p>دانشکده : برق و کامپیوتر</p>
<p>کلید واژه‌ها : ساختار تصادفی ، ساختار چند لایه ، ابررسانا، شبه‌پریودیک، فرا مواد</p>
<p>چکیده :</p> <p>ساختارهای تصادفی سالهاست که از لحاظ عملی و تئوری مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته، یکی از اثراتی که در ساختارهای تصادفی دیده می‌شود، تغییر در پهنا و لبه‌ی گاف فوتونی ساختار می‌باشد. ساختارهای تصادفی کاربردهای مفیدی در ساخت لیزرها و کاواک با انعکاس وسیع دارند، بنابراین شناخت این گونه ساختارها برای کاربرد این ساختارها می‌تواند مفید واقع شود. در این پایان‌نامه ما به بررسی رفتار ساختارهای تصادفی پریودیک، شبه‌پریودیک و ساختارهای حاوی نقص پرداخته‌ایم. ساختارهای مورد بررسی از مواد مختلف مانند دی‌الکتریک، ابررسانا و فرامواد تشکیل یافته‌اند. دریافتیم ساختارهای متشکل از ابررسانا نسبت به سایر ساختارها حساسیت کمتری نسبت به افزایش ضریب قدرت تصادفی از خود نشان می‌دهد و گاف فوتونی حاصل حساسیت کمتری نسبت به سایر ساختارها دارد. همچنین دریافتیم که گاف‌های مرتبه بالا که در فرکانس‌های بالا رخ می‌دهند، حساسیت به مراتب بیشتری در مقایسه با گاف‌های فرکانس پایین، نسبت به ضریب قدرت تصادفی یکسان از خود نشان می‌دهند. برای تحلیل این ساختارها از روش ماتریس انتقال بهره گرفتیم. ضخامت و ضریب شکست ساختار به صورت گوسین از تابع توزیع گوسین فرض شده است.</p> <p>در فصل اول، مقدمه‌ای را درباره بلورهای فوتونی، ابعاد این ساختارها و مواد تشکیل دهنده از جمله دی‌الکتریک، فرامواد، فلز و ابررسانا صحبت می‌کنیم. درباره فرامواد، انواع مختلف این مواد و برخی از ویژگی‌ها و کاربردهای غیرمعمول این مواد بحث خواهیم کرد و در مورد ساختارهای شبه‌پریودیک و انواع آن نکاتی را ذکر خواهیم نمود.</p> <p>در فصل دوم، چگونگی استخراج ماتریس انتقال از شرایط پیوستگی میدان‌های اعمالی به ساختار و انواع مختلف گاف‌ها در ساختارهای فرامواد مورد مطالعه قرار می‌گیرد. همچنین ماتریس انتقال دیگری که در ساختارهای فرامواد به کار برده می‌شود معرفی خواهد شد.</p> <p>در فصل سوم، به بررسی ساختارهای مختلف تصادفی پریودیک، شبه‌پریودیک و ساختارهای حاوی نقص می‌پردازیم. رفتار این ساختارها را بر روی منحنی انتقال نشان خواهیم داد و اثرات تصادفی بودن ضخامت و ضریب شکست ساختارهای یک بعدی را بروی منحنی انتقال ساختار مطالعه خواهیم کرد. همچنین گافهای به‌وجود آمده در ساختارهایی شامل دی‌الکتریک-دی‌الکتریک، فرا مواد تک منفی و فرامواد دو منفی-دی-الکتریک و تفاوت رفتار این گاف‌ها نسبت به تصادفی بودن ضخامت و ضریب شکست ساختار را مورد بررسی قرار خواهیم داد.</p>

۱ فصل اول.....	۱
۱-۱ مقدمه.....	۲
۲-۱ پارامترها و ویژگی‌های مهم بلورهای فوتونی.....	۵
۱-۲-۱ بلور فوتونی یک - بعدی:.....	۶
۲-۲-۱ بلور فوتونی دو بعدی:.....	۸
۳-۲-۱ بلور فوتونی سه بعدی:.....	۹
۳-۱ نقص در بلورهای فوتونی:.....	۹
۴-۱ بلورهای فوتونی شبه‌پرئودیک:.....	۱۱
۱-۴-۱ شبه بلورهای فوتونی یک بعدی:.....	۱۲
۱-۱-۴-۱ ساختارها بر اساس رشته فیوناچی:.....	۱۳
۲-۱-۴-۱ ساختارهای مبتنی بر رشته تو-مورس:.....	۱۴
۳-۱-۴-۱ ساختار دو برابر پرئود:.....	۱۵
۵-۱ ساختارهای تصادفی:.....	۱۶
۶-۱ فرا مواد:.....	۱۷
۱-۶-۱ خصوصیات الکتریکی و مغناطیسی فرا مواد:.....	۱۸
۲-۶-۱ چپگرد بودن بردارهای \vec{E} ، \vec{H} و \vec{K} :.....	۱۹

- ۱-۶-۳ اثبات معکوس شدن بردار موج:..... ۲۱
- ۱-۶-۴ شکست نور در محیط‌هایی با ضریب شکست منفی:..... ۲۳
- ۱-۷ فلزات و پلاسماها در فرکانس نوری:..... ۲۷
- ۱-۸ ابررساناها:..... ۳۱
- ۱-۸-۱ اثر مایسنر:..... ۳۲
- ۱-۸-۲ عمق نفوذ لندن:..... ۳۲
- ۱-۸-۳ ضریب شکست در ابررساناها:..... ۳۳
- ۲ فصل دوم: مبانی و روشها..... ۳۴
- ۱-۲ مقدمه..... ۳۵
- ۲-۲ انتشار امواج الکترومغناطیسی در لایه‌های متناوب:..... ۳۶
- ۲-۲-۱ انتقال امواج الکترومغناطیسی در ساختارهای چند لایه به روش ماتریسی:..... ۳۷
- ۲-۳ امواج الکترومغناطیسی و ساختارهای دولایه با گذردهی الکتریکی منفی و تراوایی مغناطیسی منفی: ۴۳
- ۲-۴ انتشار امواج در یک بلور فوتونی شامل فرامواد تک‌منفی:..... ۴۶
- ۲-۵ ساختار باند بلور فوتونی یک‌بعدی شامل فرامواد تک‌منفی:..... ۴۸
- ۲-۶ ساختار بلور فوتونی یک‌بعدی تصادفی..... ۵۲
- ۳ فصل سوم: بحث و نتایج..... ۵۴

۱-۳	مقدمه.....	۵۵
۲-۳	گاف فوتونی دی الکتریک-دی الکتریک:.....	۵۶
۳-۳	ساختارهای تصادفی متناوب یک بعدی دی الکتریک-دی الکتریک:.....	۶۰
۴-۳	ساختارهای چند لایه ای شبه پریودیک تصادفی:.....	۶۸
۱-۴-۳	ساختارهای تصادفی دو برابر پررود:.....	۶۸
۲-۴-۳	ساختارهای تصادفی مبتنی بر رشته تو-مورس:.....	۷۳
۳-۴-۳	ساختارهای تصادفی مبتنی بر رشته فیبوناچی:.....	۷۷
۵-۳	ساختار فرامواد تصادفی:.....	۷۹
۱-۵-۳	ساختار تصادفی فرا مواد تک منفی (SNG):.....	۷۹
۲-۵-۳	ساختار تصادفی فرا مواد دو منفی (DNG):.....	۸۴
۶-۳	مد نقص در بلور فوتونی ابررسانا-دی الکتریک حاوی نقص با ساختار تصادفی:.....	۹۰
۷-۳	نتیجه گیری و پیشنهادات:.....	۹۳

- شکل ۱-۱: پره‌های طاووس و پروانه نمونه‌هایی از بلورهای فوتونی طبیعی ۴
- شکل ۲-۱: نمودار ساختار بانندی در یک بلور فوتونی یک بعدی ۵
- شکل ۳-۱: مثال ساده‌ای از بلورهای فوتونیک یک، دو و سه بعدی. رنگ‌های مختلف نمایش دهنده مواد با ثابت دی‌الکتریک مختلف هستند. تعریف مشخصه‌ی بلور فوتونیک متناوب بودن ماده دی‌الکتریک در امتداد یک یا چند محور است ۶
- شکل ۴-۱: ساختار بلور فوتونی یک بعدی. عبارت "یک بعدی" به این حقیقت اشاره دارد که دی‌الکتریک فقط در یک بعد متناوب است. ساختار شامل لایه‌های متناوب با ثابت‌های دی‌الکتریک متفاوت است ۷
- شکل ۵-۱: باندهای فوتونی برای انتشار در راستای محور که برای سه ساختار چند لایه متفاوت دارای لایه‌ها با پهنای $A = 0.5$ نشان داده شده است. چپ: هر لایه ثابت دی‌الکتریک یکسان $E = 13$ دارد. وسط: لایه‌های متناوب با $E = 13$ و $E = 12$. راست: لایه‌ها متناوب با $E = 13$ و $E = 1$ ۸
- شکل ۶-۱: بلور فوتونی دو بعدی. این ساختار، شبکه‌ای مربعی از ستونهای دی‌الکتریک با شعاع R و ثابت دی‌الکتریک E میباشد. ماده در راستای Z همگن است و در راستای Y و X با ثابت شبکه A متناوب است ۸
- شکل ۷-۱: ساختار بلور فوتونی سه بعدی همراه با ساختار باند که در سال ۱۹۹۱ ساخته شد ۹
- شکل ۸-۱: یک بلور فوتونیک دو بعدی حاوی نقص خطی و نقص نقطه‌ای ۱۰
- شکل ۹-۱: ساختار یک بعدی فیوناچی معمولی ساخته شده از دو پلیمر $CA + DYE$ و PVK بر روی شیشه ساخته شده است ۱۴
- شکل ۱۰-۱: ساختار یک بعدی مبتنی بر سری تو-مورس تا جمله‌ی چهارم ۱۵
- شکل ۱۱-۱: ساختار یک بعدی مبتنی بر سری تو-مورس جمله‌ی پنجم متشکل از لایه‌های Si و SiO_2 ساخته شده توسط اسپاترینگ مگنترون درفرکانس رادیویی بر روی ماده سیلیکا ۱۵
- شکل ۱۲-۱: مواد راست‌گرد ۲۰
- شکل ۱۳-۱: مواد چپ‌گرد ۲۰
- شکل ۱۴-۱: طبقه بندی از مواد بر پایه خواص مغناطیسی و دیالکتریکی ۲۱

- شکل ۱۵-۱: نمایش تابع گذردهی الکتریکی روی صفحه مختلط..... ۲۲
- شکل ۱۶-۱: الگوی تابش پرتوهای ۱- تابش ۲- بازتاب ۳- شکست منفی ۴- شکست مثبت..... ۲۴
- شکل ۱۷-۱: شکست در فصل مشترک دو ماده به وسیله تطبیق فازی..... ۲۵
- شکل ۱۸-۱: (الف) ساختار یک لنز محدب معمولی - (ب) ساختار یک لنز تخت با استفاده از لایه فرامواد..... ۲۷
- شکل ۱۹-۱: قسمت حقیقی و موهومی ضریب گذردهی الکتریکی برای پلاسما ایده آل..... ۳۰
- شکل ۲۰-۱: ابرسانا در حضور میدان و در دمای بحرانی هیچگونه شار مغناطیسی از خود عبور نمی دهد و تبدیل به یک دیامغناطیس می شود..... ۳۲
- شکل ۲۱-۱: نفوذ میدان مغناطیسی اعمال شده در یک ابرسانای نیمه بی نهایت. عمق نفوذ لندن به صورت فاصله ای تعریف میشود که در آن میدان با ضریب E^{-1} کاهش میابد..... ۳۳
- شکل ۱-۲: ساختار متناوب دو لایه با ضرایب شکست n_1, n_2 ۳۷
- شکل ۲-۲: دامنه های وابسته به هم در لایه های مختلف از یک ساختار متناوب..... ۳۹
- شکل ۱-۳: ساختار یک بعدی الکتریک-دی الکتریک..... ۵۷
- شکل ۲-۳: ساختارهای نواری فوتونیک برای انتشار در راستای محور که برای دو چندلایه متفاوت که همه لایه هایی با پهنای $5a$ دارند نشان داده شده است. چپ: لایه های متناوب با $E=13$ و $E=12$. راست: لایه های متناوب با $E=13$ و $E=1$ ۵۸
- شکل ۳-۳: منحنی انتقال و گاف های براگ در ساختار پر یودیک شامل ۳۲ لایه $B(TiO_2), A(SiO_2)$ ۶۰
- شکل ۴-۳: اثر تصادفی بودن پارامترهای ساختار چند لایه یک بعدی الکتریک-دی الکتریک بر روی منحنی انتقال (گاف براگ اول): الف ضخامت لایه $D_1(A)$ تصادفی، ب: ضخامت لایه $D_2(B)$ تصادفی، ج: ضریب شکست لایه $N_1(A)$ تصادفی، د: ضریب شکست لایه $N_2(B)$ تصادفی..... ۶۲
- شکل ۵-۳: تغییرات منحنی انتقال (گاف براگ اول) بر اثر تصادفی بودن الف: ضخامت هر دو لایه (D_1, D_2) ، ب: ضریب شکست هر دو لایه (N_1, N_2) ، ج: ضخامت و ضریب شکست تصادفی..... ۶۴
- شکل ۶-۳: اثر تصادفی بودن پارامترهای ساختار چند لایه یک بعدی الکتریک-دی الکتریک بر روی منحنی انتقال (گاف براگ مرتبه دوم): الف ضخامت لایه $D_1(A)$ تصادفی، ب: ضخامت لایه $D_2(B)$ تصادفی، ج: ضریب شکست لایه (A) تصادفی، د: ضریب شکست لایه $N_2(B)$ تصادفی..... ۶۶

- شکل ۷-۳: تغییرات منحنی انتقال (گاف براگ مرتبه دوم) بر اثر تصادفی بودن الف: ضخامت هر دو لایه (D_1, D_2)، ب: ضریب شکست هر دو لایه (N_1, N_2)، ج: ضخامت و ضریب شکست تصادفی. ۶۷
- شکل ۸-۳: تغییرات منحنی انتقال (گاف) ساختار شبه پریودیک دو برابر پریود الف: ضخامت لایه (A) تصادفی، ب: ضخامت لایه (B) تصادفی. ۷۰
- شکل ۹-۳: تغییرات منحنی انتقال ساختار شبه پریودیک دو برابر پریود الف: ضریب شکست لایه (A) تصادفی، ب: ضخامت لایه (B) تصادفی. ۷۱
- شکل ۱۰-۳: تغییرات منحنی انتقال بر اثر تصادفی بودن الف: ضخامت هر دو لایه (D_1, D_2)، ب: ضریب شکست هر دو لایه (N_1, N_2)، ج: ضخامت و ضریب شکست تصادفی، د: تغییرات منحنی انتقال (گاف براگ مرتبه دوم) بر اثر تصادفی بودن ضخامت لایه (A) (D_1). ۷۲
- شکل ۱۱-۳: اثر تصادفی بودن پارامترهای ساختار چند لایه مبتنی بر رشته‌ی تو-مورس روی منحنی انتقال: الف ضخامت لایه (A) تصادفی، ب: ضخامت لایه (B) تصادفی، ج: ضریب شکست لایه (A) تصادفی، د: ضریب شکست لایه (B) تصادفی. ۷۴
- شکل ۱۲-۳: تغییرات منحنی انتقال (گاف) بر اثر تصادفی بودن الف: ضخامت هر دو لایه (D_1, D_2)، ب: ضریب شکست هر دو لایه (N_1, N_2)، ج: کل ضخامت و ضریب شکست تصادفی. ۷۶
- شکل ۱۳-۳: اثر تصادفی بودن پارامترهای ساختار چند لایه مبتنی بر رشته‌ی فیبوناچی روی منحنی انتقال: الف ضخامت لایه (A) تصادفی، ب: ضخامت لایه (B) تصادفی، ج: ضریب شکست لایه (A) تصادفی، د: ضریب شکست لایه (B) تصادفی. ۷۸
- شکل ۱۴-۳: گافه‌ای بانندی در ساختار فرامواد تک منفی $D_2=5\text{NM}$ $D_1=10\text{NM}$ و $\omega_{pm}=10\text{GHZ}$ و $\omega_{pe}=12\text{GHZ}$ و $A=3$ $B=1.2$ ۸۰
- شکل ۱۵-۳: منحنی انتقال ساختار متشکل از فرامواد تک منفی الف: تحت تابش نرمال، ب: تحت تابش با زوایای مختلف. ۸۱
- شکل ۱۶-۳: اثر تصادفی بودن پارامترهای ساختار چند لایه فرامواد تک منفی روی منحنی انتقال: الف ضخامت لایه (A) تصادفی، ب: ضخامت لایه (B) تصادفی، ج: ضریب شکست لایه (A) تصادفی، د: ضریب شکست لایه (B) تصادفی. ۸۲

شکل ۳-۱۷: اثر تصادفی بودن پارامترهای ساختار چند لایه ساختار چند لایه فرا مواد تک منفی (SNG) روی منحنی انتقال، الف:

ضخامت هر دو لایه (D_1, D_2) ، ب: ضریب شکست هر دو لایه (N_1, N_2) ، ج: کل ضخامت و ضریب شکست تصادفی... ۸۳

شکل ۳-۱۸: منحنی انتقال ساختار DNG-DPS و گافهای مختلف در این ساختار..... ۸۴

شکل ۳-۱۹: تغییرات گافها بر اثر تغییرات زاویه تابش در ساختار DNG-DPS..... ۸۶

شکل ۳-۲۰: اثر تصادفی بودن پارامترهای ساختار چند لایه DNG-DPS روی منحنی انتقال: الف ضخامت لایه $D_1 (A)$

تصادفی، ب: ضخامت لایه $D_2 (B)$ تصادفی، ج: ضریب شکست لایه $N_1 (A)$ تصادفی، د: ضریب شکست لایه $N_2 (B)$

تصادفی..... ۸۷

شکل ۳-۲۱: اثر تصادفی بودن پارامترهای ساختار چند لایه DNG-DPS روی منحنی انتقال، الف: ضخامت هر دو

لایه (D_1, D_2) ، ب: ضریب شکست هر دو لایه (N_1, N_2) ، ج: کل ضخامت و ضریب شکست تصادفی..... ۸۹

شکل ۳-۲۲: منحنی انتقال، الف: ساختار متناوب، ب: ساختار شامل لایه نقص. $(\lambda_0 = 83.4 \text{ nm}, T = 3.4 \text{ K}, TC = 9.2 \text{ K})$.

..... ۹۱

شکل ۳-۲۳: الف: مد نقص به ازای ضخامت های مختلف لایه ی ابررسانا در ساختار شبه متناوب. $(\lambda_0 = 83.4 \text{ nm}, T = 3.4 \text{ K})$

ب: مد نقص به ازای دماهای مختلف در ساختار شبه متناوب. $(K, TC = 9.2 \text{ K})$ ۹۲

شکل ۳-۲۴: منحنی انتقال ساختار چند لایه ابررسانا-دی الکتریک، الف: با ضخامت لایه ی A تصادفی، ب: با ضخامت لایه ی B

تصادفی،..... ۹۳

فهرست جداول

- جدول ۱-۱: پنج جمله سری فیبوناچی برای (جدول الف: $M=1, N=1$), (جدول ب: $M=2, N=1$), (جدول ج: $M=1, N=2$) ... ۱۳
- جدول ۲-۱: فلزات با اتلاف پایین و فرکانس پلاسمای بالا. ۳۰
- جدول ۱-۳: تغییرات لبه‌ی بالایی و پایینی گاف فوتونی ایجاد شده در فرکانس مرکزی $\omega/\omega_0 = 1$ به ازای ضرایب قدرت تصادفی مختلف بر روی ضریب شکست لایه‌ی A (N_1). ۶۳
- جدول ۲-۳: تغییرات لبه‌ی بالایی و پایینی گاف فوتونی ایجاد شده در فرکانس مرکزی $\omega/\omega_0 = 1$ به ازای ضرایب قدرت تصادفی مختلف بر روی ضریب شکست لایه‌ی B (N_2). ۶۳
- جدول ۳-۳: چند جمله‌ی اول رشته دو برابر پریود. ۶۹
- جدول ۴-۳: چند جمله‌ی اول رشته تو-مورس. ۷۳

فصل اول

بررسی منابع

۱-۱ مقدمه

خواص نوری ساختارهای متناوب در دنیای طبیعی نیز وجود دارد و طبیعت میلیون‌ها سال است که از بلورهای فوتونی طبیعی استفاده می‌کند. به عنوان مثال بال‌های پروانه و پره‌های طاووس نمونه‌های طبیعی هستند که ساختار مشابه با بلور فوتونی دارند. بحث مربوط به بلورهای فوتونی سه بعدی برخلاف ساختارهای پرئودیک یک بعدی که چندین دهه در ساخت فیلم لایه‌های نازک مورد استفاده قرار گرفته است مربوط به دو دهه اخیر می‌باشد [۱]. این ساختارها برای اولین بار توسط یابلونوویچ^۱ [۲] در سال ۱۹۸۷ مطرح شد. یابلونوویچ بیان کرد که این ساختارهای دی‌الکتریک متناوب سه بعدی دارای یک ناحیه ممنوعه فرکانسی (گاف فوتونی) هستند. او همچنین در مقاله خود بیان کرد که توسط چنین ساختارهایی می‌توان از گسیل خود بخودی^۲ ناخواسته موجود در نیمه هادی‌ها جلوگیری کرد [۱]. از آنجاکه هیچ حالت فرکانسی در داخل گاف نوار فوتونی نمی‌تواند انتشار یابد، با افتادن فرکانس‌های گسیل خودبخودی در داخل این گاف فوتونی، می‌توان این گسیل را به طور موثری کنترل کرد. یابلونوویچ نشان داد که می‌توان بوسیله ایجاد نقص در بلورهای فوتونی مدهای کاواک ایجاد کرد. همچنین ایشان نشان داد که در این حالت می‌توان مدها را مستقر^۳ کرد. وی این اثر را با استفاده از حالت‌های نقص در گاف نوار فوتونی توضیح داد [۱]. از طرفی نشان داد که حتی وقتی بلورهای فوتونی نظم و خاصیت تناوبی خود را از دست می‌دهند، بسیاری از خواص خود را حفظ می‌کنند. به واسطه این مشاهدات و پیشنهادات اولیه برای محدود کردن گسیل خودبخودی، فکر و عقیده کنترل نور با ساختارهای متناوب به سرعت به عنوان موضوع تحقیقاتی در سراسر دنیا گسترش پیدا کرد.

¹ Yablonovitch

² Spontaneous emission

³ Localization mode

از آنجاکه وجود نوارهای ممنوعه الکترونی در ساختارهای متناوب قبلاً به خوبی توسط فیزیک حالت جامد بیان شده بود، وجود گاف نوارهای الکترونی در نیمه هادی‌ها باعث ایجاد تحولات اساسی در الکترونیک شد. همچنین بسیاری از جنبه‌های تحقیقاتی حالت جامد به بلورهای فوتونی انتقال داده شده است که پیش-زمینه‌ای برای پیشرفت سریع در این حوزه می‌باشد. پیشرفت در فیزیک نیمه‌هادی ما را قادر به کنترل ویژگی‌های رسانش مواد کرده است که به نوبه‌ی خود باعث ایجاد انقلاب ترانزیستور در الکترونیک شد. طراحی موادی که قادر به انتشار نور در داخل خود باشند و یا اجازه انتشار نور در جهت‌ها و فرکانس‌های معینی را دهند و یا قادر به متمرکز کردن نور در یک محدوده خاصی باشند باعث پیشرفت‌های چشم‌گیر در صنعت ارتباطات نوری شد. در حال حاضر کابل‌های فیبر نوری^۱ باعث ایجاد تحولات بزرگ در صنعت مخابرات شده است. بلورهای فوتونی ساختارهای دی‌الکتریک متناوبی هستند که به صورت مصنوعی ساخته شده و قادر به کنترل انتشار نور می‌باشند.

یک بلور دارای چینشی از اتم‌ها و ملکول‌ها است که منظم در کنار هم قرار گرفته‌اند. به کوچک‌ترین جزء بلور، سلول واحد گفته می‌شود و از تکرار شدن این سلول واحد، شبکه بلوری ایجاد می‌شود. ساختار شبکه بلوری به شکل سلول واحد و جهت چینش آن‌ها بستگی دارد از طرفی سلول واحد بلورها، شکل‌هایی از قبیل مربعی و مثلثی و هگزاگونال می‌تواند داشته باشد که این هندسه بلور بسیاری از خواص آن را تعیین می‌کند. یک بلور پتانسیل متناوبی در مقابل الکترونی که در آن انتشار می‌یابد را قرار می‌دهد به‌علاوه پراکندگی براگ^۲ الکترون‌ها به هنگام انتشار در بلور، باعث ایجاد گاف یا ناحیه ممنوعه انرژی می‌شود که هیچ الکترونی دارای انرژی در محدوده ممنوعه اجازه انتشار در داخل این کریستال را ندارد. بنابراین الکترون‌ها با انرژی‌های خاص و درجهت‌های خاصی می‌توانند انتشار یابند و با هر نوع انرژی و در هر

^۱ Optical fiber

^۲ Bragg scattering

جهتی نمی‌توانند در بلور انتشار یابند. اگر پتانسیل شبکه به اندازه کافی قوی باشد، ممکن است گاف انرژی در تمام راستاهای ممکن ظاهر شود. برای مثال نیمه هادی‌ها دارای یک گاف نوار کامل بین نوارهای ظرفیت و رسانش می‌باشند.

به‌طور مشابه، شکل خاصی از بلورهای فوتونی دوبعدی^۱ ساختارهای دی‌الکتریک متناوبی هستند که از آرایش منظم میله‌های دی‌الکتریک در یک زمینه با ضریب دی‌الکتریک متفاوت تشکیل شده‌اند. در طبیعت نیز نمونه‌های طبیعی فراوانی وجود دارند که ساختار شبیه ساختار بلور فوتونی دارند از جمله این موارد طبیعی می‌توان به پر طاووس و پروانه اشاره کرد (شکل ۱-۱).

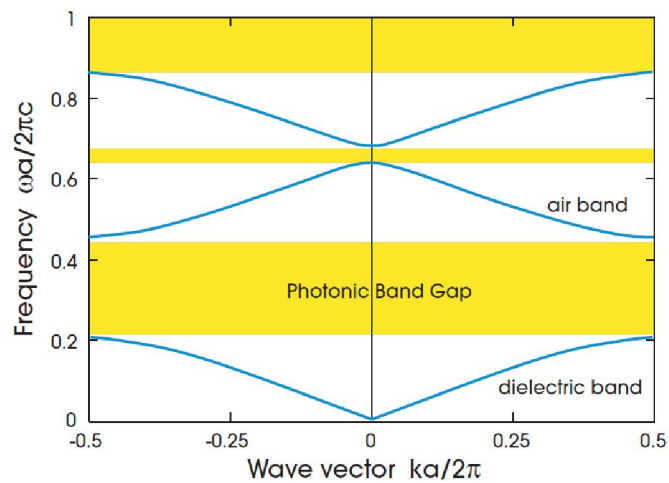


شکل ۱-۱: پره‌های طاووس و پروانه نمونه‌هایی از بلورهای فوتونی طبیعی [۱]

بلورهای فوتونی در واقع ادغام فیزیک حالت جامد و الکترومغناطیس است. ساختارهای متناوب این گروه مشابه بلورهای فیزیک حالت جامد هستند. در این بلورها الکترون‌ها با امواج الکترومغناطیسی جایگزین می‌شوند. در بلور فوتونی ضریب دی‌الکتریک متناوب نقش پتانسیل متناوب اتمی در نیمه‌های را بازی می‌کند به همین علت به این بلورها نیمه‌های نوری نیز گفته می‌شود. چنانچه ثابت‌های دی‌الکتریک لایه‌ها به اندازه کافی متفاوت و جذب نور در ماده حداقل باشد، آنگاه بسیاری از پدیده‌هایی که پتانسیل اتمی

^۱ Two dimensional photonic crystal

برای الکترون‌ها به علت پراکندگی از سطوح مشترک به وجود می‌آورد بطور مشابه برای مدهای نوری ایجاد می‌کند. بنابراین اگر در یک محدوده فرکانسی، بلور فوتونی پرتو نور فرودی را تحت هر زاویه‌ای بازتابش کند، می‌گوئیم این محدوده فرکانسی، گاف فوتونی کامل^۱ این بلور است و امواج با فرکانس در این محدوده، اجازه انتشار در داخل بلور فوتونی را نخواهند داشت. در واقع این بلور برای این امواج مانند آینه کامل رفتار می‌کند. در شکل ۱-۲، نمودار ساختار بانندی در یک بلور فوتونی یک بعدی مشاهده می‌شود.

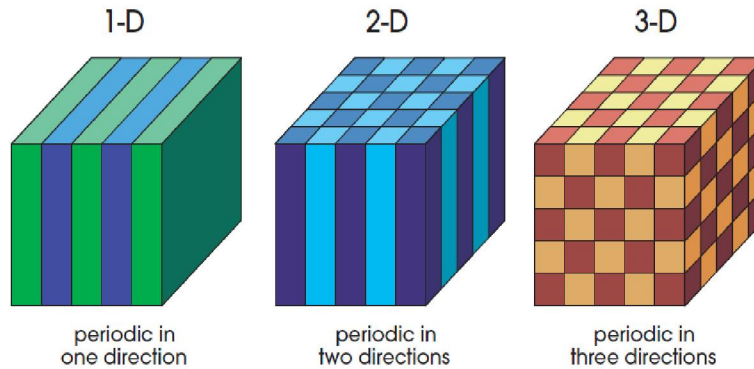


شکل ۱-۲: نمودار ساختار بانندی در یک بلور فوتونی یک بعدی [۱]

۲-۱ پارامترها و ویژگی‌های مهم بلورهای فوتونی

تناوب ضریب شکست، ابعاد بلور فوتونی را مشخص می‌کند یعنی با توجه به تناوب ضریب شکست در یک، دو یا سه بعد، بلورهای فوتونی یک، دو یا سه بعدی خواهیم داشت. در شکل ۱-۳ نمایی از بلورهای فوتونی در ابعاد مختلف را مشاهده می‌کنیم. در اینجا هر یک از بلورهای فوتونی یک، دو یا سه بعدی را به ترتیب معرفی می‌کنیم.

^۱ complete photonic band gap



شکل ۳-۱: مثال ساده‌ای از بلورهای فوتونیک یک، دو و سه بعدی. رنگهای مختلف نمایش دهنده مواد با ثابت دی‌الکتریک مختلف هستند.

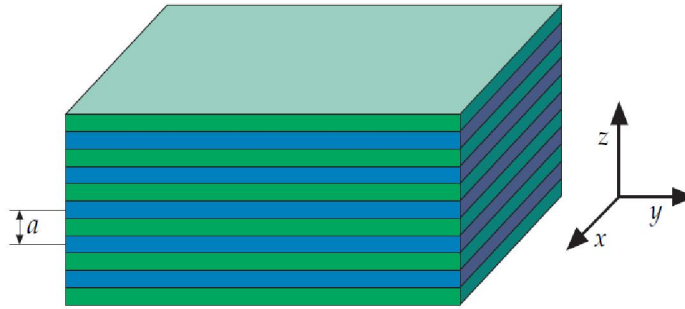
تعریف مشخصه‌ی بلور فوتونیک متناوب بودن ماده دی‌الکتریک در امتداد یک یا چند محور است [۱].

۱-۲-۱ بلور فوتونی یک - بعدی:

ساده‌ترین بلور فوتونی ممکن که در شکل ۱-۴ نشان داده شده، بلور فوتونی یک - بعدی^۱ است که شامل لایه‌های یک در میان از مواد با ثابت دی‌الکتریک متفاوت است. کلمه یک بعدی به این واقعیت بر می‌گردد که دی‌الکتریک تنها در یک راستا متناوب است. این آرایش ایده خیلی تازه‌ای نیست و خواص نوری چنین فیلم‌های چند لایه، بطور گسترده مطالعه شده است [۴۸]. این بلور فوتونی می‌تواند به صورت آینه کامل برای نور با فرکانسی داخل گاف عمل کند و اگر نقص‌هایی^۲ در ساختارش داشته باشد می‌تواند مدهای نور را مستقر کند [۱]. نمونه‌هایی از کاربرد این آرایش می‌توان به کاربرد این ساختارها در آینه‌های دی‌الکتریک، فیلترهای نوری و فیبرهای نوری اشاره کرد.

¹ One dimensional photonic crystal

² Defect



شکل ۱-۵: ساختار بلور فوتونی یک بعدی. عبارت "یک بعدی" به این حقیقت اشاره دارد که دی الکتریک فقط در یک بعد متناوب است.

ساختار شامل لایه‌های متناوب با ثابت های دی الکتریک متفاوت است [۱].

رهیافت سنتی برای درک این دستگاه، انتشار یک موج تحت از میان ماده و در نظر گرفتن بازتاب‌های چندتایی بوده است که در هر فصل مشترک لایه‌ها رخ می‌دهند. منشأ فیزیکی گاف^۱ با توجه به شکل ۱-۵ با در نظر گرفتن نماهای مد میدان الکتریکی برای حالت‌های بلافاصله بالا و پایین گاف می‌توانیم درک کنیم. گاف بین نوارهای $n=1$ و $n=2$ در لبه‌ی منطقه‌ی بریلوئن^۲ در $k = \pi/a$ رخ می‌دهد. اندازه گاف به وجود آمده به اختلاف ضریب گذردهی الکتریکی^۳ که متناسب با ضریب شکست^۴ می‌باشد و به ثابت شبکه و نسبت ضخامت لایه‌ها طبق رابطه‌ی (۱-۱) بستگی دارد.

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_m} = \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} \frac{\sin\left(\frac{\pi d}{a}\right)}{\pi} \quad (1-1)$$

در رابطه (۱-۱) فرض شده است که لایه‌ها با ضریب دی الکتریک ε و $\varepsilon + \Delta\varepsilon$ و ضخامت لایه‌ها d و $a-d$ می‌باشد. همچنین از رابطه‌ی فوق نسبت گاف به فرکانس مرکزی گاف قابل محاسبه می‌باشد. با توجه به شکل ۱-۵ مشاهده می‌شود با افزایش اختلاف ضریب دی الکتریک گاف نیز افزایش خواهد یافت.

¹ Band gap

² Brillouin zone

³ Permittivity

⁴ Refractive index