

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و
نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه
متعلق به دانشگاه رازی است.



دانشگاه رازی
دانشکده فنی مهندسی
گروه مهندسی برق

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق
گرایش الکترونیک

عنوان پایان نامه

شبیه سازی کریستال های فوتونی دوبعدی و بررسی آثار غیرخطی در آنها

استاد راهنما:

دکتر محمد مهدی کارخانه چی

نگارش:

سپیده صحرايي

اسفند ماه ۱۳۹۲

تقدیم بہ :

حضرت عشق، امام رؤوف

علی بن موسی الرضا (ع)

ویدرو مادرم
پ

بمشکر و سپاس از استاد دانشمند و پرمایه ام جناب آقای دکتر محمد مهدی کارخانه چی که از محضر پر فیض تدریسشان، بهره‌ها

برده‌ام.

و

و با تقدیر و درود فراوان خدمت پدر و مادر بسیار عزیز، دلسوز و فداکارم که پیوسته
جرعه نوش جام تعلیم و تربیت، فضیلت و انسانیت آنها بوده‌ام و همواره چراغ وجودشان
روشنگر راه من در سختی‌ها و مشکلات بوده‌است.

چکیده

پردازش نوری با توجه به مزایای بسیار نسبت به مدارات الکترونیکی مورد توجه است. کریستال‌های فوتونی ابرازی چند منظوره جهت ساخت دستگاه‌هایی با ابعادی در حد چند طول موج نور در اختیار ما قرار می‌دهد و به عنوان یکی از مهم‌ترین موضوعات مورد مطالعه در زمینه مخابرات نوری به شمار می‌رود. آنها خصوصیات منحصر به فردی مانند سرعت بالا، امکان فشردن سازی، مصرف توان پایین و محبوس کردن توان را دارند. از این رو اخیراً گیت‌های منطقی تمام نوری توجهات بسیاری را بدلیل امکانات بالقوه فراوان در زمینه محاسبات نوری و پردازش سیگنال به خود جلب کرده است. راه‌های گوناگونی جهت تحقق بخشیدن به گیت منطقی تمام نوری وجود دارد. با اصلاح خواص کریستال فوتونیک، مانند تغییر در ساختار بی‌نقص کریستال و یا استفاده از اثرات غیرخطی، می‌توان آنها را جهت تحقق بخشیدن دستیابی به گیت‌های منطقی تماماً نوری و کامپیوترهای نوری بکار گرفت. در این پایان نامه با استفاده از رزوناتورهای در مسیر موجبر و بهره جستن از خاصیت غیرخطی کر یک گیت منطقی AND طراحی شده است. برای شبیه سازی گیت و مشاهده و تجزیه و تحلیل نتایج نرم افزار قدرتمند OptiFDTD استفاده شده است. همچنین محاسبات شکاف باند به وسیله روش بسط موج صفحه‌ای PWE انجام پذیرفته است.

کلمات کلیدی: کریستال فوتونیک، اثر غیر خطی کر، گیت منطقی تمام نوری

فصل اول : معرفی کریستال های فوتونی و کاربردها

۲	۱-۱- مقدمه:
۲	۲-۱- مقدمه‌های بر معادلات ماکسول
۳	۳-۱- معرفی کریستال های فوتونی و خواص آن‌ها
۴	۱-۳-۱- معادلات ماکسول در محیط های پریودیک و کریستال های فوتونی
۹	۴-۱- انواع کریستال های فوتونی
۹	۱-۴-۱- کریستال فوتونی یک بعدی
۱۰	۲-۴-۱- کریستال های فوتونی دوبعدی
۱۱	۳-۴-۱- کریستال های فوتونی سه بعدی
۱۳	۵-۱- ساخت کریستال های فوتونی
۱۳	۱-۵-۱- سیلیکون بر روی ماده عایق (SOI)
۱۴	۶-۱- کریستال های فوتونی دارای نقص
۱۵	۱-۶-۱- موجبرهای کریستال فوتونی
۱۶	۱-۱-۶-۱- موجبر کریستال فوتونی W1
۱۷	۲-۱-۶-۱- موجبر با حفره ها و میله ها تغییر شکل یافته
۱۸	۳-۱-۶-۱- موجبر شیاردار
۱۹	۷-۱- کاواک تشدیدگر کریستال فوتونی
۱۹	۱-۷-۱- موجبر و کاواک تشدید تزویج شده کناری
۲۱	۲-۷-۱- حفره های تشدید داخل خط
۲۲	۸-۱- نتیجه گیری

فصل دوم: اثرات غیرخطی در کریستال فوتونی

۲۴	۱-۲- علل ظهور اثرات غیرخطی در کریستال فوتونی
۲۵	۲-۲- خواص غیرخطی نیمه هادی ها
۲۶	۱-۲-۲- پراکندگی رامان برانگیخته (SRS):
۲۷	۲-۲-۲- پراکندگی بریلیون برانگیخته (SBS):
۲۸	۳-۲-۲- اثرات غیرخطی کر
۲۹	۴-۳-۲- مدولاسیون خود فازی: SPM
۲۹	۵-۳-۲- مدولاسیون فاز متقابل: XPM
۳۰	۶-۳-۲- ترکیب چهار موج : FWM
۳۲	نتیجه گیری:

فصل سوم: گیت‌های منطقی

مقدمه:	۳۴
۳-۱- جایگزینی الکترون با فوتون	۳۴
۳-۲- عملگرهای منطقی	۳۴

فصل چهارم: شبیه‌سازی و نتایج

۴-۱- مقدمه	۴۰
۴-۲- معرفی ساختارهای کریستال فوتونیک	۴۰
۴-۲-۱- تجزیه و تحلیل ساختار کریستال	۴۱
۴-۲-۱-۱- روش بسط موج صفحه‌ای	۴۲
۴-۲-۱-۲- روش ماتریس انتقالی	۴۴
۴-۲-۱-۳- روش خط انتقال	۴۵
۴-۲-۲- مقایسه روش‌های تحلیل کریستال‌های فوتونی	۴۶
۴-۳- ساختار مربعی میله در هوا	۴۷
۴-۳-۱- محاسبه شکاف باند	۴۹
۴-۳-۲- طراحی کاواک تشدید	۵۰
۴-۴- طراحی گیت منطقی AND با استفاده از نقص خطی و استفاده از اثر غیرخطی کر در کریستال فوتونیک	۵۲
با ساختار مستطیلی	۵۲
۴-۴-۱- بررسی نتایج شبیه‌سازی گیت منطقی AND با استفاده از نقص خطی و استفاده از اثر غیرخطی کر	۵۴
در کریستال فوتونیک با ساختار مستطیلی	۵۴
۴-۴-۱-۱- نتایج اعمال ورودی به کانال ۱	۵۴
۴-۴-۱-۲- نتایج اعمال ورودی به کانال ۲	۵۵
۴-۴-۱-۳- نتایج اعمال ورودی به کانال ۱ و ۲ به صورت همزمان	۵۵
۴-۵- ساختار شش ضلعی میله‌های هوا با بستر INP	۵۷
۴-۵-۱- محاسبه شکاف باند	۵۸
۴-۶- طراحی گیت منطقی AND با استفاده از نقص خطی و استفاده از اثر غیرخطی کر در کریستال فوتونیک	۶۰
با ساختار شش ضلعی	۶۰
۴-۶-۱-۱- نتایج اعمال ورودی به کانال ۱ برای مد TE	۶۱
۴-۶-۱-۲- نتایج اعمال ورودی به کانال ۲ برای مد TE	۶۱
نتیجه‌گیری	۶۲

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱- نتیجه‌گیری	۶۴
۵-۲- پیشنهادات	۶۴

فهرست شکل‌ها

شکل	صفحه
شکل ۱-۱	ساختار پشته چند لایه محدود [۴] ۷
شکل ۲-۱	منحنی پاشیدگی مربوط به ساختار پشته چندلایه. منحنی نشان داده شده با خط تیره معرف منحنی پاشیدگی محیطی همگن، با ضریب شکست $(D_1 N_1 + D_2 N_2) / A = 1.5$ است [۴] ۷
شکل ۳-۱	شمایی از ساختارهای کریستال فوتونی دو بعدی با ساختار چهارضلعی (به شکل ساختاری متناوب از میله‌های دی الکتریک در ماده زمینه- نوعاً هوا-) و نیز با ساختار شش ضلعی (به شکل ساختاری متناوب از ستون‌های نوعاً هوایی در ماده زمینه)، نمودارهای ناحیه بریلوین و و بریلوین ساده شده و نیز نمودارهای شکاف باند فرکانس به ازای تابش‌هایی با قطبیدگی TE و TM [۶] ۹
شکل ۴-۱	کریستال فوتونی یک بعدی [۷] ۱۰
شکل ۵-۱	کریستال فوتونی دو بعدی [۷] ۱۰
شکل ۶-۱	ساختار باند فوتونی برای آرایه مربعی با $R=0.2A$ [7] ۱۱
شکل ۷-۱	ساختار یابلونویت برای کریستال سه بعدی [۸] ۱۲
شکل ۸-۱	زاویه و جهت تابش نور فرودی در شکاف باند ۱۳
شکل ۹-۱	فرایند ساخت کریستال فوتونی روی ویفر SOI با لیتوگرافی اشعه فرابنفش و زدایش عمیق [۱۰] ۱۴
شکل ۱۰-۱	ایجاد نقص در ساختار کریستال فوتونی با ساختار شش ضلعی که به ترتیب از چپ به راست منجر به پیاده سازی یک تشدیدگر، یک موجبر و یک سطح آینه‌ای شده است [۴] ۱۵
شکل ۱۱-۱	موجبر کریستال فوتونی که با حذف یک ردیف از حفره‌های هوایی به وجود آمده است [۱۴] ۱۷
شکل ۱۲-۱	موجبر کریستال فوتونی: (A) با میله‌های کوچکتر شده: (B) با حفره‌های بزرگتر شده [۱۵] ۱۸
شکل ۱۳-۱	موجبر کریستال فوتونی حاصل از ایجاد نقصی به صورت یک شیار و دیاگرام باند فرکانس آن ۱۹
شکل ۱۴-۱	برهم کنش موجبرهای کریستال فوتونی و کاواک تشدید. (الف) تزویج کاواک با یک موجبر، در این حالت برهم کنش کاواک تشدید با موجبر منجر به بازتاب بخشی از توان نوری که طول موج آن با طول موج کاواک تشدید یکسان است، خواهد شد. (ب) تزویج کاواک تشدید با دو موجبر، کاواک تشدید می‌تواند به ازای طول موج‌های تشدید نور را از یک موجبر به موجبر دیگر تزویج نماید [۷] ۲۰
شکل ۱۵-۱	حفره تشدید داخل خط کریستال فوتونی به عنوان فیلتر انتقالی گزیننده طول موج. تنها طول موج تشدید از این کاواک عبور کرده و بقیه طول موج‌ها بازتاب می‌شوند [۱۷] ۲۲
شکل ۱-۳	عملگر AND ۳۵
شکل ۲-۳	پیاده سازی عملگر AND با استفاده از CMOS ۳۵
شکل ۳-۳	تصویر شماتیکی گیت AND طراحی شده توسط PREETI RANI [22] ۳۷
شکل ۴-۳	گیت طراحی شده توسط YI-PIN YANG و همکاران [23] ۳۷
شکل ۱-۴	فرایند تجزیه و تحلیل کریستال‌های فوتونی با روشهای عددی ۴۲
شکل ۲-۴	نمایش تغییرات ضریب دی الکتریک در ساختار یک بعدی. ۴۳
شکل ۳-۴	یک تک سلول از ساختار پرپودیک ۴۵
شکل ۴-۴	شبکه دو بعدی کریستال فوتونیک طراحی شده شامل میله‌های سیلیسیم در هوا با ساختار مربعی ۴۸
شکل ۵-۴	شمای دو بعدی کریستال فوتونیک طراحی شده شامل میله‌های سیلیسیم در هوا با ساختار مربعی ۴۸

- شکل ۴-۶- منحنی پاشیدگی برای ساختار کریستال فوتونیک برای قطبش TE ۴۹
- شکل ۴-۷- منحنی پاشیدگی برای ساختار کریستال فوتونیک برای قطبش TM ۵۰
- شکل ۴-۸- شمای دو بعدی کریستال فوتونیک طراحی شده متشکل از میله‌های سیلیسیم در هوا با ساختار مربعی دارای نقص خطی حذف میله‌ها. منبع نور گوسی کنترل شده در سمت چپ و نقطه ناظر در سمت راست (سبز رنگ) ۵۱
- شکل ۴-۹- طول موج تشدید از دید نقطه ناظر ۵۱
- شکل ۴-۱۰- شمای سه بعدی انتشار مد TE در کریستال فوتونیک به همراه نقص خطی ۵۲
- شکل ۴-۱۱- شمای دو بعدی طراحی شده برای انتشار مد TE در کریستال فوتونیک برای گیت AND ۵۳
- شکل ۴-۱۲- شمای سه بعدی طراحی شده برای انتشار مد TE در کریستال فوتونیک برای گیت AND ۵۳
- شکل ۴-۱۳- شمای سه بعدی برای انتشار مد TE در کریستال فوتونیک برای گیت AND از کانال ۱ ۵۴
- شکل ۴-۱۴- شمای سه بعدی برای انتشار مد TE در کریستال فوتونیک برای گیت AND از کانال ۲ ۵۵
- شکل ۴-۱۵- شمای سه بعدی برای انتشار مد TE در کریستال فوتونیک برای گیت AND از کانال ۱ و ۲ و اندازه‌ی توان در کانال خروجی OUT ۵۶
- شکل ۴-۱۶- نمودار اندازه گیری نسبت توان کانال OUT به کانال ۱ و ۲ ۵۶
- شکل ۴-۱۷- شمای دو بعدی کریستال فوتونیک طراحی شده شامل میله‌های هوا در بستر INP ۵۷
- شکل ۴-۱۹- منحنی پاشیدگی برای ساختار کریستال فوتونیک برای قطبش TE ۵۹
- شکل ۴-۲۰- منحنی پاشیدگی برای ساختار کریستال فوتونیک برای قطبش ۵۹
- شکل ۴-۲۱: شمای دو بعدی کریستال فوتونیک طراحی شده شامل میله‌های هوا در بستر INP به همراه نقص های نقطه ای و ۳ میله غیرخطی ۶۰
- شکل ۴-۲۲- شمای سه بعدی برای انتشار مد TE در کریستال فوتونیک برای گیت AND از کانال ۱ ۶۱
- شکل ۴-۲۳- شمای سه بعدی برای انتشار مد TE در کریستال فوتونیک برای گیت AND از کانال ۱ ۶۲

فهرست جدول ها

صفحه

جدول

- جدول ۴-۱- مقایسه انواع روش‌های تحلیل کریستال فوتونی ۴۷

فصل اول

معرفی کریستال‌های فوتونی و کاربردها

۱-۱- مقدمه:

کریستال‌های فوتونی^۱ بهترین مواد شناخته شده برای ساخت مدارهای مجتمع نوری هستند. در این مواد ضریب شکست تابعی متناوب از مکان است و این تناوب در ابعادی نزدیک به طول موج نور است. واژه کریستال از آن جهت اطلاق می‌شود که این مواد از تکرار و تناوب یک سلول اولیه به وجود می‌آیند. کاربرد واژه فوتونیک نیز به دلیل تاثیرگذاری کریستال‌های فوتونی بر خصوصیات انتشار فوتون‌ها است. در این فصل ابتدا مفاهیم اولیه کریستال‌های فوتونی و منشأ پیدایش شکاف باند فوتونی و معادلات مربوط به طور خلاصه مورد بررسی قرار گرفته‌است، سپس انواع کریستال‌های فوتونی معرفی و مشخصات آن‌ها بیان شده‌است. روشهای ساخت کریستال‌های فوتونی تشریح و نهایتاً کریستال‌های دارای نقص معرفی و ویژگی‌های بهبود یافته آن‌ها در اثر ایجاد نقص بیان گردیده است.

۱-۲- مقدمه‌ای بر معادلات ماکسول

معادلات ماکسول که در حوزه الکترونیک نوری به‌عنوان اساسی‌ترین مفاهیم شناخته می‌شوند توسط روابط زیر بیان می‌شوند:

(۱-۱)

$$\nabla \cdot D = \rho$$

(۲-۱)

$$\nabla \cdot B = 0$$

(۳-۱)

$$\frac{\partial B}{\partial t} = -\nabla \times E$$

(۴-۱)

$$\frac{\partial D}{\partial t} = \nabla \times H - j$$

¹ Photonic-Crystal

معادله (۱-۱) قانون گوس را برای میدان‌های الکتریکی بیان می‌کند، معادله (۲-۱) قانون گاوس را برای میدان‌های مغناطیسی نشان داده و توصیف می‌کند، معادله (۳-۱) قانون فارادی را تشریح و معادله (۴-۱) قانون امپر را بیان می‌کند. در این معادلات D بردار چگالی جابجایی الکتریکی و ρ چگالی بار الکتریکی است. در رابطه (۲-۱) و (۳-۱) مقدار B همان القای مغناطیسی (بر حسب وبر بر متر مربع) و E برابر بردار میدان الکتریکی (بر حسب ولت بر امپر) است. پارامتر H نیز معرف بردار میدان مغناطیسی (بر حسب امپر بر متر) است و J هم چگالی جریان هادی است. در زمینه‌های مورد نظر برای بیان پاسخ‌های معادلات اغلب از مفهوم مود استفاده می‌کنیم. مودها جواب‌هایی از معادله ماکسول هستند که حتی بدون وجود منابع نوری داخلی منتشر می‌شوند، از این رو می‌توان پارامترهای ρ و J را صفر در نظر گرفت. علاوه بر معادله‌های ماکسول به معادله‌های اساسی دیگری نیز نیاز است که معرف پاسخ ماده به میدان‌های الکترومغناطیس می‌باشند. در محیط‌های خطی معادله‌های زیر برقرارند:

$$D = \varepsilon E \text{ و } \varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (۵-۱)$$

$$B = \mu H \text{ و } \mu = \mu_0 \mu_r \quad (۶-۱)$$

$$J = \sigma E \quad (۷-۱)$$

در روابط فوق μ_0 و μ_r به ترتیب تانسورهای نفوذپذیری در فضای آزاد و نفوذپذیری نسبی هستند که مقدار μ_0 عبارتست از $4\pi \times 10^{-7}$ و بر حسب (هانری بر متر) معرفی می‌شود و در حالت کلی μ را نفوذپذیری مغناطیسی می‌نامند. همچنین ε_0 و ε_r به ترتیب تانسورهای گذردهی برای فضای آزاد و گذردهی نسبی هستند که مقدار ε_0 برابر $8.84e^{-12}$ و بر حسب (فاراد بر متر) است و در حالت کلی ε را گذردهی الکتریکی می‌نامند.

۳-۱- معرفی کریستال‌های فوتونی و خواص آنها

کریستال‌های فوتونی ساختارهای متناوبی هستند که از مواد دی‌الکتریک ساخته می‌شوند. نواحی با ضریب دی‌الکتریک متفاوت به صورت تناوبی تکرار شده و این تناوب تعیین کننده طول موج نور قابل انتشار است. یک کریستال فوتونی با ایجاد تغییرات متناوب در ضریب شکست مواد دی‌الکتریک و یا با ایجاد ردیف منظمی از حفره‌ها در دی‌الکتریک ایجاد می‌گردد [۱]. هنگامی که نور در ساختار متناوب منتشر می-

شود در هر برخورد با ماده دی‌الکتریک بازتاب می‌شود. در نتیجه تداخل بازتاب کلی در طول موج مشخصی رخ می‌دهد و نور با آن طول موج‌ها نمی‌تواند از داخل ماده عبور نماید و از آن خارج شود. مجموعه این طول موج یا فرکانس‌ها شکاف باند نوری^۱ ممنوعه نام دارد که پایه عملکرد کریستال‌های فوتونی است [۲].

عملکرد کریستال‌های فوتونی در مقابل امواج نوری، شبیه به عملکرد نیمه رساناها برای الکترون‌ها است. در ساختارهای نیمه رسانا، اتم‌ها و مولکول‌ها به طور متناوب در شبکه کریستالی قرار گرفته‌اند و این امر باعث ایجاد یک پتانسیل متناوب برای الکترون‌های موجود در ساختار کریستال می‌شود. تحت تاثیر این پتانسیل متناوب، الکترون‌های دارای مقادیر انرژی خاص اجازه انتشار در درون ساختار کریستال را ندارند. به محدوده این سطوح انرژی باند ممنوعه انرژی گفته می‌شود. در ساختارهای نیمه رسانا، این گاف انرژی یک شکاف باند کامل است یعنی در همه جهات در داخل کریستال وجود دارد. در ساختارهای کریستال فوتونی نیز برای نور، با ایجاد تغییرات میکروسکوپی^۲ در مواد دی‌الکتریک به پتانسیل تناوبی مشابهی دست می‌یابیم. اگر تفاوت ضریب دی‌الکتریک مواد تشکیل دهنده کریستال به قدر کافی زیاد باشد و جذب نور به وسیله این مواد کم باشد، پراکنش^۳ امواج نوری در برخورد با مواد دی‌الکتریک می‌تواند پدیده‌های مشابه را برای فوتون‌ها ایجاد کند و باعث باز شدن شکاف باند نوری در این ساختارها شود [۳].

۱-۳-۱- معادلات ماکسول در محیط‌های پر یودیک و کریستال‌های فوتونی

هسته‌ها و الکترون‌ها در شبکه‌های بلور حالت جامد به ترتیب متناظر با مواد دی‌الکتریک میکروسکوپی و امواج الکترومغناطیس در کریستال‌های فوتونی هستند. از این رو رفتار کریستال‌های فوتونی توسط معادله‌های میکروسکوپی ماکسول قابل مدل سازی است. در کریستال‌های فوتونی توجه ما اغلب معطوف مواد همسان گرد است، جایی که کمیت های ϵ و μ اعدادی حقیقی هستند. به علاوه در زمینه‌های مورد نظر ما فرض $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0, \mu = \mu_r \mu_0$ را لحاظ خواهیم نمود. با توجه به معادله‌های کرل ماکسول و نیز معادله‌های (۵-۱) و (۶-۱)، می‌توان روابط زیر را استخراج کرد:

$$(۸-۱)$$

$$\nabla \times \nabla \times E = \epsilon \mu \omega^2 E$$

و یا:

$$\nabla(\nabla \cdot E) - \nabla^2 E = \epsilon \mu \omega^2 E \quad (۹-۱)$$

^۱ photonic band gap

^۲ macroscopic

^۳ scattering

در محیط‌هایی که در آن‌ها ϵ به طور تکه‌ای^۱ ثابت است، از معادله (۳-۱) خواهیم داشت: $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$ و از این رو معادله (۹-۱) به معادله هلم هولتز^۲ تبدیل خواهد شد:

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \epsilon \mu \omega^2 \mathbf{E} = 0 \quad (10-1)$$

در محیط‌های همگون که در آن‌ها مقدار ϵ ثابت است، جواب‌ها (یا مودها) به شکل موج‌هایی مسطح^۳ هستند:

$$\bar{\mathbf{E}} = E_0 \mathbf{e}^{-j\bar{\mathbf{k}}\bar{\mathbf{r}}} \quad (11-1)$$

که در آن $\bar{\mathbf{k}}$ معرف عدد موج بوده و میدان نیز عرضی^۴ است: جهت $\bar{\mathbf{k}}$ معرف جهت انتشار بوده و مقدار دامنه آن از رابطه زیر قابل حصول است:

$$k = \sqrt{\epsilon \mu} \omega = \frac{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}{c} \omega = \frac{n}{c} \omega \quad (12-1)$$

که در آن مقدار ضریب شکست معادل با: $n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$ است. وابستگی که بین پارامترهای \mathbf{k} و ω برقرار است، عموماً به رابطه پاشیدگی^۵ موسوم است. در محیط‌های خطی این رابطه به شکل یک خط مستقیم است. اکنون می‌توان جواب‌ها را با توجه به این امر که به ازای هر مقدار ω ، یک بردار موج $\bar{\mathbf{k}}$ نظیر آن وجود دارد که توسط رابطه (۱۲-۱) قابل بیان است مشخص نمود. باید توجه داشت که در رابطه فوق از پاشیدگی ماده صرف نظر شده است، به این معنی که در ناحیه فرکانسی مورد نظر ضریب شکست ماده ثابت فرض شده است.

اگر ضریب شکست محیط تناوبی باشد، رابطه پاشیدگی که کاملاً قابل تنظیم است، حاصل خواهد شد که به پاشیدگی هندسی^۶ موسوم است. بسیاری از ویژگی‌ها و کاربردهای کریستال‌های فوتونی صرفاً از شکل پاشیدگی هندسی آن‌ها ناشی می‌شود.

^۱ Piecewise

^۲ Helmholtz

^۳ Plane wave

^۴ Transverse

^۵ Dispersion relation

^۶ Geometric dispersion

اکنون ساختارهای دارای فرم متناوب را مورد بررسی قرار می دهیم. در یک کریستال‌های فوتونی یک بعدی که در امتداد محور z متناوب است داریم:

$$\varepsilon(z) = \varepsilon(z + a) \quad (13-1)$$

که در آن a معرف دوره تناوب شبکه است. تنها با استفاده از همین رابطه تقارنی می توان نشان داد که رابطه عمومی مودها به صورت زیر است:

$$E(z) = U_k(z) e^{-jk_z(\omega)z} \quad (14-1)$$

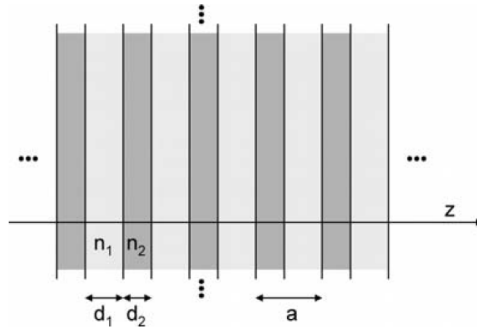
در رابطه فوق $U_k(z)$ دارای وابستگی تناوبی مشابه با ساختار تناوبی شبکه است یعنی:

$$U_k(z + a) = U_k(z) \quad (15-1)$$

مودهای نشان داده شده در رابطه (15-1) به مودهای بلاخ¹ موسوم هستند و k_z نیز ثابت انتشار بلاخ نامیده می شود. در این حالت رابطه پاشیدگی $k_z(\omega)$ دیگر به هیچ وجه همان خط مستقیمی که در رابطه (12-1) مشاهده شد، نیست. می توان این امر را با استفاده از یک مثال مرسوم یعنی پشته² چندلایه، (شکل 1-1) تشریح کرد. با بررسی نمونه فوق بسیاری از ویژگی های عمومی کریستال‌های فوتونی آشکار خواهد شد.

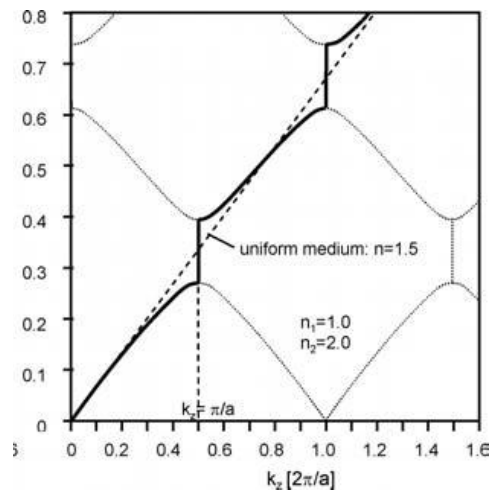
¹ Blochs mode

² Stack



شکل ۱-۱: ساختار پشته چند لایه محدود [۴]

منحنی پاشیدگی ساختار فوق به ازای موادی با ضریب شکست $n_1 = 1$ و $n_2 = 2$ و ضخامت‌هایی نظیر $d_1 = 0.625a$ و $d_2 = 0.375a$ ، در شکل ۲-۱ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱: منحنی پاشیدگی مربوط به ساختار پشته چند لایه. منحنی نشان داده شده با خط تیره معرف منحنی پاشیدگی محیطی همگن، با ضریب شکست $(d_1 n_1 + d_2 n_2) / a = 1.5$ است [۴].

حال توجه خود را به پیدایش شکاف باند فرکانسی معطوف می‌کنیم. به ازای فرکانس‌های داخل شکاف باند، k_z متناظری وجود ندارد، بنابراین هیچ مودی نیز وجود نخواهد داشت. اما به ازای فرکانس‌های خارج از شکاف باند، بینهایت نظیر وجود دارد. با توجه به تناوبی بودن رابطه پاشیدگی، خواهیم دید که جواب‌ها در دوره تناوب تکراری بوده و بنابراین می‌توان کل اطلاعات مورد نیاز را از مقادیر k_z متناظر فاصله $[-\frac{\pi}{a}, \frac{\pi}{a}]$ به دست آورد. از دیگر سو به دلیل تقارن موجود بین k_z و $-k_z$ کفایت تنها مقادیر در گستره $k_z = [0, \frac{\pi}{a}]$ مورد ملاحظه قرار گیرند، که به ناحیه بریلوین ساده^۱ شده موسوم است. منحنی‌های $\omega(k)$ به

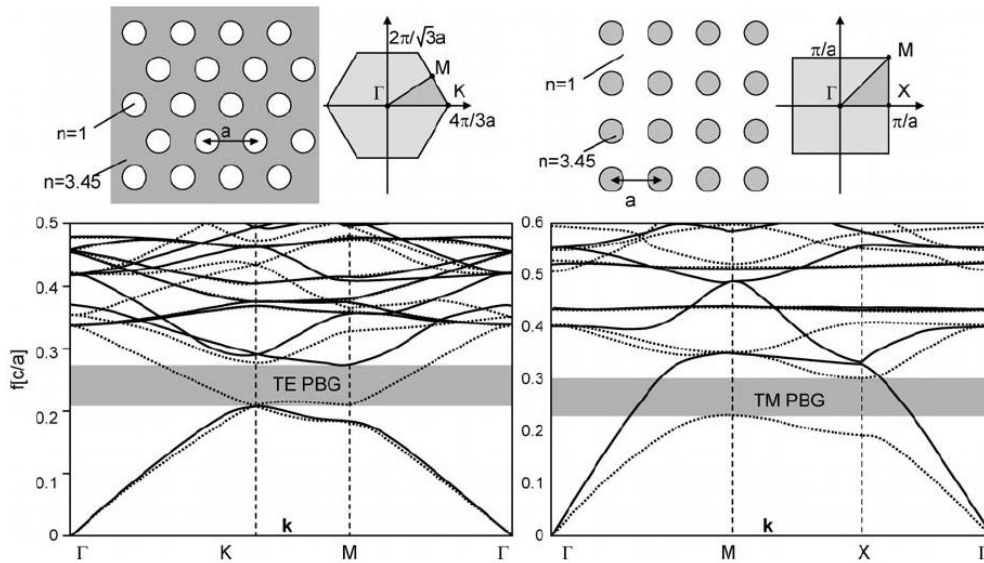
^۱ Reduced brillouin zone

نمودارهای باند یا ساختارهای باند موسوم هستند. منشا ایجاد شکاف های باند را می توان به شکل زیر تفسیر کرد:

تمرکز میدان مربوط به مودی که دقیقاً در زیر شکاف باند قرار دارد، بیشتر در نواحی با ضریب شکست بالاتر ساختار است، در صورتی که مودی که دقیقاً در بالای شکاف باند قرار گرفته اکثر انرژی خود را در نواحی از ساختار با ضریب شکست پایین تر متمرکز می نماید. موضعی شدن انرژی در نواحی با ضریب شکست بالا با گرایش به فرکانس های پایین تر توأم است و برعکس. این امر منجر به ایجاد اختلاف در فرکانس های بین دو مود و ایجاد یک شکاف باند فرکانس می شود. هرچه اختلاف ضریب شکست افزایش یابد، اندازه شکاف باند نیز بیشتر خواهد شد. شکاف باند ایجاد شده در ساختارهای فوتونیک کریستال یک بعدی ناشی از وجود اختلاف ضریب شکست در مواد تشکیل دهنده ($n_1 \neq n_2$) و نیز وجود تابش در راستای قائم بر روی لایه های متناوب است [۵]. در ساختارهای کریستال فوتونی دوبعدی و سه بعدی زاویه تابش محدودیتی برای شکاف باند فرکانس ایجاد نخواهد کرد. درون شکاف باند، k_z دارای یک بخش موهومی است. این به آن معنی است که مودها به طور نمایی میرا شده و از بین می روند. اگر ساختار کریستال فوتونی کاملاً نامحدود باشد، هیچ راهی برای تحریک چنین مودهایی وجود ندارد. اما می توان آن ها را در داخل نقص های^۱ ساختار تحریک نمود. در محل نقص ایجاد شده در ساختار کریستال فوتونی، مثلاً در مورد تشدیدگرها^۲ می توان میدان های الکترومغناطیس را موضعی کرد. ارتباط بین مودهای بلاخ نامحدود و یک ساختار تناوبی محدود را می توان با بررسی طیف انتقال یک قطعه کریستال فوتونی چندلایه مشاهده کرد. اکنون کریستال های فوتونی دوبعدی را مورد بررسی قرار می دهیم. در شکل ۱-۳ شمایی از ساختارهای کریستال فوتونی دوبعدی و نمودارهای مربوطه نشان داده شده است.

¹ Defects

² Resonators



شکل ۱-۳: شمایی از ساختارهای کریستال فوتونی دو بعدی با ساختار چهارضلعی (به شکل ساختاری متناوب از میله‌های دی الکتریک در ماده زمینه - نوعاً هوا-) و نیز با ساختار شش ضلعی (به شکل ساختاری متناوب از ستون‌های نوعاً هوایی در ماده زمینه)، نمودارهای ناحیه بریلوین و و بریلوین ساده شده و نیز نمودارهای شکاف باند فرکانس به ازای تابش هایی با قطبیدگی TE و TM [۶].

۱-۴- انواع کریستال‌های فوتونی

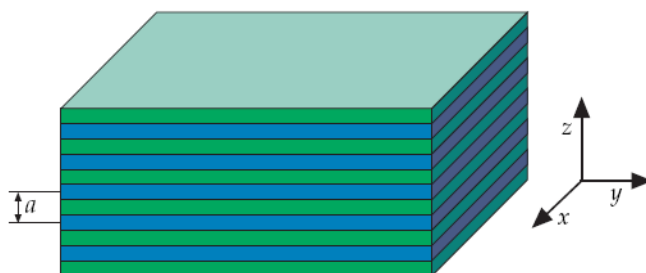
بسته به اینکه تناوب محیط کریستالی در چند بعد تکرار شود، کریستال‌های فوتونی به سه دسته یک، دو و سه بعدی تقسیم می‌شوند. همچنین اندازه تناوب محیط محدوده باند فرکانسی ممنوعه را تعیین می‌کند.

۱-۴-۱- کریستال فوتونی یک بعدی

ساده ترین ساختار ممکن برای کریستال‌های فوتونی که در شکل ۱-۵ نشان داده شده است، شامل لایه‌های متناوب مواد با ثابت دی‌الکتریک متفاوت است (فیلم چند لایه) که ضریب شکست آن‌ها تنها در یک جهت تغییر می‌کند اما در جهات دیگر همسانگرد^۱ است. لرد رابلی در سال ۱۸۸۷ اولین تحلیل مشخصه‌های نوری فیلم‌های چند لایه را منتشر کرد. این نوع از کریستال‌های فوتونی مانند آینه (آینه براگ^۲) برای نور با فرکانس مشخص عمل می‌نمایند.

^۱ Homogeneous

^۲ Bragg Mirror

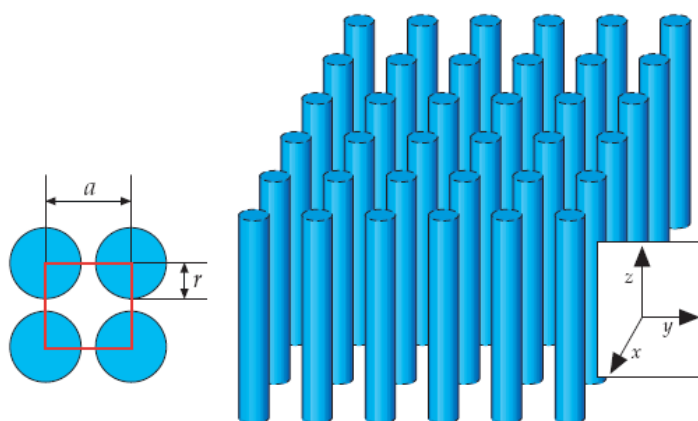


شکل ۱-۴: کریستال فوتونی یک بعدی [۷]

کریستال‌های فوتونی یک بعدی با توجه به مشخصاتشان می‌توانند شکاف باند نوری در جهت تناوب داشته باشند و شبیه سازی آن‌ها راحت‌تر بوده اما تحریک این ساختارها در یک راستا چالش عملی است [۷].

۱-۴-۲- کریستال‌های فوتونی دوبعدی

کریستال‌های فوتونی دو بعدی در دو محور خود متناوب بوده و در راستای محور سوم همجنس هستند. یک نمونه از این نوع کریستال در شکل ۱-۵ نشان داده شده است که شامل ستون‌های دی‌الکتریک با شبکه مربعی هستند. برای مقادیر مشخصی از فواصل بین ستون‌ها، این کریستال می‌تواند شکاف باند نوری در محور xy داشته باشد. در این شکاف، هیچ حالت عبور اجازه داده نمی‌شود و نور وارد شده بازتاب می‌شود. بر خلاف کریستال یک بعدی این کریستال می‌تواند در دو جهت از انتشار نور جلوگیری کند.



شکل ۱-۵: کریستال فوتونی دو بعدی [۷]

همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود این کریستال از ستون‌های دی‌الکتریک با ساختار شبکه مربعی در هوا قرار گرفته است. میله‌ها دارای شعاع r و ثابت دی‌الکتریک ϵ بوده و ماده در جهت z همجنس و در جهات x و y متناوباً تکرار می‌شود.