

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



وزارت علوم، تحقیقات و فناوری  
دانشگاه تربیت معلم آذربایجان  
دانشکده علوم  
گروه فیزیک

پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد  
رشته فیزیک اتمی و مولکولی (اپتیک و لیزر)

## مطالعه ی خواص مدهای نقص در بلورهای فوتونیک ی یک بعدی

اساتید راهنما:

دکتر عبدالرحمن نامدار

دکتر صمد روشن انتظار

استاد مشاور:

دکتر کاظم جمشیدی قلعه

پژوهشگر:

سعید رنجبریان

شهریور / ۱۳۸۹

تبریز / ایران

# تقديم به پدر و مادر عزيزم

## تقدیر و تشکر:

منت خدای را عزوجل که طاعتش موجب قربت است و به شکر اندرش مزید نعمت. هر نفسی که فرو می رود ممد حیات است و چون بر می آید مفرح ذات. پس در هر نفسی دو نعمت موجود است و بر هر نعمت شکری واجب.

خداوند منان را سپاس گذارم که با الطاف عنایات خویش بذر هنر و دانش را در زمین دلمان نهاد و با باران توفیق و آفتاب ستاری خویش آن را پرورش داد و با داس رحمتش درو کرد. حمد و سپاس به درگاه ایزد منان که توفیق داد تا مرحله ی دیگری از مراحل تحصیل خود را به پایان برسانم. از زحمات و رهنمودهای عالمانه اساتید راهنما، آقایان دکتر عبدالرحمن نامدار و دکتر صمد روشن انتظار که با راهنمایی های خردمندانه خویش مرا در انجام این تحقیق یاری نموده و در این راه از هیچ مساعدتی دریغ نفرموده اند و جناب آقای دکتر کاظم جمشیدی قلعه که مشاورت این پایان نامه را برعهده داشته اند و در تمام این مدت این جانب را یاری نموده اند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

و دیگر اینکه، خدا را بسی شاکرم که از روی کرم پدر و مادری فداکار نصیبم ساخت تا در سایه درخت پر بار وجودشان بیاسایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و در سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم.

باشد که یادآوری، نمایان گر سپاس بی پایان من به کمک های بی دریغ آنان به شمار آید.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
یک	چکیده
۱	مقدمه

### فصل اول : درآمدی بر اپتیک بلورهای فوتونیک

۴	۱-۱ مقدمه.....
۵	۲-۱ بلورهای فوتونیک.....
۸	۳-۱ انتشار امواج الکترومغناطیسی در لایه‌های متناوب.....
۱۳	۴-۱ امواج بلاخ و ساختارهای گاف باند بلور فوتونیک.....
۱۷	۵-۱ بازتاباننده براگ.....
۲۰	۶-۱ بلورهای فوتونیک یک بعدی.....
۲۰	۱-۶-۱ فیلم چندلایه ای.....
۲۱	۲-۶-۱ منشا فیزیکی گاف باندهای فوتونیک.....
۲۵	۳-۶-۱ مدهای میرا در گاف های باند فوتونیک.....
	۴-۶-۱ محدوده فرکانسی وسیع تراگسیل اندک در ساختارهای چاه کوانتومی فوتونیک یک بعدی.....
۲۷	۷-۱ مدهای جایگزیده در نقص ها.....
۳۱	۸-۱ اهمیت بلورهای فوتونیک و کاربرد آنها.....
۳۴	۱-۸-۱ کاواک ها.....
۳۴	۲-۸-۱ موجبرها.....
۳۵	۳-۸-۱ فیبرها.....
۳۶	۴-۸-۱ لیزرها.....

### فصل دوم : نقص در بلورهای فوتونیک یک بعدی

۴۱	۱-۲ مقدمه.....
۴۲	۲-۲ نقص تدریجی در بلورهای فوتونیک.....
۴۲	۱-۲-۲ فرمول بندی.....

۴۵	نتایج عددی و بحث های مربوطه.....
۴۹	نقص بلور مایع در بلورهای فوتونیکی.....
۴۹	معرفی بلورهای مایع.....
۵۱	طبقه بندی بلور مایع ها.....
۵۴	نقص بلور مایع در بلورهای فوتونیکی.....

## فصل سوم : مطالعه مدهای الکترومغناطیسی جایگزیده و طیف تراگسیلی بلور

### فوتونیکی یک بعدی با نقص های شبکه ای

۵۸	مقدمه.....
۵۹	ویژگی مدهای نقص در بلور فوتونیکی نامحدود.....
۵۹	فرمولبندی.....
۷۱	نتایج عددی و بحث ها.....
۷۶	بررسی طیف و ضریب تراگسیلی بلور فوتونیکی محدود.....
۷۶	فرمولبندی.....
۷۹	نتایج عددی و بحث ها.....
۸۳	بررسی طیف تراگسیلی بلور فوتونیکی شامل دو نقص شبکه ای.....
۸۷	نتیجه گیری.....
۸۸	منابع.....

Abstract

## فهرست شکل ها و نمودارها

- شکل (۱-۱). طرحی از بلورهای فوتونیکی (a) یک بعدی، (b) دو بعدی و (c) سه بعدی..... ۷
- شکل (۲-۱). قسمتی از یک نوع محیط لایه ای متناوب..... ۹
- شکل (۳-۱). دامنه های موج تخت در  $n$  امین سلول و سلولهای مجاور..... ۱۰
- شکل (۴-۱). ساختار باند موجهای TE در صفحه  $\omega, \beta$  ( موازی فصل مشترک است). مناطق تیره بیانگر باندهای مجاز است..... ۱۵
- شکل (۵-۱). ساختار باند موجهای TM در صفحه  $\omega, \beta$  ( موازی فصل مشترک است) نقطه چین بیانگر  $\beta = (\omega/c)n_2 \sin\theta_B$  است. مناطق تیره نشان دهنده ی باندهای مجاز است..... ۱۵
- شکل (۶-۱). رابطه ی پاشندگی بین  $\omega$  و  $K$ , وقتی  $\beta = 0$  (فرود عمود) منحنی نقطه چین بیانگر قسمت مجازی  $K$  است..... ۱۶
- شکل (۷-۱). طرحی از یک نوع بازتاباننده براگ با  $N$  سلول متناوب..... ۱۷
- شکل (۸-۱). طیف بازتابی امواج TE برای یک بازتاباننده نوعی براگ با ۱۵ سلول واحد و در زاویه های متفاوت برخوردی..... ۱۹
- شکل (۹-۱). طیف بازتابی امواج TM برای یک بازتاباننده نوعی براگ با ۱۵ سلول واحد و در زاویه های متفاوت برخوردی..... ۱۹
- شکل (۱۰-۱). فیلم چندلایه ای، یک بلور فوتونیکی یک بعدی. عبارت یک بعدی به این دلیل به کار گرفته می شود که تابع دی الکتریک  $\mathcal{E}(z)$  فقط در راستای محور  $Z$  تغییر می کند..... ۲۰
- شکل (۱۱-۱). ساختارهای باند فوتونیکی برای سه فیلم چند لایه مختلف. تمام آنها دارای لایه هایی به پهنای  $0.5a$  هستند. شکل سمت چپ ثابت دی الکتریک یکسان  $\mathcal{E} = 13$  دارد. در شکل وسطی  $\mathcal{E} = 13$  و  $\mathcal{E} = 12$  است. و در شکل سمت راست  $\mathcal{E} = 13$  و  $\mathcal{E} = 1$  می باشد..... ۲۲
- شکل (۱۲-۱). مدهای مربوط به کم عرض ترین گاف باند در ساختار باندی شکل (۱۱-۱) یعنی شکل وسطی، در  $k = \frac{\pi}{a}$ . (a) میدان الکتریکی برای مد واقع در بالای باند ۱؛ (b) میدان الکتریکی برای مد واقع در پایین باند ۲؛ (c) چگالی انرژی میدان الکتریکی بالای باند ۱؛ (d) چگالی انرژی میدان الکتریکی پایین باند ۲. نواحی آبی رنگ دارای ثابت دی الکتریک بالای  $\mathcal{E} = 13$  هستند..... ۲۳
- شکل (۱۳-۱). ساختارهای باند فوتونیکی دو نوع بلور فوتونیکی. طول تناوب کامل هر دو ساختار لایه ای  $a$  است. خطوط ممتد برای یک ساختار لایه ای  $AB$  با پهنای زیر لایه ای  $d_A = d_B = 0.5a$  و ثابت دی الکتریک  $\mathcal{E}_A = 1$  و  $\mathcal{E}_B = 13$  می باشد. خطوط نقطه چین نیز برای یک ساختار لایه ای  $CD$  با  $d_C = 0.68a$  و  $d_D = 0.32a$  و ثابت دی الکتریک  $\mathcal{E}_C = 1$  و  $\mathcal{E}_D = 13$  می باشد..... ۲۹

- شکل (۱-۱۴). تراگسیل ساختارهای چاه کوانتومی فوتونیکی  $(AB)_{10} / (CD)_n / (AB)_{10}$ ،  $n = 0$  (a).....  
 ۳۰.....  $n = 10$  (e) ،  $n = 5$  (d) ،  $n = 2$  (c) ،  $n = 1$  (b)
- شکل (۱-۱۵). نقص در فیلم چند لایه ای، که به واسطه دو برابر شدن ضخامت لایه ی با گذردهی الکتریکی کمتر تشکیل شده است. گفتنی است که ما می توانیم این لایه را به عنوان مرز ما بین دو فیلم چند لایه ای کامل در نظر بگیریم. منحنی قرمز رنگ نشان دهنده شدت میدان الکتریکی آن حالتی از نقص است که به این ساختار مربوط می شود.....  
 ۳۲.....
- شکل (۱-۱۶). تقسیم بندی فضای فرکانسی به حالت های میرا و منتشر شونده. در این نمودار چگالی حالت ها (تعداد مدهای مجاز در هر واحد فرکانسی) در گاف باندها ی بلور صفر است (نواحی زرد رنگ). مدها تنها به دو دلیل اجازه حضور در این نواحی را دارند، یکی زمانی که این مدها میرا هستند و دیگر آن زمانی که تقارن انتقالی شبکه با وجود یک نقص شکسته می شود. چنین مدی با رنگ قرمز نشان داده شده است.....  
 ۳۲.....
- شکل (۱-۱۷). کاواک ایجاد شده در بلور فوتونیکی در اثر وجود نقص نقطه ای.....  
 ۳۵.....
- شکل (۱-۱۸). (الف) تصویر SEM از یک موجبر در یک بلور فوتونیکی دو بعدی متشکل از یک مستطیل سیلیکون متناوب. (ب) شبیه سازی انتشار نور در حال عبور از موجبر با خمیدگی ۹۰ درجه در یک بلور فوتونیکی مربعی دو بعدی.....  
 ۳۶.....
- شکل (۱-۱۹). (الف) تصویری از بخش عرضی فیبر بلور فوتونیکی. (ب) درآوردن هسته جامد فیبر به شکل حفره هوا.....  
 ۳۷.....
- شکل (۱-۲۰). تصویری از لیزر گسیل کننده سطحی با استفاده از لایه نقص در یک بلور فوتونیکی سه بعدی.....  
 ۳۹.....
- شکل (۲-۱). طرحی از یک ساختار چند لایه ای متناوب با یک لایه نقص تدریجی.....  
 ۴۳.....
- شکل (۲-۲). طیف تراگسیلی برای منحنی تغییر خطی گوناگون نسبت گذردهی الکتریکی لایه نقص تدریجی. پارامترها:  $q_2 = 1$  ،  $p_2 = 5.3$ .....  
 ۴۶.....
- شکل (۲-۳). طیف تراگسیلی برای منحنی تغییر خطی متفاوت نسبت نفوذپذیری مغناطیسی لایه نقص تدریجی. پارامترها همان مقادیر شکل (۲-۲) را دارا می باشند.....  
 ۴۷.....
- شکل (۲-۴). طیف تراگسیل ساختاری به صورت  $(ab)^N c (ab)^{N-n}$  با  $n$  متفاوت ( $N = 30$ ).....  
 ۴۷.....
- شکل (۲-۵). طیف تراگسیلی برای ضخامت های متفاوت لایه نقص تدریجی.....  
 ۴۸.....
- شکل (۲-۶). تفاوت بین سه حالت مختلف جامد ، بلور مایع و مایع.....  
 ۵۰.....
- شکل (۲-۷-الف). ساختار بلور مایع نماتیک.....  
 ۵۳.....
- شکل (۲-۷-ب). ساختار بلور مایع سمکتیک.....  
 ۵۳.....
- شکل (۲-۸). ساختار بلور مایع کلستریک.....  
 ۵۳.....
- شکل (۲-۹). بلور فوتونیکی یک بعدی با یک نقص بلور مایع.....  
 ۵۴.....



شکل (۲-۱۰). طیف تراگسیلی بلور فوتونیک یک بعدی شامل یک لایه نقص بلور مایع به صورت تابعی از ولتاژ اعمالی.....۵۶

شکل (۳-۱). ساختار گاف باند فوتونیک یک بعدی با یک نقص شبکه ای.....۵۹

شکل (۳-۲). ساختار بلور فوتونیک با یک لایه نقص در مرکز.....۶۳

شکل (۳-۳). وابستگی فرکانسی (a) و ضریب میرایی (b) مدهای جایگزیده به ضخامت لایه نقص. خطوط نقطه چین مطابق است با  $n_d = 1.5$  در  $\theta = 0$  و خطوط ممتد با  $n_d = 1.7$  و  $\theta = \pi/2$  ;  $\omega_L$  در واحد  $c/W$  می باشد.....۷۲

شکل (۳-۴). افزایش تعداد مدهای جایگزیده با افزایش ضخامت لایه نقص ; در  $\theta = \pi/2$  و  $n_d = 1.7$ .....۷۳

شکل (۳-۵). مجذور قدرمطلق میدان یک مد جایگزیده. ضخامت لایه نقص  $W_d = 4.5 \mu m$  ،  $n_d = (a,c) 1.5$  .....۷۴

و  $n_d = (b) 1.7$  و  $A = |A_{La}^r|^2$  . مرکز لایه نقص بر مبدا ( $z=0$ ) منطبق است.....۷۵

شکل (۳-۶). وابستگی فرکانسی ضریب تراگیل یک بلور فوتونیک با  $N = 85$  لایه. ضخامت لایه نقص که در مرکز محیط لایه ای قرار دارد،  $W_d = 4.5 \mu m$  است. خطوط نقطه چین مطابق است با  $n_d = 1.5$  در  $\theta = 0$  ، و خطوط ممتد با  $n_d = 1.7$  در  $\theta = \pi/2$  ;  $\omega$  در واحد  $c/W$  است.....۷۹

شکل (۳-۷). وابستگی فرکانسی ضریب تراگیل یک نمونه با  $N = 45$  لایه. نقص در مرکز بلور فوتونیک قرار دارد. پارامترهای دیگر بلور همان مقادیر شکل (۳-۶) را دارند ;  $\omega$  در واحد  $c/W$  است.....۸۰

شکل (۳-۸). وابستگی فرکانسی ضریب تراگیل یک بلور فوتونیک با ضخامت لایه نقص  $W_d = 5.2 \mu m$  . پارامترهای دیگر بلور همان مقادیر شکل (۳-۶) را دارند ;  $\omega$  در واحد  $c/W$  است.....۸۱

شکل (۳-۹). جزئیات طیف تراگسیلی یک بلور فوتونیک در  $\theta = \pi/2$  با موقعیت های مختلف لایه نقص در شبکه. (۱) لایه نقص در مرکز نمونه است،  $l_1 = 43$  ، (۲)  $l_1 = 33$  ، (۳)  $l_1 = 23$  . پارامترهای دیگر بلور همان مقادیر شکل (۳-۸) را دارند.....۸۲

شکل (۳-۱۰). وابستگی های فرکانسی ضریب تراگیل یک بلور فوتونیک با دو لایه نقص. تعداد کل لایه ها در این نمونه  $N = 87$  است، پارامترهای دیگر بلور همان مقادیر شکل (۳-۶) را دارند. (a) شماره لایه های نقص  $l_1 = 35$  و  $l_2 = 53$  هستند، فاصله میان لایه ها  $r = 22.2 \mu m$  است، مدهای نقص جدا از هم هستند ; (b)  $l_1 = 23$  ،  $l_2 = 65$  ،  $r = 46.2 \mu m$  (c) ;  $l_1 = 41$  ،  $l_2 = 47$  ،  $r = 10.2 \mu m$  ، فرکانس های مد نقص در حالت  $\theta = 0$  تبهگن می شوند ; (d)  $l_1 = 21$  ،  $l_2 = 67$  ،  $r = 50.2 \mu m$  ، فرکانس ها برای هر دو حالت تبهگن می شوند ; (e)  $l_1 = 13$  ،  $l_2 = 75$  ،  $r = 66.2 \mu m$  .....۸۶

## چکیده

در این پایان نامه، مدهای الکترومغناطیسی جایگزیده در بلورهای فوتونیک یک بعدی با یک لایه نقص ساختاری مورد بررسی قرار گرفته است. نقش لایه نقص را بلور مایع نماتیک بازی می کند. نشان داده شده است که طیف تراگسیلی و ضریب میرایی مدهای نقص به ضخامت و جهت گیری محور اپتیکی بلور مایع نماتیک وابسته است. در ادامه طیف تراگسیلی با دو نقص شبکه ای را مورد مطالعه قرار می دهیم. در این تحقیق نشان داده شده است که می توان مدهای نقص و طیف تراگسیلی بلور فوتونیک را بدون اینکه تغییری در ساختار ایجاد شود، با اعمال میدان الکتریکی خارجی که به تغییر جهت گیری محور اپتیکی بلور مایع نماتیک منجر می شود، به طور مؤثر کنترل کرد. این از مزیت های استفاده از بلور مایع به عنوان لایه نقص می باشد.

**کلمات کلیدی:** بلورهای فوتونیک، بلور مایع نماتیک، تراگسیل، گاف باند فوتونیک، لایه ی نقص، مدهای جایگزیده، مد نقص.

## مقدمه

بسیاری از پیشرفت‌هایی که در زمینه فناوری حاصل می‌شود از درک عمیق خواص مواد ناشی می‌شود. عبور نیاکان ما از عصر حجر به عصر آهن، نشان از شناخت روز افزون انسان از قابلیت مصرف مواد طبیعی دارد. مردمان گذشته ابزار آلات و وسایل مورد نیاز خود را بر اساس دانش خود از مقاومت و سختی سنگ و آهن می‌ساختند. به تدریج انسان یاد گرفت به استخراج موادی از زمین بپردازد که خواص مفیدی برایش داشته باشد. سرانجام مهندسان اولیه آموختند که می‌توانند بر روی مواد خام موجود در زمین کارهای بیشتری انجام دهند. آنها با دستکاری مواد موجود در زمین، موادی با خواص مفیدتر به دست آوردند.

اطلاعات نقش مهمی را در جامعه پیشرفته ایفا می‌کند. در این میان انتقال اطلاعات در مقیاس نانو و سریع توسط وسایل نوری در ایجاد جامعه‌ی مدرن نقشی اساسی دارد. در سال‌های اخیر بلورهای فوتونیک<sup>۱</sup> به دلیل خواص فیزیکی و نوری فوق‌العاده‌شان مورد توجه زیادی واقع شده‌اند. بلورهای فوتونیک ساختار دی‌الکتریک متناوب می‌باشند. این بلورها از دیدگاه فیزیک نظری با ساختار باندشان توصیف می‌شوند و مهم‌ترین ویژگی آنها باند ممنوعه<sup>۲</sup> ( ناحیه فرکانسی که انتشار امواج الکترومغناطیسی با این محدوده فرکانسی در آن ممنوع است) می‌باشد. بلور فوتونیک در طبیعت وجود ندارد و به طور مصنوعی ساخته می‌شود. ساخت این بلورها به دقت و ظرافت زیادی نیاز دارد، زیرا که در یک مدل از این بلورها باید حفره‌هایی را با قطری در حد میکرومتر درون یک ماده دی‌الکتریک بوجود آورد. نوع ماده‌ای که درون حفره‌ها قرار می‌گیرد متفاوت از ماده زمینه می‌باشد و ضریب شکست متفاوتی دارد. در طبیعت نیز موادی وجود دارد که هرچند به آنها نام بلور فوتونیک داده نمی‌شود ولی از همان خواص این بلورها برخوردارند. از آن جمله به سنگی به نام اپال<sup>۳</sup> می‌توان اشاره کرد که شکاف‌های کوچکی در بدنه خود دارد. یا پرندۀ ای وجود دارد که بال‌های آن در مقابل نور شبیه بلورهای فوتونیک رفتار می‌کند. بالهای این پرندۀ روزنه‌های بسیار ریزی

---

<sup>1</sup> - Photonic Crystal

<sup>2</sup> - Band Gap

<sup>3</sup> - Opal

دارد که وقتی نور به آن می تابد به رنگ های مختلفی دیده می شود و این واقعیت را بیان می کند که برخی از طول موج های نور برخوردی منعکس می شوند و برخی دیگر انتشار می یابند. عمل انعکاس نتیجه وجود همان گاف باند فوتونیک است که مشخصه بارز بلورهای فوتونیک می باشد [۱].

انتشار امواج الکترومغناطیسی در محیط های متناوب برای اولین بار توسط لرد رایله<sup>۱</sup> در سال ۱۸۸۷ مطالعه شده است. این تحقیق در ارتباط با خاصیت بازتابی ویژه ی یک ماده بلورین با صفحات دوگانه متناوب بوده که با بلورهای فوتونیک یک بعدی مطابقت دارد. رایله به این حقیقت پی برد که این بلورها دارای گاف باند باریکی بوده و به نوری که فرکانسش در این ناحیه قرار داشته باشد، اجازه انتشار در بین این صفحات به آن داده نمی شود. در دهه های هفتاد و هشتاد قرن بیستم، ساختارهای متناوب دو بعدی و سه بعدی ولی بدون گاف نواری مورد مطالعه قرار گرفتند. در حدود یکصد سال بعد از زمان رایله امکان وجود بلورهای فوتونیک دو بعدی و سه بعدی همراه با گاف نواری مورد توجه واقع نشد تا اینکه سرانجام در سال ۱۹۸۷ این بلورها توسط یابلونوویچ<sup>۲</sup> و جان معرفی شدند [۲].

در حقیقت بلورهای فوتونیک که از مواد دی الکتریک متناوب ساخته می شوند، شیوه های تازه و جالبی را برای کنترل انتشار امواج الکترومغناطیسی فراهم می کنند. زیرا همان طور که در بالا به آن اشاره شد، اگر فرکانس موجی در داخل گاف باند قرار گیرد اجازه انتشار به آن داده نمی شود مگر اینکه در بلور نقص هایی وجود داشته باشد و تناوب کامل بلور با وارد کردن نقصی شکسته شود. بنابراین ما در اینجا به مطالعه خواص مدهای نقص در بلورهای فوتونیک شامل لایه نقص پرداخته و طیف تراگسیلی این بلورها را بررسی می کنیم.

---

<sup>1</sup> -Lord Rayleigh

<sup>2</sup> -Yablonovitch

<sup>3</sup> -John

فصل اول :

درآمدی بر اپتیک بلورهای فوتونیک

## ۱-۱ مقدمه

در قرن بیستم کنترل بشر بر خواص مواد تا کنترل خواص الکتریکی مواد پیش رفته است. پیشرفت هایی که در زمینه مواد نیم رسانا حاصل شد، به ما کمک کرد تا بتوانیم خواص رسانایی گروه معینی از مواد را به دست آورده و به موجب آن انقلاب ترانزیستور در علم الکترونیک را فراهم سازیم. محققان به کمک آلیاژها و سرامیک های جدید ابر رساناهای دما-بالا<sup>۱</sup> را اختراع کردند. تاثیرات عمیقی که این پیشرفت ها در جامعه دارد غیر قابل انکار است. در چند دهه ی گذشته مرز جدیدی با هدف کنترل خواص مواد پدید آمده که همان کنترل خواص اپتیکی مواد است. اگر بتوانیم مواد را طوری مهندسی کنیم که انتشار نور در یک محدوده فرکانسی منع شود یا اجازه انتشار در مسیرهای معینی را داشته باشد و یا در نواحی بخصوصی جایگزیده شود در این صورت پیشرفت های بزرگی در عرصه فناوری حاصل می شود. کابلهای فیبر نوری که به سادگی نور را هدایت می کنند، تحول بزرگی در صنعت مخابرات ایجاد کرده اند. لیزرها، پردازش کننده های سرعت-بالا، طیف سنجی، حوزه هایی هستند که دقیقا از مزایای پیشرفت در مواد اپتیکی بهره های زیادی برده اند [۱].

---

<sup>۱</sup> -High-temperature

## ۲-۱ بلورهای فوتونیک

چه نوع موادی امکان کنترل کامل انتشار نور را برای ما فراهم می کنند؟ از مقایسه ای با مواد الکترونیکی برای پاسخ به این پرسش استفاده می کنیم. یک بلور آرایش متناوبی از اتم ها و مولکول هاست. در حقیقت یک شبکه بلوری، الگویی است که بر طبق آن اتمها و مولکول ها در فضا تکرار می شوند. بنابراین یک بلور یک پتانسیل پررودیک در برابر انتشار الکترون ها از میان خود بروز می دهد. هم مواد تشکیل دهنده بلور و هم ساختار شبکه هر دو در تعیین خواص رسانایی بلور نقش مهمی را ایفا می کنند.

حرکت الکترون ها که در گذشته به صورت معمایی در فیزیک مطرح بود، توسط مکانیک کوانتومی به آن پرداخته شده است. انتشار الکترون ها در یک شبکه بلوری همانند گاز پخشیده<sup>۱</sup> شده ایی از ذرات آزاد است و توسط اجزاء سازنده شبکه بلوری پراکنده نمی شوند. زیرا که در مکانیک کوانتومی انتشار الکترون ها از دیدگاه موجی بررسی می شود و امواج تحت شرایط خاصی می توانند بدون پراکندگی منتشر شوند. البته وجود ناخالصی ها و نقص هایی در شبکه می تواند باعث پراکندگی شود.

شبکه گاف هایی را در ساختار باند انرژی بلور وارد می کند به طوری که الکترون ها به خاطر پراش براگ مانند از اتمها، مجاز نمی باشند با انرژی های معینی و در جهت های معینی انتشار یابند. اگر پتانسیل موجود در شبکه به حد کافی قوی باشد، گاف بایستی به تمام جهات ممکن توسعه یابد، در نتیجه شاهد یک گاف باند کامل خواهیم بود. به عنوان مثال، یک نیم رسانا از یک گاف باند کامل بین باندهای ظرفیت و رسانش برخوردار است.

مشابه اپتیکی که در بالا در مورد آن بحث شد، بلور فوتونیک نام دارد که در آن اتمها و مولکولها بوسیله محیط ماکروسکوپی با ثابت های دی الکتریک متفاوت و نیز پتانسیل متناوب با تابع دی الکتریک متناوب جایگزین می شوند. اگر تفاوت بین ضرایب دی الکتریک بلور به اندازه کافی بزرگ باشد و جذب نور توسط ماده ضعیف باشد، در این صورت شکست و بازتاب نور از فصل مشترک دی الکتریک ها می تواند پدیده های مشابهی را برای فوتون ها ایجاد کند، همان گونه که پتانسیل اتمی برای الکترون ها ایجاد می کند. بنابراین بلور فوتونیک که یک محیط دی الکتریک متناوب کم اتلاف است، راه مناسبی برای کنترل و دستکاری اپتیکی به شمار می رود. پس ما می توانیم بلورهای

---

<sup>۱</sup> - Diffuse

فوتونیک با گاف باندهای فوتونیک بسازیم که مانع از انتشار نور در جهات معین و با انرژی های معین شوند. همچنین خواهیم دید که یک بلور فوتونیک می تواند به امواج اجازه انتشار در جهت های دور از انتظار و مفید را نیز بدهد. به منظور توسعه این مفهوم، موجبرها<sup>۱</sup> و کاواکهای<sup>۲</sup> فلزی را که به بلورهای فوتونیک مربوط می شوند را در نظر می گیریم. این دو وسیله به طور وسیع در کنترل امواج میکروویو مورد استفاده قرار می گیرند. کاواکهای فلزی به امواج الکترومغناطیسی که فرکانسشان زیر یک فرکانس آستانه معین باشد، اجازه انتشار نمی دهند و موجبر فلزی نیز فقط اجازه انتشار در راستای محورش را می دهد. هر دو خاصیت بالا سودمند هستند و در فرکانس های خارج از ناحیه میکروویو مفید خواهند بود. با وجود این، امواج الکترومغناطیسی در فرکانسهای دیگر (مثلا نور مرئی) سریعاً در مولفه های فلزی تلف می شود و موجب می شود این روش کنترل نور برای تعمیم ناممکن شود. بلورهای فوتونیک نه تنها می توانند خواص موجبرها و کاواکها را دارا باشند، بلکه می توانند برای گستره وسیعی از فرکانس ها به کار گرفته شوند. ما می توانیم یک بلور فوتونیک را با هندسه مشخص با ابعاد میلیمتری برای کنترل میکروویو و یا با ابعاد میکرونی برای کنترل امواج فرسوخ بسازیم. وسیله اپتیکی دیگری که مورد استفاده قرار می گیرد، دسته ربع موجی<sup>۳</sup> است که از لایه های دی الکتریک متناوب با ضرایب شکست مختلف تشکیل می شود. وقتی که نوری با طول موجی مناسب به چنین محیط لایه لایه ای برخورد می کند، کاملاً منعکس می شود. زیرا که وقتی موج نوری از مرز بین سطوح لایه ها پراکنده می شود، اگر فضای تناوبی مناسب باشد، باعث می شود که امواج پس از پراکندگی های مکرر از مرزها در نهایت درون محیط متناوب تداخل ویرانگر داشته باشند. این پدیده ای شناخته شده است و اساس خیلی از دستگاههای اپتیکی نظیر آینه های دی الکتریک، فیلترهای فابری-پرو دی الکتریک و لیزرهای فیدبک توزیع یافته را تشکیل می دهد.

بنابراین بلور فوتونیک را که شامل مواد دی الکتریک با اتلافات کم باشد و از لایه های متناوب با ثابت های دی الکتریک متفاوت تشکیل شده باشد را بلور فوتونیک یک بعدی می گویند. وقتی که برای چندین دامنه فرکانسی، یک بلور فوتونیک امواج الکترومغناطیسی را با هر زاویه تابشی و با هر قطبشی و از هر منبعی که به آن برخورد می کند باز می تاباند، می گوئیم که بلور دارای گاف باند فوتونیک کامل است. در چنین بلوری مدی که فرکانس آن در این گستره قرار گیرد، به هیچ عنوان منشر نمی شود. یک آینه ی دی الکتریک ساده نمی تواند دارای یک گاف باند کامل باشد زیرا

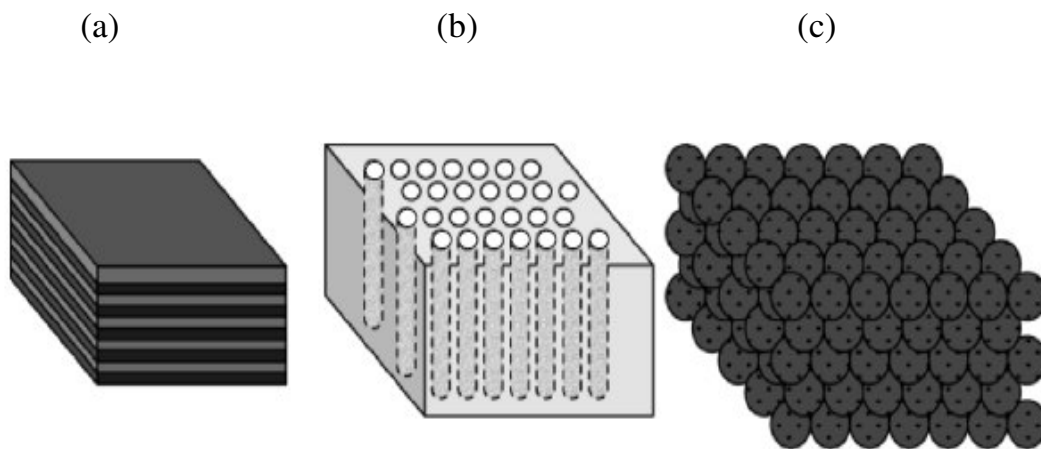
<sup>1</sup> - Waveguide

<sup>2</sup> - Cavities

<sup>3</sup> - Quarter-wave stack



پراکندگی فقط در امتداد یک محور رخ می‌دهد. برای ایجاد ماده‌ای با گاف باند فوتونیک کامل بایستی دی‌الکتریک‌های متمایز را در شبکه‌ای آراست که در امتداد سه محور تناوبی باشد [۱]. از نقطه نظر ابعاد در ساختارهای متناوب، بلورهای فوتونیک به یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی طبقه بندی می‌شوند، به طوری که نور می‌تواند به ترتیب در یک، دو و سه بعد مدوله شود. مثالی از بلورهای فوتونیک یک بعدی که با آینه‌های براگ (ساختارهایی با لایه‌های دی‌الکتریک متناوب) شناخته می‌شوند، در شکل (a-1-1) نشان داده شده است. یک بلور فوتونیک دوبعدی، محیطی دی‌الکتریک با الگوی دوبعدی است که معمولاً آرایش منظمی از میله‌های دی‌الکتریک یا حفره‌ی هوا در یک قطعه دی‌الکتریک زمینه است، شکل (b-1-1). یک بلور فوتونیک سه‌بعدی به واسطه‌ی دارا بودن از گاف باند کامل، می‌تواند نور را در تمامی جهات کنترل کند. به دلیل مشکلات تولید این نوع از بلورها در چند سال اخیر فقط در آزمایشگاهها به دست آمده‌اند. سنگ جواهر<sup>۱</sup> طبیعی، شامل کره‌های اکسید سیلیسیم<sup>۲</sup> با اندازه زیر میکرون، نمونه‌ای از بلور فوتونیک سه‌بعدی با یک شبه گاف باند است، که در شکل (c-1-1) نشان داده شده است [۳].



شکل (۱-۱). طرحی از بلورهای فوتونیک (a) یک‌بعدی، (b) دو‌بعدی و (c) سه‌بعدی [۳].

<sup>۱</sup> - Gemstone Opal

<sup>۲</sup> - Silica

## ۳-۱ انتشار امواج الکترومغناطیسی در لایه‌های متناوب

پس از آشنایی با بلورهای فوتونیک و انواع آنها، اکنون به بررسی انتشار امواج الکترومغناطیسی در محیط‌های متناوب می‌پردازیم.

### ۱-۳-۱ قطبش

برای بررسی انتشار امواج الکترومغناطیسی در محیط‌های متناوب فرض می‌کنیم قطبش نور از دو مولفه‌ی متعامد تشکیل شده است، این دو مولفه را به این صورت تعریف می‌کنیم. برای قطبش  $s$ ، میدان الکتریکی نور ( $E$ ) موازی صفحه‌ی فصل مشترک دو محیط متناوب می‌باشد و برای قطبش  $p$ ، میدان مغناطیسی ( $H$ ) موازی صفحه‌ی فصل مشترک دو محیط است. این دو قطبش را اصطلاحاً در موجرها به ترتیب امواج الکتریکی عرضی ( $TE$ ) و مغناطیسی عرضی ( $TM$ ) می‌نامند [۴].

### ۲-۳-۱ روش ماتریسی و عملگر انتقال برای انتشار امواج الکترومغناطیسی در

#### لایه‌های متناوب

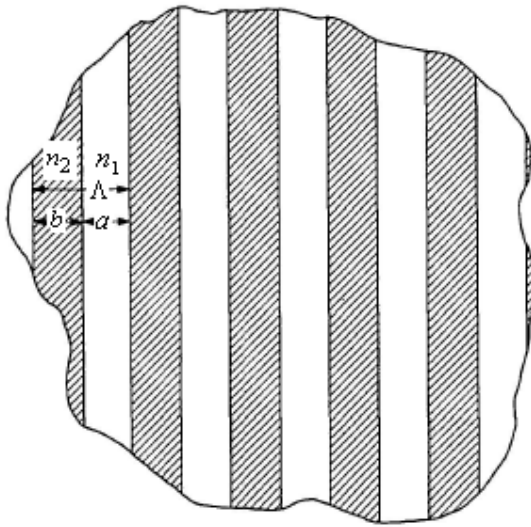
برای بررسی انتشار امواج الکترومغناطیسی در لایه‌های متناوب، ابتدا عملگر انتقال برای این قبیل محیط‌ها را با استفاده از روش ماتریسی به دست می‌آوریم [۵ و ۶].  
به منظور وضوح و آشکارسازی بیشتر در معرفی مفاهیم پایه، در ابتدا ساده‌ترین نوع محیط لایه‌ای تناوبی را در نظر می‌گیریم. محیط را که در اینجا معرفی می‌کنیم از دو نوع لایه متناوب با ضرایب شکست متفاوت تشکیل می‌شود. ضرایب شکست این دو لایه به صورت زیر است:

$$n(x) = \begin{cases} n_2 & 0 < x < b \\ n_1 & b < x < \Lambda \end{cases} \quad (1-1)$$

به دلیل خاصیت تناوبی محیط داریم:

$$n(x + \Lambda) = n(x) \quad (2-1)$$

محور  $x$  بر سطح همه لایه‌ها عمود است.  $\Lambda$  طول دوره تناوب و برابر است با:  $a + b = \Lambda$   
هندس‌ه چنین ساختاری در شکل (۲-۱) نشان داده شده است.



شکل (۲-۱). قسمتی از یک نوع محیط لایه ای متناوب [۵].

توزیع میدان الکتریکی در لایه ها را به صورت زیر می نویسیم:

$$E(x, z) = E(x) e^{i\beta z} \quad (۳-۱)$$

لازم به ذکر است که ما می توانیم، توزیع میدان الکتریکی درون هر لایه همسانگرد را به صورت مجموع یک موج تخت برخوردی و یک موج تخت بازگشتی بیان کنیم. ترکیب دامنه های این دو موج، مولفه های یک بردار ستونی را تشکیل می دهند. بنابراین میدان الکتریکی در لایه  $\alpha$  از  $n$  امین سلول واحد را با یک بردار ستونی به صورت زیر نشان می دهیم:

$$\begin{pmatrix} a_n^{(\alpha)} \\ b_n^{(\alpha)} \end{pmatrix} \quad (۴-۱)$$

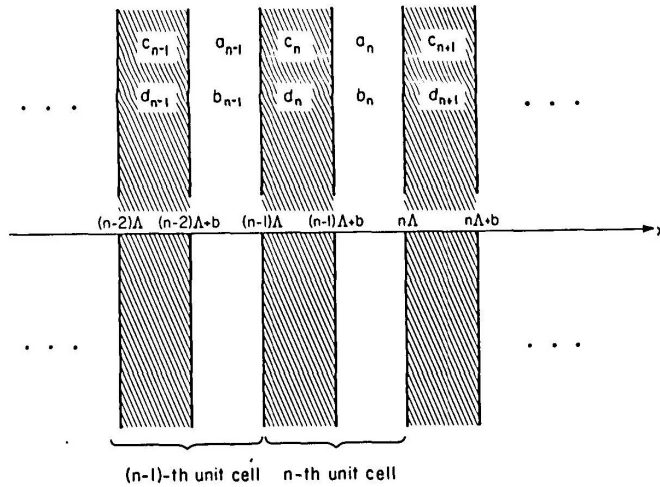
در نتیجه توزیع میدان در این لایه ها به صورت زیر نوشته می شود:

$$E(x, z) = (a_n^{(\alpha)} e^{ik_{\alpha x}(x-n\Lambda)} + b_n^{(\alpha)} e^{-ik_{\alpha x}(x-n\Lambda)}) e^{i\beta z} \quad (۵-۱)$$

و داریم:

$$k_{\alpha x} = \{[(\omega/c)n_{\alpha}]^2 - \beta^2\}^{1/2}, \quad \alpha=1, 2 \quad (۶-۱)$$

بردارهای ستونی هر یک از لایه ها از یکدیگر مستقل نیستند، آنها با شرایط پیوستگی که در مرزها وجود دارد به همدیگر مربوط می شوند. درحقیقت تنها یک بردار را می توان به صورت اختیاری انتخاب کرد.



شکل (۳-۱). دامنه‌های موج تخت در  $n$  امین سلول و سلولهای مجاور [۵].

در مورد امواج الکتریکی عرضی (بردار  $E$  در صفحه  $y-z$ )، با تحمیل شرط پیوستگی در مرزها بر روی  $E$  و  $\partial E / \partial x$  در شکل (۳-۱) به مجموعه معادلات زیر می‌رسیم:  
برای مرز  $x = (n-1)\Lambda$  داریم:

$$\begin{cases} a_{n-1} + b_{n-1} = e^{-ik_{2x}\Lambda} c_n + e^{ik_{2x}\Lambda} d_n, \\ ik_{1x}(a_{n-1} - b_{n-1}) = ik_{2x}(e^{-ik_{2x}\Lambda} c_n - e^{ik_{2x}\Lambda} d_n), \end{cases} \quad (۷-۱)$$

و برای مرز  $x = (n-1)\Lambda + b$  نیز داریم:

$$\begin{cases} e^{-ik_{2x}a} c_n + e^{ik_{2x}a} d_n = e^{-ik_{1x}a} a_n + e^{ik_{1x}a} b_n, \\ ik_{2x}(e^{-ik_{2x}a} c_n - e^{ik_{2x}a} d_n) = ik_{1x}(e^{-ik_{1x}a} a_n - e^{ik_{1x}a} b_n), \end{cases} \quad (۸-۱)$$

هر یک از معادلات (۷-۱) و (۸-۱) را می‌توان به صورت یک معادله ماتریسی بازنویسی کرد:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{n-1} \\ b_{n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{-ik_{2x}\Lambda} & e^{ik_{2x}\Lambda} \\ \frac{k_{2x}}{k_{1x}} e^{-ik_{2x}\Lambda} & -\frac{k_{2x}}{k_{1x}} e^{ik_{2x}\Lambda} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_n \\ d_n \end{pmatrix} \quad (۹-۱)$$

$$\begin{pmatrix} e^{-ik_{2x}a} & e^{ik_{2x}a} \\ e^{-ik_{2x}a} & -e^{ik_{2x}a} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_n \\ d_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{-ik_{1x}a} & e^{ik_{1x}a} \\ \frac{k_{1x}}{k_{2x}} e^{-ik_{1x}a} & -\frac{k_{1x}}{k_{2x}} e^{ik_{1x}a} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_n \\ b_n \end{pmatrix} \quad (۱۰-۱)$$