دانشگاه تبریز

دانشکده فیزیک

گروه حالت جامد و الکترونیک

**پایان‌نامه**

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته فیزیک حالت جامد و الکترونیک

**عنوان**

# بررسی موجبرهای نوری در کریستال های فوتونی به روش *FDTD*

**استادان راهنما**

دکتر منوچهر کلافی

دکتر علی سلطانی والا

**پژوهشگر**

اکبر مولایی

بهمن ۱۳۸۹

**نام خانوادگی دانشجو**: مولایی **نام** : اکبر

**عنوان پایان نامه**: بررسی موجبرهای نوری در کریستال‌های فوتونی به روش *FDTD*

**استادان راهنما** : دکتر منوچهر کلافی- دکتر علی سلطانی والا

**مقطع تحصیلی** : کارشناسی ارشد **رشته** : فیزیک **گرایش** : حالت جامد

**دانشگاه** : تبریز **دانشکده** : فیزیک **تاریخ فارغ التحصیلی**: ۱۳۸۹/۱۱/۲۰ **تعداد صفحه**: ۱۳۲

**کلید واژه‌ها** : بلورهای فوتونی دوبعدی ، روش بسط موج تخت، روش ابر سلول، روش تفاضلات محدود در حوزه زمان ، موجبر بلور فوتونی، نقص خطی، مد موجبری

**چکیده:**

در سال‌های اخیر بلورهای نوری به خاطر خواص جالبشان در کنترل انتشار امواج الکترومغناطیسی مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. به طوریکه از آن‌ها در ساخت قطعات نوری خصوصاً در مدارهای مجتمع نوری استفاده‌های زیادی شده است. بلورهای نوری، ساختارهای دی-الکتریک متناوب هستند که بطور مصنوعی ساخته می‌شوند و در تشابه با نیمه هادیها دارای یک ناحیه ممنوعه فرکانسی می‌باشند که نوار گاف فوتونی نامیده می‌شوند. خواص جالب بلورهای فوتونی ناشی از وجود همین ناحیه ممنوعه فرکانسی است. هرگاه تناوب ضریب دی‌الکتریک در دو جهت باشد بلور فوتونی دو بعدی است، که از یک سری میله‌های دی‌الکتریک که در یک زمینه‌ی دی-الکتریک با ضریب دی‌الکتریک متفاوت قرار داده شده‌اند تشکیل یافته است. با ایجاد نقص در بلور فوتونی که به معنی برهم زدن تناوب ساختار است، می‌توان مدهای منتشر شونده‌ای را در گاف فرکانسی ایجاد کرد. یک نوع از این نقص‌ها نقص خطی است که از تغییر پارامترهای فیزیکی یک ردیف از میله‌های دی‌الکتریک بدست می‌آید. متداول‌ترین کاربرد این نقص‌های خطی استفاده از آنها به عنوان موجبرهای بلور فوتونی می‌باشد. با ایجاد یک نقص خطی مدی درون نوار ممنوعه‌ی فرکانسی ظاهر می‌شود که به آن مد موجبری گفته می‌شود.

در این پایان‌نامه با استفاده از روش تفاضلات محدود در حوزه زمان *FDTD* انتشار امواج الکترومغناطیسی در درون موجبرهای بلور فوتونی با استفاده از نرم افزار *Rsoft* مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین میزان عبور امواج الکترومغناطیسی از این موجبرها با استفاده از این روش محاسبه شده است. سپس از روش ابر سلول بر پایه بسط موج تخت ساختار نوار برای بلورهای فوتونی دو بعدی شامل نقص خطی محاسبه شده است.

تغییرات مد موجبری و میزان عبور امواج الکترومغناطیسی برای یک بلور فوتونی دو بعدی، با شبکه مربعی و مثلثی، مورد بررسی قرار گرفته است. در هر دو شبکه مربعی و مثلثی میله‌ها هندسه دایروی یا مربعی داشته، و در این ساختارها خط نقص با تغییرات اندازه میله ها ایجاد شده است.

نتایج نشان می‌دهد که میزان عبور امواج الکترومغناطیسی و پهنای مد موجبری به نوع شبکه، هندسه میله ها و مشخصات نقص بستگی دارد.

یکی دیگر از ساختارهایی که میزان عبور امواج الکترومغناطیسی در آن مورد بررسی قرار گرفته است، موجبر بلور فوتونی خمیده ۶۰ درجه با آرایه مثلثی از حفره‌های هوا در یک زمینه سیلیکون است. نتایج نشان می‌دهد که با ایجاد تغییراتی در قسمت تیزی خمیدگی می‌توان پهنا و میزان عبور امواج الکترومغناطیسی را بهبود بخشید.

برای بیان کاربردی دیگر از موجبرهای بلور فوتونی که از یک شبکه مربعی با میله‌های سیلیکون در زمینه هوا ساخته شده است، اندازه شعاع یک ردیف از میله ها به طور متناوب بزرگ و کوچک شده است. محاسبات نشان می دهد که در این حالت بازه خاصی از فرکانس های مد موجبری فیلتر شده است.

تقـــــدیم به

# مقدسترین واژه‌های زندگیم

***آنان که وجودم برای آنان همه رنج بود و وجودشان برایم همه مهر***

***توانشان رفت تا به توانایی برسم و مویشان سپید گشت تا رویم سپید بماند***

***آنان که فروغ نگاهشان، گرمی کلامشان و روشنی رویشان سرمایه‌های جاودانی من است***

***آنانکه راستی قامتم در شکستگی قامتشان تجلی یافت***

***در برابر وجودشان زانوی ادب بر زمین می‌نهم***

***و با دلی مملو از عشق و محبت و خضوع بر قلبشان بوسه می‌زنم***

***سرو وجودشان همیشه سرسبز و امتداد باد***

## تشکـــر و قدردانـی

سپاس ایزد یکتا را آن عالم بی‌همتا که بی‌شک هر چه داریم از اوست. اینک که این نوشته به لطف او به پایان رسیده است، برخود لازم می‌دانم که از زحمات استاد گرانقدر جناب آقای پروفسور «منوچهر کلافی» به خاطر راهنمایی‌های ارزنده و صبر و حوصله بی دریغشان صمیمانه سپاسگزاری کنم و همچنین از جناب آقای دکتر «علی سلطانی والا» که در تمام مراحل کار با بزرگواری فراوان بنده را یاری دادند نهایت تشکر را بنمایم.

از برادر عزیزم که مشوق بنده در تمام مراحل تحصیلم بوده، و نیز خواهرهای مهربانم سپاسگزارم. همچنین از تمامی دوستانی که رنج این پروژه بر گردن آنان نیز بوده است خصوصاً مهندس حمید پاشایی، حسین قابل و سهیل طاهری کمال تشکر و قدردانی را دارم و برایشان آرزوی توفیق و موفقیت از خداوند متعال خواستارم.

به راه بادیه رفتن به از نشستن باطل  وگر مراد نیابم به قدر وسع بکوشم

# فهرست مطالب

مقدمه ..... ۱

## فصل اول

## بررسی منابع

۱-۱- تاریخچه ..... ۳

۱-۲- معرفی بلورهای فوتونی ..... ۴

۱-۳- دسته بندی بلورهای فوتونی ..... ۶

۱-۳-۱- بلورهای فوتونی یک بعدی ..... ۷

۱-۳-۲- بلورهای فوتونی دو بعدی ..... ۷

۱-۳-۳- بلورهای فوتونی سه بعدی ..... ۸

۱-۴- پارامترها و ویژگی های بلورهای فوتونی ..... ۹

۱-۴-۱- ابعاد ..... ۹

۱-۴-۲- توپولوژی ..... ۱۰

۱-۴-۳- کنتراست ضریب شکست و مقیاس پذیری ..... ۱۱

۱-۴-۴- ضریب شکست موثر و کسر پر شدگی ..... ۱۱

۱-۵- مفاهیم پایه‌ای در مورد سیستم‌های متناوب ..... ۱۲

۱-۵-۱- یاخته واحد بسیط ..... ۱۲

۱-۵-۲- شبکه وارون ..... ۱۴

۱-۶- نقص در بلورهای فوتونی ..... ۱۶

۱-۷- کاربردهای بلورهای فوتونی ..... ۱۸

۱-۷-۱- فیبرهای نوری..... ۱۸
۱-۷-۲- کاواک‌ها..... ۲۰
۱-۷-۳- نقش بلور فوتونی در در دیود نوری..... ۲۳
۱-۷-۴- موجبرها..... ۲۴
۱-۷-۴-۱- موجبرهای دی الکتریک..... ۲۴
۱-۷-۴-۲- موجبرهای بلور فوتونی ..... ۲۷
۱-۷-۴-۲-۱- موجبرهای خمیده بلور فوتونی..... ۳۰
۱-۷-۴-۲-۲- موجبرهای نامتجانس بلور فوتونی..... ۳۳
۱-۷-۵- فیلترهای بلور نوری..... ۳۴

# فصل دوم

# مبانی و روش‌ها

مقدمه ..... ۳۶
۲-۱- خواص نوری بلورهای فوتونی ..... ۳۶
۲-۲- قضیه بلوخ و ثابت دی الکتریک (پتانسیل) متناوب ..... ۳۸
۲-۳- روش‌های عددی در تحلیل بلورهای فوتونی ..... ۴۰
۲-۳-۱- روش‌های عددی در حوزه زمان..... ۴۰
۲-۳-۲- روش‌های عددی در حوزه بسامد..... ۴۲
۲-۴- روش تفاضلات محدود در حوزه زمان *FDTD*..... ۴۳
۲-۵- الگوریتم *Yee*..... ۵۱
۲-۶- حل معادله موج یک بعدی با الگوریتم *Yee*..... ۵۳
۲-۷- حل معادلات کرل ماکسول با الگوریتم *Yee*..... ۵۷
۲-۷-۱- حل معادلات کرل ماکسول با الگوریتم *Yee* در حالت یک بعدی ..... ۵۷
۲-۷-۲- حل معادلات کرل ماکسول با الگوریتم *Yee* در حالت دو بعدی..... ۵۹

۲-۷-۳- حل معادلات کرل ماکسول با الگوریتم *Yee* در حالت سه بعدی ..... ۶۰

۲-۸- بررسی شرایط مرزی ..... ۶۳

۲-۸-۱- بررسی شرط مرزی *PML* ..... ۶۴

۲-۹- شرط پایداری در الگوریتم *Yee* ..... ۷۰

۲-۱۰- روش بسط موج تخت ..... ۷۰

۲-۱۱- محاسبه مدهای نقص خطی در بلور فوتونی دو بعدی با تقارن های شبکه مربعی ومثلثی و با اشکال هندسی دایروی و مربعی ..... ۷۸

۲-۱۱-۱- محاسبه مدهای موجبری در بلور فوتونی دو بعدی با تقارن شبکه مربعی و هندسه میله های دایروی..... ۷۹

۲-۱۱-۲- محاسبه مدهای موجبری در بلور فوتونی دو بعدی با تقارن شبکه مربعی و هندسه میله های مربعی..... ۸۱

۲-۱۱-۳- محاسبه مدهای موجبری در بلور فوتونی دو بعدی با تقارن شبکه مثلثی و هندسه میله های دایروی..... ۸۵

۲-۱۱-۴- تغییر میله‌های مجاور نقص خطی..... ۹۱

# فصل سوم

# نتایج و بحث

مقدمه ..... ۹۶

۳-۱- تغییر شعاع میله‌های نقص خطی ..... ۹۷

۳-۱-۱- شبکه مربعی با میله‌های دایروی ..... ۹۷

۳-۱-۲- شبکه مربعی با میله‌های مربعی ..... ۱۰۱

۳-۱-۳- شبکه مثلثی با میله‌های دایروی ..... ۱۰۵

۳-۲- تاثیر تغییر شعاع میله های مجاور خط نقص بر میزان عبورامواج الکترومغناطیسی در موجبر بلور فوتونی ..... ۱۰۹

۳-۳- طراحی موجبربلور فوتونی خمیده ۶۰ درجه با پهنا و میزان عبور بالا ..... ۱۱۶

۳-۴- فیلتر سازی امواج الکترومغناطیسی با استفاده از نقص خطی در بلور فوتونی ..... ۱۲۱

نتیجه گیری ..... ۱۲۶

پیشنهادات ..... ۱۲۸

منابع ..... ۱۲۹

# فهرست اشکال

## فصل اول


شکل ۱– ۱ : نمونه‌هایی از بلورهای فوتونی که در طبیعت یافت شده‌اند.الف) پر طاووس، ب) پروانه‌ی مورفو ج) سنگ اوپال [۱۲].....۷

شکل ۱– ۲ : طرح ساده‌ای از دسته‌بندی بلورهای فوتونی از نظر ابعادی. الف)بلور فوتونی یک بعدی، ب) بلور فوتونی دو بعدی و ج) بلور فوتونی سه بعدی. در این شکل‌ها رنگ‌های مختلف نمایش دهنده‌ی مواد با ثابت دی‌الکتریک متفاوت می‌باشند[۵].....۷

شکل ۱– ۳ : بلور فوتونی یک بعدی. عبارت یک بعدی به این علت است که ثابت دی‌الکتریک $\varepsilon(z)$ تنها در راستای محور $z$ها تغییر می‌کند و در دو راستای دیگر ثابت می‌باشد[۵]. .....۸

شکل ۱– ۴ : بلور فوتونی دو بعدی با شبکه‌ی مربعی. ضریب دی‌الکتریک در این ساختار در راستای محورهای $X$ و $Y$ به طور متناوب تغییر می‌کند اما در راستای محور $Z$ ثابت می‌باشد. ثابت شبکه که تناوب با آن در راستای دو محور $X$ و $Y$ تکرار میشود، $A$ می باشد[۵]. .....۹

شکل ۱– ۵ : یک نمونه بلور فوتونی سه بعدی[۵] ..... ۱۰

شکل ۱– ۶ : معرفی توپولوژی‌های مختلف یک شبکه با تقارن مشابه $FCC$ ***(A)*** کره‌های دی‌الکتریک ایزوله شده در هوا، ***(B)*** کره‌های دی‌الکتریک قرار گرفته در هوا، ***(C)*** کره‌های ایزوله شده در دی‌الکتریک و ***(D)*** کره‌های هوای قرار گرفته در دی‌الکتریک [۶]. ..... ۱۱

شکل ۱– ۷ : بلورهای فوتونی یک ، دو و سه بعدی ( سمت چپ) ، مناطق اول بریلوئن (وسط) و کاهش یافته بریلوئن مربوطه (سمت راست) [۸]..... ۱۶

شکل ۱– ۸ : طرحواره‌ای از حالت‌های ممکن ایجاد نقص نقطه‌ای، خطی و سطحی در یک بلور فوتونی دو بعدی[۴]. ۱۸

شکل ۱– ۹ : دو نوع از فیبرهای بلور فوتونی [۹]. ..... ۲۰

شکل ۱– ۱۰ : نمودار دامنهٔ میدان مغناطیسی عرضی مد پایه در سطح مقطع یک فیبر نوری بلور فوتونی [۱۰]..... ۲۰

شکل ۱– ۱۱ : کاواک‌های بلور فوتونی که از ایجاد نقص نقطه‌ای در بلور حاصل شده‌اند. الف) تعویض جنس یکی از میله‌ها، ب) تغییر شعاع یکی از میله‌ها و ج) حذف یکی از میله‌ها ..... ۲۲

شکل ۱– ۱۲ : ساختار نوار بلور فوتونی با نقص نقطه‌ای که در آن مد نقص درون نوار ممنوعه مشهود است[۱۲]..... ۲۳

شکل ۱– ۱۳ : دیود نوری $GaN$ با بهره‌گیری از بلور فوتونی. شکل بالا سمت راست: ساختار دیود نوری و موقعیت بلور فوتونی. بالا چپ: تصویر میکروسکوپ الکترونی از بلور فوتونی به کار رفته. پائین: مشخصه‌های جریان–ولتاژ و شدت نور–جریان [۱۴]. ..... ۲۵

شکل ۱– ۱۴ : برای حد فاصل بین دو محیط دی‌الکتریک $\varepsilon_1$ و $\varepsilon_2$، می‌توان نور را با زاویه فرودی $\theta_1$ و زاویه شکست $\theta_2$ که بر اساس قانون اسنل بدست می‌آید، بیان کرد[۱۵]. ..... ۲۶

شکل ۱– ۱۵ : موجبر معمولی[۱۶].....۲۷

شکل ۱– ۱۶ : نمایش نحوه اتلاف نور در انتهای خمیده موجبر معمولی.....۲۸

شکل ۱– ۱۷ : موجبر بلور فوتونی[۱۲].....۲۹

شکل ۱– ۱۸ : ساختار نوار تصویر شده حاصل از حذف یک ردیف از **میله**های دی الکتریک یک بلور فوتونی دو بعدی با تقارن شبکه مربعی[۱۲]. ..... ۳۰
شکل ۱– ۱۹ : موجبر بلور فوتونی که از میله‌های آلومین ( $\varepsilon = 8.9$ ) در زمینه هوا تشکیل شده است. این شکل ویژگی منحصر به فرد موجبرهای بلور فوتونی را نشان می‌دهد که توانایی هدایت نور درون محیط با ثابت دی‌الکتریک پایین‌تر را دارند[۱۳]..... ۳۱
شکل ۱– ۲۰ : (الف)موجبر خمیده ۹۰ درجه در شبکه مربعی. (ب)موجبرخمیده ۶۰ درجه در شبکه مثلثی[۲۳–۲۵]..... ۳۲
شکل ۱–۲۱:(الف)موجبرهای خمیده ۶۰ درجه ایجاد شده در داخل بلور فوتونی(ب) موجبرهای خمیده ۶۰درجه بهبود فوتونی یافته [۲۵]. ..... ۳۳
شکل ۱– ۲۲: الف و ب به ترتیب موجبر قبل و بعد از تغییرات در قسمت تیزی خمیدگی [۲۶]..... ۳۳
شکل ۱– ۲۳ : یک موجبر بلور فوتونی نامتجانس که از اتصال دو موجبر بلور فوتونی با شبکه مثلثی با ثابت های شبکه متفاوت شاخته شده است [۲۷]. ..... ۳۴
شکل ۱– ۲۴ : موجبرنامتجانس که یک میکروکاواک با فاکتور کیفیت بالا ایجاد می‌کند[۲۸]..... ۳۴
شکل۱–۲۵ : فرکانس‌های $f_i$ و $f_j$ در موجبر توسط کاواک‌ها به بیرون صفحه منتقل می‌شوند[۲۹].....۳۵

# فصل دوم

شکل ۲–۱ : خط نور در یک کریستال فوتونی که تغییرات فرکانس $\omega$ بر حسب $k$ را بیان می‌کند [۳۰].....۳۸
شکل ۲– ۲ : دو گروه اصلی در روش‌های عددی..... ۴۱
شکل ۲– ۳ : روش‌های عددی حوزه زمان ..... ۴۲
شکل ۲– ۴ : روش‌های عددی حوزه بسامد ..... ۴۳
شکل ۲– ۵: موقعیت مولفه های برداری میدانهای الکتریکی و مغناطیسی شبکه فضایی $YEE$[۳۳].....۵۱
شکل ۲– ۶ : نمودار فضا–زمان الگوریتم $Yee$ برای انتشار موج یک بعدی [۳۳].....۵۳
شکل ۲– ۷ : نحوه محاسبه میدانها در فرمولبندی $FDTD$ یک بعدی [۳۵]. ..... ۵۸
شکل ۲–۸ : نحوه اعمال شرط متناوب در مرزها..... ۶۴
شکل ۲–۹ :نحوه اعمال شرط مرزی شفاف در مرزهای یک موجبر در بررسی انتشار موج الکترومغناطیسی.....۶۴
شکل ۲– ۱۰ : نحوه اعمال شرط مرزی $PML$..... ۶۹
شکل ۲– ۱۱ : تصویری نمادین از یک بلور فوتونی با شبکه مربعی که در آن یک نقص خطی با تغییر ثابت دی‌الکتریک یک ردیف از میله‌ها تعبیه شده است. شکل نقطه‌چین نمایشگر ابر سلولی است که برای بررسی مدهای نقص در نظر گرفته می‌شود..... ۷۷
شکل ۲– ۱۲ : ابر سلولی که شامل ۱۲ سلول کامل و یک سلول نقص می‌باشد. $L = N\,a$ ثابتی است که ابر سلول با آن در راستای $x$ تکرار می‌شود، که در آن $N$ تعداد سلول‌های کامل به‌اضافه سلول نقص می‌باشد..... ۷۸

شکل ۲– ۱۳ : تصویری نمادین از یک بلور فوتونی با شبکه مربعی از میله های مربعی شکل که در آن یک نقص خطی با تغییر اندازه یک ردیف از میله‌ها تعبیه شده است. ..... ۸۲
شکل ۲– ۱۴ : ابر سلولی که شامل ۱۲ سلول کامل و یک سلول نقص می‌باشد. $L = N\ a$ ثابتی است که ابر سلول با آن در راستای $x$ تکرار می‌شود، که در آن $N$ تعداد سلول‌های کامل به‌اضافه سلول نقص می‌باشد ..... ۸۳
شکل ۲– ۱۵ : تصویری نمادین از یک بلور فوتونی با شبکه مثلثی از میله های دایروی شکل که در آن یک نقص خطی در یک ردیف از میله‌ها تعبیه شده است. ..... ۸۶
شکل ۲– ۱۶ : ابر سلولی که شامل ۸ سلول کامل و یک سلول نقص می‌باشد. $L = N\sqrt{3}a$ ثابتی است که ابر سلول با آن در راستای $x$ تکرار می‌شود، که در آن $N$ تعداد سلول‌های کامل به‌اضافه سلول نقص می‌باشد. ..... ۸۶
شکل ۲– ۱۷ : ابر سلولی که در آن هیچگونه نقصی وجود ندارد. این ابر سلول از دایره‌ها، نیم دایره‌ها و چهار ربع دایره‌ی کناری تشکیل شده است ..... ۸۸
شکل ۲– ۱۸ : دایره‌های کاملی که در ابر سلول شکل (۲–۲۱) وجود دارند ..... ۸۹
شکل ۲– ۱۹ : نیم دایره‌هایی که در ابر سلول شکل (۲–۲۱) وجود دارند. ..... ۹۰
شکل ۲– ۲۰ : تغییر شعاع میله‌های مجاور نقص خطی در شبکه مربعی ..... ۹۳
شکل ۲– ۲۱ : تغییر شعاع میله‌های مجاور نقص خطی در شبکه مثلثی ..... ۹۳

# فصل سوم

شکل ۳– ۱ : ساختار نوار بلور فوتونی با شبکه مربعی از میله‌های سیلیکون با هندسه دایروی در زمینه هوا برای مدهای قطبشی الکتریکی(رنگ آبی) و مغناطیسی(رنگ قرمز).. ..... ۹۸
شکل ۳–۲ : تصویری نمادین از یک بلور فوتونی با شبکه مربعی از میله هایی به شکل دایره که در آن یک نقص خطی با تغییر شعاع یک ردیف از میله‌ها تعبیه شده است. ..... ۹۹
شکل ۳–۳ : تغییرات ایجاد شده در مد موجبری شبکه مربعی (قطبش الکتریکی یا همان مد $TM$) متشکل از میله‌های سیلیکون در زمینه‌ی هوا، در اثر تغییر در شعاع میله‌های نقص خطی (جدول (۳–۱)). ..... ۹۹
شکل ۳– ۴ : تغییرات میزان عبور موج الکترومغناطیسی از موجبرهای ایجاد شده در شبکه مربعی متشکل از میله‌های سیلیکون در زمینه‌ی هوا، در اثر تغییر در شعاع میله‌های نقص خطی (جدول (۳–۱)).الف) با شعاع میله های نقص $r_D = 0.1A$ ب) باشعاع میله های نقص $r_D = 0$. ..... ۱۰۰
شکل ۳–۵ : ساختار نوار بلور فوتونی با شبکه مربعی از میله‌های سیلیکون با هندسه مربعی در زمینه هوا برای مدهای قطبشی الکتریکی(رنگ آبی) و مغناطیسی(رنگ قرمز).. ..... ۱۰۲
شکل ۳–۶ : تصویری نمادین از یک بلور فوتونی با شبکه مربعی از میله هایی به شکل مربعی که در آن یک نقص خطی با تغییر اندازه ضلع یک ردیف از میله‌ها تعبیه شده است. ..... ۱۰۳
شکل ۳–۷ : تغییرات ایجاد شده در مد موجبری شبکه مربعی (قطبش الکتریکی یا همان مد $TM$) متشکل از میله‌های سیلیکون با هندسه مربعی در زمینه‌ی هوا، در اثر تغییر در اندازه ضلع میله‌های نقص خطی (جدول (۳–۲)).... ۱۰۳

شکل ۳– ۸ : تغییرات میزان عبور موج الکترومغناطیسی از موجبرهای ایجاد شده در شبکه مربعی متشکل از میله‌های سیلیکون با هندسه مربعی در زمینه‌ی هوا، در اثر تغییر در اندازه ضلع میله‌های نقص خطی (جدول (۳–۲)).الف) با اندازه ضلع $l_D = 0$ ب) با اندازه ضلع $l_D = 0.15A$ ..... ۱۰۴
شکل ۳– ۹ : ساختار نوار بلور فوتونی با شبکه مثلثی از میله‌های سیلیکون با هندسه دایروی در زمینه هوا برای مدهای قطبشی الکتریکی(رنگ آبی) و مغناطیسی(رنگ قرمز).. ..... ۱۰۵
شکل ۳– ۱۰ : تصویری نمادین از یک بلور فوتونی با شبکه مثلثی از حفره هایی به شکل دایره در زمینه سیلیکون که در آن یک نقص خطی با تغییر شعاع یک ردیف ازحفره ها تعبیه شده است. ..... ۱۰۶
شکل ۳– ۱۱ : تغییرات ایجاد شده در مد موجبری شبکه مربعی (قطبش الکتریکی یا همان مد $TM$) متشکل از میله‌های سیلیکون با هندسه مربعی در زمینه‌ی هوا، در اثر تغییر در اندازه ضلع میله‌های نقص خطی (جدول (۳–۲)).... ۱۰۷
شکل ۳– ۱۲ : تغییرات میزان عبور موج الکترومغناطیسی از موجبرهای ایجاد شده در شبکه مثلثی متشکل از حفره های هوا در زمینه سیلیکون با هندسه دایروی، در اثر تغییر در اندازه شعاع حفره ها (جدول (۳–۳)).الف) با اندازه ضلع $r_D = 0$ ب) بااندازه شعاع حفره ها $r_D = 0.119A$ ..... ۱۰۸
شکل ۳– ۱۳ : تصویری نمادین از یک موجبر بلور فوتونی با شبکه مربعیاز میله های سیلیکون در زمینه هوا که در آن یک نقص خطی با حذف یک ردیف از میله ها بدست آمده است..... ۱۱۰
شکل ۳– ۱۴ : نمودار پاشندگی موجبر بلور فوتونی مربعی با حذف یک ردیف از میله ها..... ۱۱۱
شکل ۳– ۱۵ : میزان عبور پالس از بلور فوتونی مربعی با حذف یک ردیف از میله ها..... ۱۱۱
شکل ۳– ۱۶ : تصویری نمادین از یک موجبر بلور فوتونی با شبکه مربعی از میله های سیلیکون در زمینه هوا که در آن شعاع میله های مجاور نقص خطی کاهش یافته است. ..... ۱۱۲
شکل ۳– ۱۷ : نمودار پاشندگی موجبر بلور فوتونی مربعی با کاهش شعاع میله های مجاور خط نقص (میله های حذف شده) تا $R=0.1A$ ..... ۱۱۳
شکل ۳– ۱۸ : میزان عبور پالس از بلور فوتونی مربعی با افزایش شعاع میله های مجاور خط نقص تا $r = 0.4a$ ..... ۱۱۳
شکل ۳– ۱۹ : تصویری نمادین از یک موجبر بلور فوتونی با شبکه مربعی از میله های سیلیکون در زمینه هوا که درآن شعاع میله های مجاور نقص خطی افزایش یافته است.. ..... ۱۱۴
شکل ۳– ۲۰ : : نمودار پاشندگی موجبر بلور فوتونی مربعی با افزایش شعاع میله های مجاور خط نقص تا $r_d = 0.4A$. ..... ۱۱۵
شکل ۳– ۲۱ : میزان عبور پالس از بلور فوتونی مربعی با افزایش شعاع میله های مجاور خط نقص تا $r_a = 0.4a$ .. ... ۱۱۵
شکل ۳– ۲۲ : نقشه گاف برای حفره های هوا در زمینه سیلیکون برای شبکه مثلثی ..... ۱۱۷
شکل ۳– ۲۳ : نمایی از یک موجبر بلور فوتونی خمیده ۶۰ درجه با شبکه مثلثی از حفره های هوا در زمینه سیلیکون، که قسمت خمیدگی در شکل مشخص است. ..... ۱۱۸
شکل ۳– ۲۴ : میزان عبور موج الکترومغناطیسی از موجبر ۶۰ درجه شکل ۳–۲۳..... ۱۱۹
شکل ۳– ۲۵ : نمایی از موجبر بلور فوتونی خمیده ۶۰ پیشنهادی..... ۱۲۰
شکل ۳– ۲۶ : : میزان عبور موج الکترومغناطیسی از موجبر ۶۰ درجه پیشنهادی ..... ۱۲۰
شکل ۳– ۲۷ : نمودار میزان عبور از موجبر بلور فوتونی ساخته شده از میله های سیلیکون در زمینه هوا که در آن نقص خطی از طریق کاهش شعاع یک ردیف از میله تا $R = ۰/۱A$ ایجاد شده است..... ۱۲۲

شکل ۳– ۲۸ : نمودارمیزان عبور از موجبربلورفوتونی ساخته شده از میله های سیلیکون در زمینه هوا که در آن نقص خطی از طریق افزایش شعاع یک ردیف از میله تا $R = ۰/۳A$ ایجاد شده است..... ۱۲۲
شکل ۳– ۲۹ : : موجبر بلور نوری که از قرار گرفتن میله هایی با شعاع $R = ۰/۱A$ و $R = ۰/۳A$ به طور متناوب در یک ردیف از بلور ایجاد شده است. ..... ۱۲۳
شکل ۳– ۳۰ : میزان عبور از موجبر بلور نوری که از قرار گرفتن یک ردیف از میله ها با شعاع $R=0.1A$ و $R=0.3A$ به طور متناوب در بلور ایجاد شده است. ..... ۱۲۳
شکل ۳– ۳۱ : نمودارتوزیع فضایی میدان الکتریکی با طول موج تابشی $\Lambda=۲,۹۵\ \mu M$، مربوط به حالتی که خط نقص ازقرار گرفتن یک ردیف از میله ها با شعاع $R = ۰/۱A$در بلور ایجاد شده است. ..... ۱۲۴
شکل ۳– ۳۲ : نمودار توزیع فضایی میدان الکتریکی با طول موج تابشی $\Lambda=۲,۹۵\ \mu M$، مربوط به موجبر بلور فوتونی که با قرار گرفتن میله ها یی با شعاع $R = ۰/۱A$ و $R = ۰/۳A$ به طور یک در میان در یک ردیف از بلور ایجاد شده است..... ۱۲۵

# فصل اول

# بررسی منابع

## ۱-۱- تاریخچه

در سالهای اخیر بلورهای فوتونی به خاطر توانایی آنها در کنترل امواج الکترومغناطیسی و کاربرد بالقوه‌شان در مدارهای مجتمع تمام نوری خیلی کوچک، توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده‌اند [۳-۱]. البته قرار گرفتن در جریان تمام کارهای مهم، کاری بس دشوار است از این رو در اینجا خلاصه‌ای از کارهای مهم مربوط به بلورهای فوتونی معرفی شده است.

در قرن نوزدهم علاوه بر مطالعه بر روی خواص الکتریکی، خواص اپتیکی مواد نیز مورد توجه قرار داشته است. در حدود یکصد و بیست سال قبل، لورد رایله[1] نشان داد ساختارهای متناوب از دی‌الکتریک‌ها دارای خاصیتی هستند که این امکان را به وجود می‌آورند که گستره‌ای محدود از فرکانس‌ها در آنها منتشر نشود. بررسی این دسته از مواد ادامه پیدا کرد تا اینکه در سال ۱۹۷۹، اوتاکا[2] تئوری دینامیکی پراش نور مرئی و ماورای بنفش[3] را چاپ کرد [۴]. هدف کلی این بود که اندرکنش نور با یک سیستم دی الکتریک ساخته شده از کره‌های مرتب شده یکسان، در یک شبکه سه بعدی مدلسازی شود. در سال ۱۹۸۷ دو کار، توسط یابلانوویچ[4] [۵] (در مرکز تحقیقات مخابراتی بل- آمریکا) و جان[5] (در دانشگاه پرینستون- آمریکا) [۶] چاپ شد که در مقاله یابلانوویچ امکان جلوگیری از گسیل خود به خودی تابش الکترومغناطیسی با استفاده از یک ساختار سه بعدی متناوب مورد بررسی قرار گرفته است. به گفته وی این شبکه می‌بایست یک شکاف(گاف) نواری فوتونی داشته باشد که این شکاف، گستره‌ای از حالت‌های ممنوعهٔ فرکانسی برای فوتون‌ها است. اما

[1] *Lord Rayleigh*
[2] *Ohtaka*
[3] *Ultraviolet*
[4] *Yablonovitch*
[5] *John*

در کار دوم جان جایگزیدگی قوی فوتون‌ها را در ابرشبکه‌های دی‌الکتریک بی‌نظم[1]، مورد بحث قرار داده بود. این دو به عنوان نقطهٔ شروع تحقیق در زمینهٔ بلورهای فوتونی و شکاف نواری فوتونی تلقی می‌شود.

## ۱-۲- معرفی بلورهای فوتونی

در قرن حاضر، کنترل ما روی مواد و ویژگی الکتریکی آنها وسعت یافته است. پیشرفت‌ها در فیزیک نیمرساناها[2] به ما اجازه داده تا بتوانیم ویژگی‌های رسانایی مواد بخصوصی را کنترل کنیم و بدین سان انقلاب ترانزیستور در الکترونیک آغاز شد. با آلیاژها و سرامیک‌های[3] جدید، دانشمندان ابررساناهای[4] دمای بالا را اختراع کردند. در دههٔ اخیر حوزهٔ جدیدی با هدف مشابه پدید آمد و آن کنترل خواص نوری مواد بود. اگر بتوانیم مواد را طوری مهندسی کنیم که خاصیت انتشار نور را داشته باشند و یا به نور اجازه دهند که در جهت‌هائی مشخص، با فرکانس‌هایی معین منتشر شود یا بتوانند نور را در مناطق بخصوصی متمرکز کنند، فناوری ما پیشرفت‌های چشمگیری به دست خواهد آورد. در این راستا بلورهای فوتونی را می‌توان ترکیبی از فیزیک حالت جامد و الکترومغناطیس دانست. بلورهای فوتونی را در دید کلی می‌توان با نیمه‌رساناهای الکتریکی مقایسه کرد زیرا همانطور که در نیمه‌رساناهای الکتریکی با استفاده از خواص این مواد و وجود شکاف نوارها می‌توان به کنترل الکترون‌ها پرداخت و وسایلی چون دیودها و ترانزیستورها را طراحی کرد، در بلورهای فوتونی نیز با ایجاد نقص‌ها در شبکه بلوری می‌توان به ساخت وسایلی از قبیل کاواک‌ها و موجبرها پرداخت که از وسایل کنترل کننده‌ی امواج الکترومغناطیسی می‌باشند. در واقع در نیمه‌رساناهای الکتریکی به کنترل الکترون‌ها می‌پردازیم و در بلورهای فوتونی به کنترل امواج الکترومغناطیسی ( نور ) می-

[1] *Disordered dielectric superlattices*
[2] *Semiconductor*
[3] *Ceramics*
[4] *Superconductor*