



۸۷/۱/۱۰۱۶۸۹

۸۷/۱۰/۲۱

دانشگاه گیلان

دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک

گرایش فوتونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی ساختار نواری بلورهای فوتونیک دو بعدی
با استفاده از روش موج تخت

از:

کاظم رضایی

استادان راهنما:

دکتر صابر فرجامی شایسته

دکتر سید محمد روضاتی

۱۳۸۷/۱۰/۱۴

مرداد ۸۷



۱۰۷۹۷۴

تقدیم به
پدر و مادر مهربانم

سپاسگزاری

خداوندگار جان و خرد را شکر می‌گویم که چون همیشه منت نهاد و با الطاف بی‌پایانش در انجام و به پایان رساندن این رساله مرا یاری نمود.

بر خود واجب می‌دانم که مراتب سپاسگزاری خویش را از تمامی اساتید بزرگوار گروه فیزیک دانشگاه گیلان، که افتخار شاگردی ایشان را داشته‌ام، بیان نمایم. از استاد ارجمند جناب آقای دکتر صابر فرجامی شایسته و جناب آقای دکتر سید محمد روضاتی که هدایت این رساله را به عهده داشتند و با رهنمودهای ارزشمند خود مرا در انجام این رساله یاری کردند تشکر می‌نمایم. از اعضای محترم کمیته‌ی پایان نامه، آقایان دکتر اسفندیار رجایی و دکتر حمیدرضا مشایخی سپاسگزاری می‌نمایم. در پایان از پدر و مادر فداکارم که همیشه مدیون آنها هستم، تشکر و سپاسگزاری می‌کنم، امیدوارم که قدردان زحمات این عزیزان باشم.

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

ش

چکیده فارسی

ص

چکیده انگلیسی

فصل اول:

معرفی بلورهای فوتونیک

۲	مقدمه	۱-۱
۴	تاریخچه	۲-۱
۶	کاربرد	۳-۱
۸	انواع بلورهای فوتونیک	۴-۱
۸	بلور فوتونیک یک بعدی	۱-۴-۱
۹	بلور فوتونیک دو بعدی	۲-۴-۱
۹	بلور فوتونیک سه بعدی	۳-۴-۱
۱۰	گاف بلورهای فوتونیک	۵-۱

فصل دوم:

روش ساخت بلورهای فوتونیک

۱۲	مقدمه	۱-۲
۱۲	ساخت بلورهای فوتونیک سه بعدی	۲-۲
۱۳	ساخت بلور فوتونیک سه بعدی بر پایه پیوند ویفر	۱-۲-۲
۱۶	ساخت بلورهای فوتونیک سه بعدی بر پایه روش‌های شیمیایی	۲-۲-۲

۱۷	ساخت بلورهای فوتونیکی دوبعدی	۳-۲
۱۷	بلورهای فوتونیکی دو بعدی ساخته شده از آرایه‌ای از فیبرها	۱-۱-۳-۲
۱۸	فیبر بلور فوتونیکی	۲-۱-۳-۲
۲۰	ساخت بلور فوتونیکی دو بعدی تخت	۲-۳-۲

فصل سوم:

بررسی بلورهای فوتونیکی یک بعدی

۲۵	مقدمه	۱-۳
۲۵	انتشار موج در محیط‌های متناوب	۲-۳
۳۰	بررسی انتشار موج در یک ساختار یک بعدی متناوب	۳-۳
۳۸	محاسبه نوار گاف در بلور فوتونیکی یک بعدی به روش موج تخت	۴-۳
۴۰	تاثیر تعداد لایه‌ها بر گاف فوتونیکی	۱-۴-۳
۴۷	تاثیر ضخامت لایه‌ها بر گاف فوتونیکی	۲-۴-۳
۵۰	تاثیر افزایش اختلاف ضریب گذردهی الکتریکی بر گاف فوتونیکی	۳-۴-۳

فصل چهارم:

بررسی ساختار نواری در بلورهای فوتونیکی دو بعدی

۵۳	مقدمه	۱-۴
۵۳	معادله‌های ویژه مقداری در بلورهای فوتونیکی دو بعدی	۲-۴
۵۶	دو خاصیت مهم بلورهای فوتونیکی	۳-۴
۵۶	قانون مقیاس	۱-۳-۴
۵۷	قانون تقارن وارونی زمان	۲-۳-۴
۵۸	محاسبه‌ی ضرایب بسط فوریه تابع دی‌الکتریک	۴-۴
۶۰	بررسی نمودار پاشندگی در بلورهای فوتونیکی دو بعدی	۵-۴

فصل پنجم:

بررسی موجبری در بلورهای فوتونیک دو بعدی

۷۵	مقدمه	۱-۵
۷۹	روش اجزای محدود	۲-۵
۸۲	بررسی موجبری در بلورهای فوتونیک دو بعدی با استفاده از روش اجزای محدود	۳-۵

فصل ششم:

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱۰۴	نتیجه‌گیری	۱-۶
۱۰۵	پیشنهادات	۲-۶
۱۰۷	مراجع	
۱۱۰	پیوست الف	
۱۱۱	پیوست ب	

فهرست شکل ها

صفحه	عنوان	شکل
۲	نمایش بلور اپال	شکل (۱-۱)
۳	نمایش بال پروانه	شکل (۲-۱)
۳	نمایش رنگ‌های منعکس شده در نوارهای ممنوعه فوتونیک بال پروانه	شکل (۳-۱)
۵	نمایش ساختار افزازه چوبی در محدوده فرکانسی ریز موج	شکل (۴-۱)
۵	نمایش ساختار مارپیچ درهم بافته در محدوده فرکانسی فروسرخ نزدیک	شکل (۵-۱)
۶	نمایی کلی از کاربردهای بلورهای فوتونیک	شکل (۶-۱)
۶	الف) آینه با اتلاف پایین ب) نمایش موجبر بلور فوتونیک دو بعدی، پ) نمایی از رایانه‌های نوری و ت) فیلترهای نوری	شکل (۷-۱)
۷	نمایش دونوع فیبر بلور فوتونیک و کاربرد آن در مخابرات	شکل (۸-۱)
۷	نمایش اثر ابرمنشوری	شکل (۹-۱)
۷	جدا سازی کانال‌های مخابرات نوری با استفاده از اثر ابرمنشور	شکل (۱۰-۱)
۸	ارائه تصویر حقیقی از منبع نقطه‌ای نور با پدیده شکست منفی.	شکل (۱۱-۱)
۸	نمایی از بلور فوتونیک یک بعدی	شکل (۱۲-۱)
۹	ساختار ارائه شده برای بلور فوتونیک دو بعدی	شکل (۱۳-۱)
۹	نمای بلور فوتونیک سه بعدی	شکل (۱۴-۱)
۱۳	نمای بلور فوتونیک سه بعدی با برروی هم قرار دادن توده ای از ویفرهای سیلیکونی	شکل (۱-۲)
۱۴	ایجاد طرح نوارگونه از GaAs بر روی زیرلایه‌ای از GaAs به همراه متوقف کننده حکاکی InGaAs برای ساخت بلور فوتونیک سه بعدی برپایه جوش ویفر (مرحله ۱)	شکل (۲-۲)
۱۴	نمای پیوند ویفرهای GaAs در محیط H_2 (مرحله ۲)	شکل (۳-۲)
۱۵	برداشتن انتخابی یکی از زیرلایه های GaAs به همراه متوقف کننده حکاکی آن به روش حکاکی شیمیایی مرطوب (مرحله ۳)	شکل (۴-۲)
۱۵	تقسیم دوباره ویفرهای GaAs بدست آمده و پیوند آن ها در محیط H_2 (مرحله ۴)	شکل (۵-۲)

- شکل (۶-۲) برداشتن انتخابی یکی از زیرلایه‌های GaAs به همراه متوقف کننده حکاکی آن به روش حکاکی شیمیایی مرطوب و تهیه ویفری با چهار لایه نوارگونه
- شکل (۷-۲) بلور فوتونیک سه بعدی تشکیل شده از حفره‌های هوا در آرایه‌ای از تیتانیا ساخته شده بر پایه روش شیمیایی
- شکل (۸-۲) تهیه بلور فوتونیک دو بعدی با استفاده از فن آوری ساخت فیبرها
- شکل (۹-۲) نمای فیبر بلور فوتونیک مرکز پر
- شکل (۱۰-۲) نمای انواع فیبرهای سوراخ دار
- شکل (۱۱-۲) طرح فیبر نوار ممنوعه فوتونیک و دو فیبر در حال انتقال پرتو در هسته تو خالی خود
- شکل (۱۲-۲) طرحی از یک زیر لایه SOI برای ساخت بلور فوتونیک دو بعدی تخت
- شکل (۱۳-۲) نمایی از ماده مقاوم (PMMA) بر روی SOI برای ساخت بلور فوتونیک دو بعدی تخت
- شکل (۱۴-۲) قرار دادن نقش ایجاد شده با پرتو نگاری الکترونی بر روی PMMA در مخلوطی از متانول و اتوکسی تانول برای پاک کردن سطح
- شکل (۱۵-۲) استفاده از Chemically Assisted Ion Beam Etching برای حکاکی لایه سیلیکونی و انتقال طرح به لایه زیرین
- شکل (۱۶-۲) برداشتن ماده PMMA از روی سطح سیلیکونی
- شکل (۱۷-۲) نمای برش از زیر لایه SiO_2 و تشکیل بلور فوتونیک دو بعدی تخت
- شکل (۱-۳) ساختار یک بعدی متناوب برای دو ماده با ضخامت و ثابت دی‌الکتریک متفاوت
- شکل (۲-۳) نواحی منجر به گاف در رابطه پاشندگی تحلیلی بدست آمده برای بلور فوتونیک یک بعدی ۲۰ لایه‌ای به ازای $d_A = d_B = \frac{d}{4}$, $\epsilon_B = 4/5$, $\epsilon_A = 2/25$.
- شکل (۳-۳) رابطه پاشندگی تحلیلی بدست آمده برای بلور فوتونیک یک بعدی ۲۰ لایه‌ای به ازای $d_A = d_B = \frac{d}{4}$, $\epsilon_B = 4/5$, $\epsilon_A = 2/25$
- شکل (۴-۳) نمودار عبور بلور فوتونیک یک بعدی ۲۰ لایه‌ای به ازای $d_A = d_B = \frac{d}{4}$, $\epsilon_B = 4/5$, $\epsilon_A = 2/25$

- شکل (۵-۳) نمودار رابطه پاشندگی $\omega = \frac{CK}{\sqrt{\epsilon}}$ برای یک دی الکتریک ساده ۳۷
- شکل (۶-۳) نمودار بازآرایی شده رابطه پاشندگی $\omega = \frac{CK}{\sqrt{\epsilon}}$ برای یک دی الکتریک ساده در منطقه اول بریلوئن ۳۷
- شکل (۷-۳) نمودار پاشندگی در یک دی الکتریک ساده به ازای $\epsilon_{GaAs} = 12$ ۴۱
- شکل (۸-۳) نمودار پاشندگی در یک بلور فوتونیک یک بعدی ۲ لایه‌ای به ازای $\epsilon_{air} = 1$ ۴۱
- شکل (۹-۳) نمودار عبور در یک بلور فوتونیک یک بعدی ۲ لایه‌ای به ازای $\epsilon_{GaAs} = 12$ ، $\epsilon_{air} = 1$ و $\frac{a}{d} = 0.18$ که در آن a گاف هوا و d دوره تناوب شبکه است ۴۲
- شکل (۱۰-۳) نمودار پاشندگی در یک بلور فوتونیک یک بعدی ۵ لایه‌ای به ازای $\epsilon_{air} = 1$ و $\frac{a}{d} = 0.18$ که در آن a گاف هوا و d دوره تناوب شبکه است ۴۲
- شکل (۱۱-۳) نمودار عبور در یک بلور فوتونیک یک بعدی ۵ لایه‌ای به ازای $\epsilon_{GaAs} = 12$ ، $\epsilon_{air} = 1$ و $\frac{a}{d} = 0.18$ که در آن a گاف هوا و d دوره تناوب شبکه است ۴۳
- شکل (۱۲-۳) نمودار پاشندگی در یک بلور فوتونیک یک بعدی ۱۵ لایه‌ای به ازای $\epsilon_{air} = 1$ و $\frac{a}{d} = 0.18$ که در آن a گاف هوا و d دوره تناوب شبکه است ۴۳
- شکل (۱۳-۳) نمودار عبور در یک بلور فوتونیک یک بعدی ۱۵ لایه‌ای به ازای $\epsilon_{air} = 1$ و $\frac{a}{d} = 0.18$ که در آن a گاف هوا و d دوره تناوب شبکه است ۴۴
- شکل (۱۴-۳) نمودار پاشندگی در یک بلور فوتونیک یک بعدی ۲۰ لایه‌ای به ازای $\epsilon_{air} = 1$ و $\frac{a}{d} = 0.18$ که در آن a گاف هوا و d دوره تناوب شبکه است ۴۴
- شکل (۱۵-۳) نمودار عبور در یک بلور فوتونیک یک بعدی ۲۰ لایه‌ای به ازای $\epsilon_{air} = 1$ و $\frac{a}{d} = 0.18$ که در آن a گاف هوا و d دوره تناوب شبکه است ۴۵
- شکل (۱۶-۳) نمودار پاشندگی در یک بلور فوتونیک یک بعدی ۶۰ لایه‌ای به ازای $\epsilon_{air} = 1$ و $\frac{a}{d} = 0.18$ که در آن a گاف هوا و d دوره تناوب شبکه است ۴۵
- شکل (۱۷-۳) نمودار عبور در یک بلور فوتونیک یک بعدی ۶۰ لایه‌ای به ازای $\epsilon_{air} = 1$ و $\frac{a}{d} = 0.18$ که در آن a گاف هوا و d دوره تناوب شبکه است ۴۶

- شکل (۱۸-۳) نمودار پاشندگی در یک بلور فوتونیک یک بعدی ۱۰۰ لایه‌ای به‌ازای $\epsilon_{air} = 1$ ،
 $\epsilon_{GaAs} = 12$ و $\frac{a}{d} = 0.18$ که در آن a گاف هوا و d دوره تناوب شبکه است
 ۴۶
- شکل (۱۹-۳) نمودار عبور در یک بلور فوتونیک یک بعدی ۱۰۰ لایه‌ای به‌ازای $\epsilon_{air} = 1$ ،
 $\epsilon_{GaAs} = 12$ و $\frac{a}{d} = 0.18$ که در آن a گاف هوا و d دوره تناوب شبکه است
 ۴۷
- شکل (۲۰-۳) نمودار پاشندگی در یک بلور فوتونیک یک بعدی ۶۰ لایه‌ای به‌ازای $\epsilon_{air} = 1$ ،
 $\epsilon_{GaAs} = 12$ و $\frac{a}{d} = 0.2$ که در آن a گاف هوا و d دوره تناوب شبکه است
 ۴۸
- شکل (۲۱-۳) نمودار عبور در یک بلور فوتونیک یک بعدی ۶۰ لایه‌ای به‌ازای $\epsilon_{air} = 1$ ،
 $\epsilon_{GaAs} = 12$ و $\frac{a}{d} = 0.2$ که در آن a گاف هوا و d دوره تناوب شبکه است
 ۴۸
- شکل (۲۲-۳) نمودار پاشندگی در یک بلور فوتونیک یک بعدی ۱۰۰ لایه‌ای به‌ازای $\epsilon_{air} = 1$ ،
 $\epsilon_{GaAs} = 12$ و $\frac{a}{d} = 0.2$ که در آن a گاف هوا و d دوره تناوب شبکه است
 ۴۹
- شکل (۲۳-۳) نمودار عبور در یک بلور فوتونیک یک بعدی ۱۰۰ لایه‌ای به‌ازای $\epsilon_{air} = 1$ ،
 $\epsilon_{GaAs} = 12$ و $\frac{a}{d} = 0.2$ که در آن a گاف هوا و d دوره تناوب شبکه است
 ۴۹
- شکل (۲۴-۳) نمودار پاشندگی در یک بلور فوتونیک یک بعدی ۱۵ لایه‌ای به‌ازای $\epsilon_{air} = 1$ ،
 $\epsilon_{GaAs} = 17.7$ و $\frac{a}{d} = 0.2$ که در آن a گاف هوا و d دوره تناوب شبکه است
 ۵۰
- شکل (۲۵-۳) نمودار عبور در یک بلور فوتونیک یک بعدی ۱۵ لایه‌ای به‌ازای $\epsilon_{air} = 1$ ،
 $\epsilon_{GaAs} = 17.7$ و $\frac{a}{d} = 0.2$ که در آن a گاف هوا و d دوره تناوب شبکه است
 ۵۱
- شکل (۱-۴) نمای قطبش E شبکه مربعی دو بعدی از میله‌های دی الکتریک
 ۵۵
- شکل (۲-۴) نمای قطبش H شبکه مربعی دو بعدی از میله‌های دی الکتریک
 ۵۵
- شکل (۳-۴) الف) نمایی از یک بلور فوتونیک دو بعدی مربعی در فضای حقیقی
 ۶۰
- شکل (۳-۴) ب) طرح بلور فوتونیک در فضای وارون
 ۶۰
- شکل (۴-۴) الف) نمایی از بلور فوتونیک دو بعدی مثلثی در فضای حقیقی
 ۶۰
- شکل (۴-۴) ب) طرح بلور فوتونیک دو بعدی مثلثی در فضای وارون
 ۶۱

- شکل (۴-۵) نمودار نوار گاف مد TE بلور فوتونیک دو بعدی مربعی به ازای $r = 0.2$, $r = 0.4$ ، $\epsilon_b = 12$, $\epsilon_a = 1$ ۶۱
- شکل (۴-۶) نمودار نوار گاف مد TE بلور فوتونیک دو بعدی مربعی به ازای $r = 0.2$, $r = 0.4$ ، $\epsilon_b = 1$, $\epsilon_a = 12$ ۶۲
- شکل (۴-۷) نمودار نوار گاف مد TM بلور فوتونیک دو بعدی مربعی به ازای $r = 0.2$, $r = 0.4$ ، $\epsilon_b = 12$, $\epsilon_a = 1$ ۶۲
- شکل (۴-۸) نمودار نوار گاف مد TM بلور فوتونیک دو بعدی مربعی به ازای $r = 0.2$, $r = 0.4$ ، $\epsilon_b = 1$, $\epsilon_a = 12$ ۶۳
- شکل (۴-۹) نمودار نوار گاف مد TE بلور فوتونیک دو بعدی مثلثی به ازای $r = 0.2$, $r = 0.4$ ، $\epsilon_b = 12$, $\epsilon_a = 1$ ۶۴
- شکل (۴-۱۰) نمودار نوار گاف مد TE بلور فوتونیک دو بعدی مثلثی به ازای $r = 0.2$, $r = 0.4$ ، $\epsilon_b = 1$, $\epsilon_a = 12$ ۶۴
- شکل (۴-۱۱) نمودار نوار گاف مد TM بلور فوتونیک دو بعدی مثلثی به ازای $r = 0.2$, $r = 0.4$ ، $\epsilon_b = 12$, $\epsilon_a = 1$ ۶۵
- شکل (۴-۱۰دو) نمودار نوار گاف مد TM بلور فوتونیک دو بعدی مثلثی به ازای $r = 0.2$, $r = 0.4$ ، $\epsilon_b = 1$, $\epsilon_a = 12$ ۶۵
- شکل (۴-۱۳) نمودار نوار گاف مد TE بلور فوتونیک دو بعدی مربعی به ازای $r = 0.4$ ، $\epsilon_b = 1$, $\epsilon_a = 12$, $\epsilon_a = 4.2$ ۶۶
- شکل (۴-۱۴) نمودار نوار گاف مد TE بلور فوتونیک دو بعدی مربعی به ازای $r = 0.4$ ، $\epsilon_a = 1$, $\epsilon_b = 12$, $\epsilon_b = 4.2$ ۶۷
- شکل (۴-۱۵) نمودار نوار گاف مد TM بلور فوتونیک دو بعدی مربعی به ازای $r = 0.4$ ، $\epsilon_a = 1$, $\epsilon_b = 12$, $\epsilon_b = 4.2$ ۶۷
- شکل (۴-۱۶) نمودار نوار گاف مد TM بلور فوتونیک دو بعدی مربعی به ازای $r = 0.4$ ، $\epsilon_b = 1$, $\epsilon_a = 12$, $\epsilon_a = 4.2$ ۶۸
- شکل (۴-۱۷) نمودار نوار گاف مد TE بلور فوتونیک دو بعدی مثلثی به ازای $r = 0.4$ ، $\epsilon_b = 1$, $\epsilon_a = 12$, $\epsilon_a = 4.2$ ۶۸

- شکل (۴-۱۸) نمودار نوار گاف مد TE بلور فوتونیک دو بعدی مثلثی به ازای $r = 0.4$ ، $\epsilon_b = 12$ ، $\epsilon_a = 4.2$ ، $\epsilon_b = 12$ ، $\epsilon_a = 1$ ۶۹
- شکل (۴-۱۹) نمودار نوار گاف مد TM بلور فوتونیک دو بعدی مثلثی به ازای $r = 0.4$ ، $\epsilon_a = 1$ ، $\epsilon_b = 12$ ، $\epsilon_b = 4.2$ ، $\epsilon_a = 12$ ۶۹
- شکل (۴-۲۰) نمودار نوار گاف مد TM بلور فوتونیک دو بعدی مثلثی به ازای $r = 0.4$ ، $\epsilon_b = 1$ ، $\epsilon_a = 12$ ، $\epsilon_a = 4.2$ ۷۰
- شکل (۴-۲۱) نمودار نوار گاف مد TE و TM بلور فوتونیک دو بعدی مربعی به ازای $r = 0.4$ ، $\epsilon_b = 12$ ، $\epsilon_a = 1$ ۷۰
- شکل (۴-۲۲) نمودار نوار گاف مد TE و TM بلور فوتونیک دو بعدی مربعی به ازای $r = 0.4$ ، $\epsilon_b = 1$ ، $\epsilon_a = 12$ ۷۱
- شکل (۴-۲۳) نمودار نوار گاف مد TE و TM بلور فوتونیک دو بعدی مثلثی به ازای $r = 0.4$ ، $\epsilon_b = 12$ ، $\epsilon_a = 1$ ۷۱
- شکل (۴-۲۴) نمودار نوار گاف مد TE و TM بلور فوتونیک دو بعدی مثلثی به ازای $r = 0.4$ ، $\epsilon_b = 1$ ، $\epsilon_a = 12$ ۷۲
- شکل (۵-۱) الف (الف) انتشار موج در نقص L با دوره ی تناوب، $a = 0.375 \mu m$ و شعاع $r = 0.107 \mu m$ برای مد TE بلور فوتونیک دو بعدی مربعی با $\lambda = 1 \mu m$ (ب) تا ت ۸۴
- شکل سه بعدی انتشار موج در نقص L، (پ) مرز میدان الکتریکی در نقص L و (ت) بردار میدان مغناطیسی در نقص L ($\epsilon_a = 1$ ، $\epsilon_b = 17/7$)
- شکل (۵-۲) الف (الف) انتشار موج در نقص L با دوره ی تناوب، $a = 0.375 \mu m$ و شعاع $r = 0.107 \mu m$ برای مد TE بلور فوتونیک دو بعدی مربعی با $\lambda = 2 \mu m$ (ب) تا ت ۸۵
- شکل سه بعدی انتشار موج در نقص L، (پ) مرز میدان الکتریکی در نقص L و (ت) بردار میدان مغناطیسی در نقص L ($\epsilon_a = 1$ ، $\epsilon_b = 17/7$)
- شکل (۵-۳) الف (الف) انتشار موج در نقص L با دوره ی تناوب، $a = 0.375 \mu m$ و شعاع $r = 0.107 \mu m$ برای مد TE بلور فوتونیک دو بعدی مربعی با $\lambda = 1/8 \mu m$ (ب) تا ت ۸۶
- شکل سه بعدی انتشار موج در نقص L، (پ) مرز میدان الکتریکی در نقص L و (ت) بردار میدان مغناطیسی در نقص L ($\epsilon_a = 1$ ، $\epsilon_b = 17/7$)

- ۸۷ (الف) انتشار موج در نقص T با دوره‌ی تناوب، $a = 0.375 \mu m$ و شعاع
شکل (۴-۵) الف
تات $r = 0.107 \mu m$ برای مد TE بلور فوتونیک دو بعدی مربعی با $\lambda = 1.65 \mu m$ ، (ب)
شکل سه بعدی انتشار موج در نقص T، (پ) مرز میدان الکتریکی در نقص T و
(ت) بردار میدان مغناطیسی در نقص T ($\epsilon_a = 1$, $\epsilon_b = 17/7$).
- ۸۸ (الف) انتشار موج در نقص T با دوره‌ی تناوب، $a = 0.375 \mu m$ و شعاع
شکل (۵-۵) الف
تات $r = 0.107 \mu m$ برای مد TE بلور فوتونیک دو بعدی مربعی با $\lambda = 1.83 \mu m$ ، (ب)
شکل سه بعدی انتشار موج در نقص T، (پ) مرز میدان الکتریکی در نقص T و
(ت) بردار میدان مغناطیسی در نقص T ($\epsilon_a = 1$, $\epsilon_b = 17/7$).
- ۸۹ (الف) انتشار موج در نقص T با دوره‌ی تناوب، $a = 0.375 \mu m$ و شعاع
شکل (۶-۵) الف
تات $r = 0.107 \mu m$ برای مد TE بلور فوتونیک دو بعدی مربعی با $\lambda = 1.86 \mu m$ ، (ب)
شکل سه بعدی انتشار موج در نقص T، (پ) مرز میدان الکتریکی در نقص T و
(ت) بردار میدان مغناطیسی در نقص T ($\epsilon_a = 1$, $\epsilon_b = 17/7$).
- ۹۰ (الف) انتشار موج در نقص Y نامتقارن با دوره‌ی تناوب، $a = 0.375 \mu m$ و شعاع
شکل (۷-۵) الف
تات $r = 0.107 \mu m$ برای مد TE بلور فوتونیک دو بعدی مربعی با $\lambda = 1.86 \mu m$ ، (ب)
شکل سه بعدی انتشار موج در نقص T، (پ) مرز میدان الکتریکی در نقص T و
(ت) بردار میدان مغناطیسی در نقص T ($\epsilon_a = 1$, $\epsilon_b = 17/7$).
- ۹۱ (الف) انتشار موج در نقص Y متقارن با دوره‌ی تناوب، $a = 0.375 \mu m$ و شعاع
شکل (۸-۵) الف
تات $r = 0.107 \mu m$ برای مد TE بلور فوتونیک دو بعدی مربعی با $\lambda = 1.9 \mu m$ ، (ب)
شکل سه بعدی انتشار موج در نقص Y برای مد TE با $\lambda = 1.9 \mu m$ ، (پ) انتشار
موج در نقص Y متقارن برای مد TE با $\lambda = 1.92 \mu m$ ، T و (ت) شکل سه بعدی
انتشار موج در نقص Y برای مد TE با $\lambda = 1.92 \mu m$ ($\epsilon_a = 1$, $\epsilon_b = 17/7$).

- شکل (۹-۵) الف (الف) انتشار موج در نقص Y متقارن با دوره‌ی تناوب، $a = 0.1375 \mu m$ و شعاع $r = 0.107 \mu m$ برای مد TE بلور فوتونیک دو بعدی مربعی با $\lambda = 1 \mu m$ ، (ب) تا ت
- شکل سه بعدی انتشار موج در نقص Y برای مد TE با $\lambda = 1 \mu m$ ، (پ) انتشار موج در نقص Y متقارن برای مد TE با $\lambda = 2 \mu m$ ، T و (ت) (شکل سه بعدی انتشار موج در نقص Y برای مد TE با $\lambda = 2 \mu m$ ، $\epsilon_a = 1$ ، $\epsilon_b = 17/7$).
- شکل (۱۰-۵) الف (الف) انتشار موج با تزویج کاواک‌ها در بلور فوتونیک دو بعدی مربعی با دوره‌ی تناوب، $a = 0.1375 \mu m$ و شعاع $r = 0.107 \mu m$ برای مد TE با $\lambda = 1 \mu m$ ، (ب) تا ت
- شکل سه بعدی انتشار موج با تزویج کاواک‌ها، (پ) مرز میدان الکتریکی و (ت) بردار میدان مغناطیسی ($\epsilon_a = 1$ ، $\epsilon_b = 12$).
- شکل (۱۱-۵) الف (الف) انتشار موج با تزویج کاواک‌ها در بلور فوتونیک دو بعدی مربعی با دوره‌ی تناوب، $a = 0.1375 \mu m$ و شعاع $r = 0.107 \mu m$ برای مد TE با $\lambda = 0.195 \mu m$ ، (ب) تا ت
- شکل سه بعدی انتشار موج با تزویج کاواک‌ها، (پ) مرز میدان الکتریکی و (ت) بردار میدان مغناطیسی ($\epsilon_a = 1$ ، $\epsilon_b = 12$).
- شکل (۱۲-۵) الف (الف) انتشار موج با تزویج کاواک‌ها در بلور فوتونیک دو بعدی مربعی با دوره‌ی تناوب، $a = 0.1375 \mu m$ و اندازه‌ی ضلع مربع $l = 114 \mu m$ برای مد TE با (الف) تا ت
- $\lambda = 1 \mu m$ ، (ب) $\lambda = 0.1687 \mu m$ ، (پ) $\lambda = 0.168 \mu m$ ($\epsilon_a = 1$ ، $\epsilon_b = 12$).
- شکل (۱۳-۵) الف (الف) انتشار موج با تزویج کاواک‌ها در بلور فوتونیک دو بعدی مربعی با دوره‌ی تناوب، $a = 0.1375 \mu m$ و شعاع $r = 114 \mu m$ برای مد TE با $\lambda = 0.1688 \mu m$ ، (ب) تا ت
- شکل سه بعدی انتشار موج با تزویج کاواک‌ها، (پ) مرز میدان الکتریکی و (ت) بردار میدان مغناطیسی ($\epsilon_a = 1$ ، $\epsilon_b = 12$).
- شکل (۱۴-۵) الف (الف) انتشار موج با تزویج کاواک‌ها در بلور فوتونیک دو بعدی مربعی با دوره‌ی تناوب، $a = 0.1375 \mu m$ و شعاع $r = 114 \mu m$ برای مد TE با (الف) $\lambda = 0.1676 \mu m$ تا ت
- (ب) $\lambda = 0.1677 \mu m$ ، (پ) $\lambda = 0.168 \mu m$ و (ت) $\lambda = 0.169 \mu m$ ($\epsilon_a = 1$ ، $\epsilon_b = 12$).

- شکل (۵-۱۵) انتشار موج با تزویج کاواک‌ها در بلور فوتونیک دو بعدی مربعی با دوره‌ی تناوب ،
 الف تا ب
 انتشار موج با شعاع $a = 0.375 \mu m$ و شعاع $r = 1/4 \mu m$ برای مد TE با (الف) $\lambda = 0.70 \mu m$ ،
 (ب) $\lambda = 0.64 \mu m$ ($\epsilon_a = 1$, $\epsilon_b = 12$) .
- شکل (۵-۱۶) انتشار موج در نقص خطی بلور فوتونیک دو بعدی مربعی با دوره‌ی تناوب ،
 الف تا ت
 انتشار موج در نقص خطی بلور فوتونیک دو بعدی مربعی با دوره‌ی تناوب ،
 TE و (پ) و (ت) برای مد TM ($\epsilon_a = 12$, $\epsilon_b = 1$) .
 در $r = 0.15 \mu m$ و شعاع $a = 0.375 \mu m$ در $\lambda = 1/4 \mu m$ (الف) و (ب) برای مد
- شکل (۵-۱۷) انتشار موج در نقص خطی بلور فوتونیک دو بعدی مثلثی با دوره‌ی
 الف تا ت
 انتشار موج در نقص خطی بلور فوتونیک دو بعدی مثلثی با دوره‌ی
 تناوب ، $a = 0.375 \mu m$ و شعاع $r = 0.15 \mu m$ در $\lambda = 1/4 \mu m$ (الف) و (ب) برای
 مد TE و (پ) و (ت) برای مد TM ($\epsilon_a = 1$, $\epsilon_b = 12$) .
- شکل (۵-۱۸) انتشار موج در نقص خطی بلور فوتونیک دو بعدی تناوب ،
 الف تا ت
 انتشار موج در نقص خطی بلور فوتونیک دو بعدی تناوب ،
 فوتونیک مربعی ، (ب) مد TM بلور فوتونیک مربعی ، (پ) مد TE بلور فوتونیک
 مثلثی و (ت) مد TM ($\epsilon_a = 1$, $\epsilon_b = 12$) .
 در $r = 0.15 \mu m$ و شعاع $a = 0.375 \mu m$ در $\lambda = 1/7 \mu m$ (الف) مد TE بلور

بررسی ساختار نواری بلورهای فوتونیک دو بعدی با استفاده از روش موج تخت

کاظم رضایی

بلورهای فوتونیک ساختارهای دی‌الکتریک یا فلزی متناوبی هستند که با ویژگی‌های منحصر به فرد خود امکان کنترل نور را فراهم می‌نمایند. بارزترین شاخص این ساختارها، گاف نوار فوتونی بوده که یک ناحیه‌ی فرکانسی است که در آن هیچ‌گونه مد الکترومغناطیسی وجود ندارد و روش‌های متنوعی برای محاسبه‌ی آن ارائه شده است. در این راستا با استفاده از روش عددی موج تخت نوارگاف فوتونی و پارامترهای موثر بر آن در بلورهای فوتونیک دو بعدی را مورد بررسی قرار می‌دهیم. در این پایان نامه نمودارهای رابطه‌ی پاشندگی برای بلورهای فوتونیک یک بعدی و دو بعدی را با استفاده از حل عددی معادله‌ی موج محاسبه نموده و تاثیر N تعداد لایه‌ها بر روی نوار گاف فوتونی برای $\epsilon_a = 1$ (هوا) و $\epsilon_b = 12$ (گالیم ارسناید) را به‌ازای $N = 2, 5, 15, 20, 60, 100$ در بلور فوتونیک یک بعدی مطالعه می‌کنیم. ساختار نواری به‌ازای $N \geq 4$ حاصل می‌شود، با افزایش N موقعیت و پهنای ناحیه‌ی ممنوعه و عبوری یکسان باقی می‌ماند. و نتایج به صورت واضح ناحیه‌ی گاف را که با افزایش پهنای دی‌الکتریک نسبت به ناحیه هوا به سمت طول موج‌های بالاتر انتقال می‌یابد را نشان می‌دهد. در بلورهای فوتونیک دو بعدی با افزایش شعاع سوراخ‌های هوا، پهنای ساختار نواری افزایش یافته و با افزایش شعاع میله‌های دی‌الکتریک، پهنای ساختار نواری کاهش یافته و به سمت فرکانس‌های بالاتر انتقال می‌یابد. در بلورهای فوتونیک دو بعدی با افزایش اختلاف بین ضریب‌های گذردهی الکتریکی، پهنای ساختار نواری افزایش خواهد یافت. با مقایسه‌ی نمودار پاشندگی بلورهای فوتونیک سوراخ‌دار و میله‌ای شکل مشاهده می‌کنیم که ساختار نواری مد TM در بلور فوتونیک نوع میله‌ای بزرگتر از مد TE بوده و بر عکس آن در بلورهای فوتونیک سوراخ‌دار، ساختار نواری در مد TE بزرگتر از مد TM می‌باشد. با ایجاد انواع نقص در ساختار بلور فوتونیک می‌توان نور را در ساختار جایگزیده نموده و یا نور را از یک نقطه به نقطه‌ی دیگر منتقل نمود و از این نقص‌ها در ساخت وسایل نوری گوناگونی مانند مدارهای مجتمع نوری، فیلتر کانال-سقوط، جداکننده‌های نوری استفاده می‌شود.

کلید واژه: بلورهای فوتونیک دو بعدی، نوار گاف فوتونی، روش موج تخت

Abstract:

Investigation of Photonic Band Structure in 2D Photonic Crystals by using Plane Wave Method

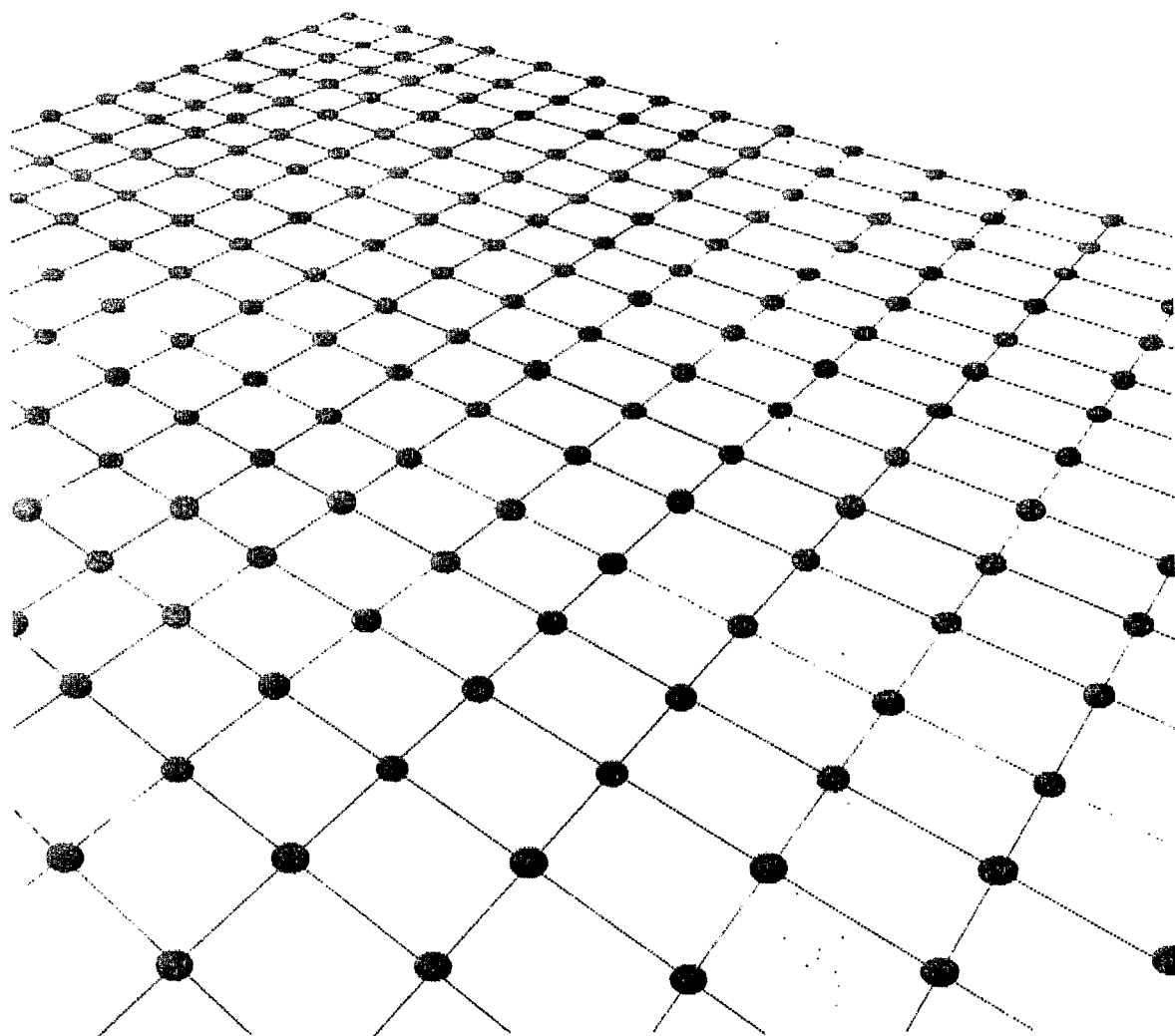
Kazem Rezaei

Photonic crystals (PCs) are a new class of materials is artificial periodic dielectric or metallic structures which enable us to controlling and manipulation of light. The most important and manifest properties of these structures are photonic band structures, namely, a range frequencies of light unable to propagate inside the crystals. In PCs, the photon plays the role of electron in semiconductors. Several methods have been introduced to investigate PC structures; we use plane wave method to determine photonic band structure in 2D PCs. In this thesis, dispersion relation diagrams have been calculated for 1D and 2D dielectric PCs using numerical solution of wave equation. We also studied the dependence of dispersion relation on N (number of unit cells) for $\epsilon_a = 1$ (*air*), $\epsilon_b = 12$ (*GaAs*) and $\epsilon_b = 17.7$ (*InSb*) in diagrams of 1D PCs for $N = 2, 5, 15, 20, 60$. and 100 The band structures have been reported for $N \geq 4$ in 1D PCs. By increasing N the position and width of allowed and forbidden regions remain the same. The results clearly reveal the gap zones shift towards the higher frequency for increasing dielectric width (relative width compared to air). In 2D PCs by increasing radius of air holes, width of photonic band structure increases and with increasing radius of dielectric rods, width of photonic band structure decreases and shifts toward higher wavelength. In 2D PCs by increasing difference permittivity the band structure increases. By comparison of dispersion relation diagrams of 2D hole-type PC and 2D rod-type PC we observe that the band structure in TM mode for 2D rod-type PC is bigger than that of TE mode. Vice versa for 2D hole-type PC the band structure in TE mode is bigger than TM mode. In addition a defect in the PC structure can lead to localized or propagated photonic states in the gap. We use line defect and point defect for create new optical devices such as optical integration circuit, channel- drop filter and beam splitter.

Key words: Photonic Crystals, Photonic Band Structure, Plane Wave Method

فصل اول

معرفی بلورهای فوتونیک

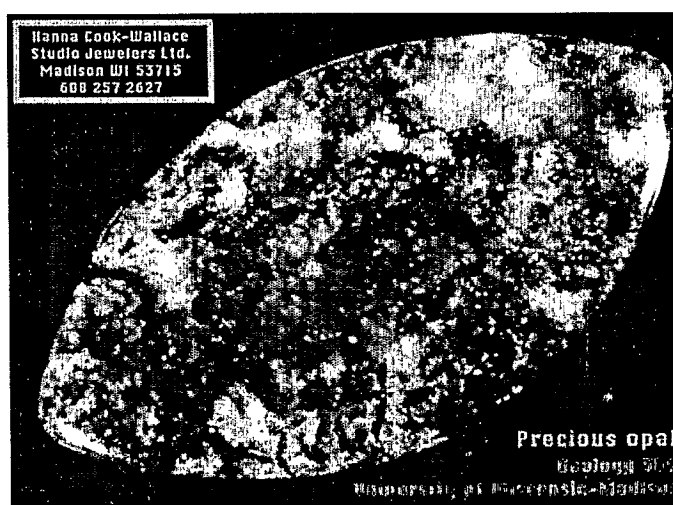


در این فصل به معرفی بلورهای فوتونیک پرداخته و تاریخچه، کاربرد، انواع و مفهوم گاف در آنها را بررسی می‌کنیم. بلورهای فوتونیک^۱ ساختارهای دی‌الکتریک متناوبی هستند که با ویژگی‌های منحصر به فرد خود توانایی کنترل نور را دارند [۱،۲،۳،۴]. بلورهای فوتونیک از قرار گرفتن پراکننده‌های متناوب در شبکه‌های منظم پدید آمده که با نور برهم‌کنش می‌نمایند. این ساختارهای متناوب در صورتی خصوصیات بلور فوتونیک از خود نشان می‌دهند که دوره تناوب شبکه آنها از مرتبه طول موج نور فرودی باشد. در صورتی که پراکننده‌ها شکل مناسبی داشته باشند، پرتوهای شکسته و بازتابیده شده در اثر برخورد با این پراکننده‌ها، نه تنها پرتو پراکنده شده بلکه پرتوی که در امتداد ساختار می‌باشد را نیز خنثی می‌نمایند. در این حالت چون نور توانایی انتشار در امتداد ساختار را ندارد، به علت پایداری انرژی، از بلور فوتونیک منعکس و یا به عبارتی ورود چنین نوری به بلور فوتونیک ممنوع می‌باشد.

بدون توجه به جهت تابش نور به بلور، در صورتی که نور در محدوده خاصی از طول موج‌ها باشد نوار ممنوعه فوتونی به وجود می‌آید (در فیزیک حالت جامد، در مورد الکترون‌ها نوار ممنوعه الکترونی را مشاهده می‌کنیم).

محیطی که در برابر نور نفوذ ناپذیر است می‌تواند نور را به گونه‌های مختلف هدایت نماید [۵،۶]. به عنوان مثال با ایجاد یک کاواک در ماده می‌توان نور را درون ماده حبس کرده [۷]. و یا با ساختن یک تونل در ماده می‌توان یک موجبر ساخت [۸]. حبس و هدایت نور کاربردهای فراوانی در زمینه‌ی مخابرات و کامپیوتر دارد [۹].

در طبیعت نمونه‌های زیبایی از این بلورها را می‌توان مشاهده نمود. برخی از سنگ‌های معدنی (بلورهای اپال^۲) و بال‌های برخی از پروانه‌ها نمونه‌هایی از این مواردند (شکل‌های ۱-۱ و ۱-۲).



شکل ۱-۱- نمایش بلور اپال [۱۰].

^۱ - Photonic Crystals

^۲ - Opal Crystals