دانشگاه تبریز

دانشکده فیزیک

گروه حالت‌جامد و الکترونیک

پایان‌نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته فیزیک حالت‌جامد و الکترونیک

عنوان

بررسی تزویج نوری میکروکاواک با موجبر خطی در یک بلور فوتونی دو بعدی

استادان راهنما

دکتر منوچهر کلافی-دکتر علی سلطانی والا

پژوهشگر

سیف‌اله دهقان

دی ۱۳۹۱

بسم الله الرّحمن الرّحيم

تقدیم به

زهرای خوب زندگیم

به نام توای بینای داور و ای توانای بی‌یاور

سپاس و ستایش بیکران تو را که توان و همتم هدیه کردی تا قدم در این راه گذارم و یاریم نمودی تا بدین جا رسم. به حرمت آن نام که تو آنی، و به حرمت آن صفات که چنانی، یاریم کن تا عمر به نادانی به آخر نرسانم، بیاموزم و بیاموزانم. پروردگارا، مرا مدد کن تا دانش اندکم نه نردبانی باشد برای فزونی تکبر و غرور، نه حلقه‌ای برای اسارت و نه دستمایه‌ای برای تجارت، بلکه گامی باشد برای تجلی انسانیت و متعالی ساختن زندگی خود و دیگران.

طی این راه و فایق آمدن بر مشکلات و دشواری‌ها ممکن نبوده است، مگر به لطف و یاری آنهایی که از اعطای وجودشان بهره‌مند بوده‌ام. بر خود لازم می‌دانم قدردان کسانی باشم که به نوعی در پیشرفت و موفقیت من مؤثر بوده‌اند؛ تقدیر و تشکر می‌کنم از:

مقدس‌ترین واژه‌های زندگیم، **پدر و مادرم**، آنان که وجودم برایشان همه رنج بود و وجودشان برایم همه مهر؛

اساتید راهنمای فرزانه و بزرگوارم جناب آقای دکتر **منوچهر کلافی** و جناب آقای دکتر **علی سلطانی والا** به خاطر راهنمایی‌های ارزنده و صبر و حوصله بی‌دریغشان؛

آقای دکتر **صمد روشن انتظار** به سبب تقبل داوری این پژوهش؛

آقای **حجت حاجیان** و آقای **تایماز فتح اللهی** دانشجویان محترم دوره دکتری به خاطر کمک‌های فراوانشان؛

مدیر گروه محترم گروه حالت جامد و الکترونیک، ریاست محترم، اساتید گرانقدر و کارکنان زحمتکش دانشکده فیزیک به خاطر لطف سرشارشان؛

دوستان هم کلاسی‌ام، به ویژه جناب آقای **اسماعیل رحمت پور** و سرکار خانم **مهسا اژدر قلم** به سبب همراهی امیدبخششان.

سیف اله دهقان، مردادماه ۱۳۹۲

نام‌خانوادگی دانشجو: دهقان **نام:** سیف‌اله

عنوان پایان‌نامه: بررسی تزویج نوری میکروکاواک با موجبر خطی در یک بلور فوتونی دو بعدی

استادان راهنما: دکتر منوچهر کلافی-دکتر علی سلطانی والا

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته:** فیزیک **گرایش:** حالت‌جامد و الکترونیک

دانشگاه: تبریز **دانشکده:** فیزیک **تاریخ فارغ‌التحصیلی:** ۱۳۹۱/۱۰/۲۰ **تعداد صفحات:** ۱۰۹

کلید واژه‌ها: بلورهای فوتونی، موجبر، کاواک مشدد، تزویج نوری، موجبر کاواک‌های تزویج شده.

چکیده:

بلورهای فوتونی به دلیل توانایی بی‌نظیر در کنترل خواص نوری، توجه زیادی را در هر دو حوزه مفاهیم فیزیکی و کاربردهای عملی به خود معطوف کرده‌اند. کاواک‌ها و موجبرها که از اجزای اصلی مدارهای نوری ساخته شده بر پایه بلورهای فوتونی هستند، حاصل اعمال نقص‌های کنترل شده در بلورهای فوتونی می‌باشند. یک کاواک بلور فوتونی با اعمال نقص نقطه‌ای و یک موجبر نوری بلور فوتونی با اعمال نقص خطی در ساختار شبکه بلور حاصل می‌شوند. علاوه بر این در سال ۱۹۹۹ موجبر جدیدی به نام موجبر کاواک‌های تزویج شده معرفی گردید؛ مکانیسم موجبری در این دسته از موجبرها بر تزویج ضعیف بین کاواک‌های با فاکتور کیفیت بالا، که بطور متناوب در ساختار بلور فوتونی ایجاد شده‌اند، استوار بود.

سیستم‌های نوری مبتنی بر ترکیب موجبرها و کاواک‌ها از شاخه‌های مهم تحقیقاتی در بلورهای فوتونی محسوب می‌شوند. هر چند ساختارهای کاواک-موجبر کاربردهای زیادی در مدارهای نوری دارند، اما ممکن است عملکرد این مدارها توسط بازده تزویج بین کاواک و موجبر محدود شود. در این

پژوهش تزویج نوری بین کاواک و موجبر، با هدف بهبود بازده تزویج مورد بررسی قرار گرفت. تمامی محاسبات مربوط به ساختار باند بلورهای فوتونی، توسط بسته نرم افزاری MPB و شبیه‌سازی‌های مربوط به محاسبه توزیع میدان، فاکتور کیفیت و در نتیجه بازده تزویج توسط بسته نرم‌افزاری Meep انجام گرفته است.

در این پایان‌نامه تزویج نوری دو نوع ساختار کاواک-موجبر بلورهای فوتونی دو بعدی با تقارن شبکه مربعی، به صورت تئوری مورد مطالعه قرار گرفت. ابتدا تزویج نوری بین یک کاواک مشدد و یک موجبر نقص خطی بررسی شد. در این مورد با تغییرات جزئی در ساختار موجبر بلور فوتونی بازده تزویجی بالاتر از ۹۵٪ حاصل شد. هر چند این بازده از نظر تئوری بسیار ایده‌ال بود اما چون تطابق فرکانسی بین مد کاواک و منحنی پاشندگی موجبر در لبه‌های نوار بریلوئن حاصل می‌شد، این نتیجه از نظر کاربردی مطلوب نبود. بررسی موجبر کاواک‌های تزویج شده نشان داد که این موجبرها سرعت گروه کمتر و در ناحیه بردار موجی وسیع‌تر را نسبت به موجبر نقص خطی بدست می‌دهند و در نتیجه می‌توانند انتخابی مناسب جهت تزویج با کاواک‌های مشدد باشند. پس به عنوان دومین ساختار کاواک-موجبر، تزویج نوری بین یک کاواک مشدد و یک موجبر کاواک‌های تزویج شده مورد مطالعه قرار گرفت. شبیه‌سازی‌های عددی نشان داد که اگر کاواک مشدد و کاواک‌های سازنده موجبر مانند هم باشند، بازده تزویج بهینه خواهد شد؛ زیرا تطابق فرکانسی مناسب و در ناحیه بردار موجی وسیع بین مد کاواک و منحنی پاشندگی موجبر اتفاق خواهد افتاد. این نتیجه از نظر تحقیقات کاربردی حائز اهمیت است.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

پیش گفتار..... ۱

فصل اول: بررسی منابع

بلورهای فوتونی..... ٤

مقدمه..... ٤

۱-۱ پارامترهای مهم بلور فوتونی..... ۷

۱-۱-۱ ابعاد بلور فوتونی..... ۷

۱-۱-۱-۱ بلور فوتونی یک بعدی..... ۸

۱-۱-۱-۲ بلور فوتونی دو بعدی..... ۹

۱-۱-۱-۳ بلور فوتونی سه بعدی..... ۱۰

۱-۱-۲ مواد سازنده بلورهای فوتونی..... ۱۱

۱-۱-۲-۱ مواد با ثابت دی‌الکتریک مستقل از فرکانس (غیرپاشنده)..... ۱۱

۱-۱-۲-۲ مواد با ثابت دی‌الکتریک وابسته به فرکانس (پاشنده)..... ۱۳

۱-۲ ساختار باند بلورهای فوتونی..... ۱۵

۱-۳ نقص در بلورهای فوتونی..... ۱۸

۱-٤ کاربردهای بلور فوتونی..... ۲۰

۱-٤-۱ کاواک‌های بلور فوتونی..... ۲۱

۱-٤-۲ موجبرها..... ۲٤

۱-٤-۲-۱ موجبرهای دی‌الکتریک معمولی..... ۲۷

۱-٤-۲-۲ موجبرهای بلور فوتونی..... ۲۸

۱-٤-۲-۲-۱ موجبر کاواک‌های تزویج شده..... ۳۱

۱-٤-۲-۲-۲ موجبرهای نامتجانس بلورهای فوتونی..... ۳۲

۱-٤-۳ فیبرهای بلور فوتونی..... ۳۳

۱-٤-٤ فیلترهای بلور فوتونی..... ۳٤

۱-۵ سرعت انتشار نور..... ۳۵

۱-٦ پدیده نور کم سرعت..... ۳٦

۱-۷ روشهای ساخت بلورهای فوتونی..... ۳۷

فصل دوم: مبانی و روش‌ها

مقدمه..... ٤۰

۲-۱ روش‌های عددی در تحلیل بلورهای فوتونی..... ٤۱

۲-۱-۱ روش‌های عددی در حوزه زمان..... ٤۱

۲-۱-۲ روش‌های عددی در حوزه بسامد..... ٤۲

۲-۲ بررسی شرایط مرزی..... ٤۳

۲-۳ قضیه بلوخ و ثابت دی‌الکتریک متناوب..... ٤٤

۲-٤ معادلات ماکسول..... ٤۷

۲-۵ بسط موج تخت معادلات ماکسول..... ۵۱

۲-۶ ساختار نوار داخل صفحهٔ تناوب بلور فوتونی دو بعدی..... ۵۳

۲-۷ محاسبه ضریب فوریهٔ عکس تابع دی‌الکتریک برای میله‌های بلور فوتونی..... ۵۵

۲-۷-۱ روش محاسبه..... ۵۵

۲-۷-۲ محاسبه ضرایب فوریهٔ عکس تابع دی‌الکتریک مربوط به میله‌های با سطح مقطع دایروی..... ۵۷

۲-۷-۳ محاسبه ضرایب فوریهٔ عکس تابع دی‌الکتریک مربوط به میله‌های با سطح مقطع مربعی..... ۶۰

۲-۸ محاسبه مدهای نقص به روش ابرسلول..... ۶۱

۲-۸-۱ محاسبه مدهای نقص خطی در بلور فوتونی دو بعدی با تقارن شبکه مربعی..... ۶۲

۲-۸-۲ محاسبه مدهای نقص در بلور فوتونی دو بعدی با تقارن شبکه مثلثی..... ۶۴

۲-۸-۳ تغییر در ساختار بلور فوتونی شامل نقص خطی..... ۶۷

۲-۸-۳-۱ تغییر اندازه ثابت دی‌الکتریک میله‌های نقص خطی..... ۶۷

۲-۸-۳-۲ تغییر شعاع میله‌های نقص خطی..... ۶۸

۲-۸-۳-۳ تغییر شعاع میله‌های همسایه اول نقص خطی..... ۶۹

۲-۸-۳-۴ جابجایی میله‌های همسایه اول نقص خطی..... ۷۰

۲-۸-۴ محاسبه مدهای نقص نقطه‌ای در بلور فوتونی دو بعدی..... ۷۲

۲-۹ تزویج موجبر و کاواک در بلور فوتونی..... ۷۴

۲-۱۰ معرفی نرم‌افزارهای MPB و Meep ۷۶

فصل سوم: نتایج و بحث

مقدمه.....۷۹

۳-۱ ساختار باند بلور فوتونی دو بعدی.....۸۰

۳-۲ بررسی کاواک بلور فوتونی دو بعدی متشکل از میله‌های متشکل از میله‌های دی‌الکتریک در زمینه هوا.....۸۳

۳-۲-۱ توزیع فضایی میدان الکتریکی در کاواک بلور فوتونی دو بعدی.....۸٤

۳-۳ بررسی موجبر بلور فوتونی دو بعدی متشکل از میله‌های دی‌الکتریک در زمینه هوا.....۸٦

۳-۳-۱ پدیده نور کم سرعت در موجبرهای بلور فوتونی.....۸۷

۳-٤ تزویج کاواک و موجبر بلور فوتونی.....۸۸

۳-٤-۱ عوامل مؤثر در تزویج یک سیستم کاواک-موجبر.....۸۹

۳-٤-۱-۱ هم‌پوشانی فضایی.....۸۹

۳-٤-۱-۲ تطابق فرکانسی.....۹۰

۳-٤-۱-۳ سرعت گروه در محل تلاقی فرکانسی.....۹۱

۳-٤-۲ بازده تزویج کاواک مشدد و موجبر نقص خطی در یک بلور فوتونی دو بعدی با تقارن شبکه مربعی.....۹۲

۳-۵ موجبر کاواک‌های تزویج شده (CCW).....۹٦

۳-۵-۱ ساختار باند موجبر کاواک‌های تزویج شده.....۹۷

۳-۵-۲ پدیده نور کم سرعت در موجبر کاواک‌های تزویج شده.....۹۸

۳-۵-۳ بازده تزویج کاواک مشدد و موجبر کاواک‌های تزویج شده در یک بلور فوتونی دو بعدی با تقارن شبکه مربعی.....۹۹

نتیجه‌گیری کلی.....۱۰٤

پیشنهادات.....۱۰٦

منابع مورد استفاده.....۱۰۷

فهرست شکل‌ها

فصل اول

شکل ۱-۱: نمونه‌هایی از بلورهای فوتونی که در طبیعت یافت شده‌اند. الف) پر طاووس، ب) پروانه‌ی مورفو ج) سنگ اوپال.....۵

شکل ۱-۲: نمایش طرح‌وار از بلورهای فوتونی یک، دو و سه بعدی. رنگ‌های مختلف نشان دهنده مواد با ثابت دی‌الکتریک متفاوت است.....۸

شکل ۱-۳: بلور فوتونی یک بعدی که راستای تناوب آن در راستای محور Z می‌باشد.....۸

شکل ۱-٤: 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 این ساختار a می باشد.....۹

شکل ۱-۵: یک نمونه بلور فوتونی سه بعدی.....۱۰

شکل ۱-٦: ساختار باند بلور فوتونی برای سه فیلم چند لایه متفاوت.....۱۷

شکل ۱-۷: طرح شماتیکی از حالت‌های ممکن ایجاد نقص نقطه‌ای، خطی و سطحی در یک بلور فوتونی دو بعدی.....۱۹

شکل ۱-۸: 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 ۱-۹: ساختار باند یک بلور فوتونی (چپ) بدون هیچ نقص نقطه‌ای و (راست) با ایجاد یک نقص نقطه‌ای در داخل شبکه بلور فوتونی.....۲٤

شکل ۱-۱۰: برای حد فاصل بین دو محیط دی‌الکتریک ε_1 و ε_2، می‌توان نور را با زاویه فرودی θ_1 و زاویه شکست θ_2 که بر اساس قانون اسنل بدست می‌آید، بیان کرد.....۲۵

شکل ۱-۱۱: هدایت نور توسط کاواک‌های نقص‌های نقطه‌ای در یک بلور فوتونی.....۲٦

شکل ۱-۱۲: موجبر معمولی.....۲۷

شکل ۱-۱۳: نمایش نحوه اتلاف نور در انتهای خمیده موجبر معمولی.....۲۸

شکل ۱-۱٤: موجبر بلور فوتونی.....۲۹

شکل ۱-۱۵: (چپ) ساختار باند یک موجبر بلور فوتونی و (راست) نحوه انتشار امواج در راستای موجبر بلور فوتونی.....۳۰

شکل ۱-۱٦: (الف) موجبر خمیده ۹۰ درجه در شبکه مربعی. (ب) موجبر خمیده ٦۰ درجه در شبکه مثلثی.....۳۱

شکل ۱-۱۷: یک موجبر بلور فوتونی نامتجانس که از اتصال دو موجبر بلور فوتونی با شبکه مثلثی و ثابت‌های شبکه متفاوت ساخته شده است.....۳۲

شکل ۱-۱۸: سطح مقطع فیبرهای بلور فوتونی (الف) فیبر براگ، (ب) فیبر بلور فوتونی مرکز خالی، (ج) فیبر بلور فوتونی مرکز پر.....۳٤

شکل ۱-۱۹: طرح شماتیکی از فیلتر بلور فوتونی.....۳۵

فصل دوم

شکل ۲-۱: حالت تابش در صفحه بلور فوتونی دو بعدی با فرض تناوب ضریب دی‌الکتریک بلور در صفحه xoy..... ٥٤

شکل ۲-۲: سلول واحد یک بلور فوتونی دو بعدی شامل میله‌هایی با سطح مقطع دایروی..... ٥٨

شکل ۲-۳: سلول واحد یک بلور فوتونی دو بعدی شامل میله‌هایی با سطح مقطع مربعی و ثابت دی-الکتریک ε_a در زمینه‌ای از یک ماده دیگر با ثابت دی‌الکتریک ε_b..... ٦٠

شکل ۲-٤: 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 ابرسلولی است که برای بررسی مدهای نقص در نظر گرفته می‌شود..... ٦٢

شکل ۲-٥: سلولی که شامل ۱۲ سلول کامل و یک سلول نقص می‌باشد. $L = Na$ ثابتی است که ابرسلول با آن در راستای x تکرار می‌شود، که در آن N تعداد سلول‌های کامل به اضافه سلول نقص می‌باشد.... ٦٣

شکل ۲-٦: تصویری نمادین از یک بلور فوتونی با شبکه مثلثی که در آن یک نقص خطی با تغییر ثابت دی‌الکتریک یک ردیف از میله‌ها تعبیه شده است. شکل نقطه‌چین نمایشگر ابرسلولی است که برای بررسی مدهای نقص در نظر گرفته می‌شود..... ٦٥

شکل ۲-۷: ابرسلولی که شامل ۸ سلول کامل و یک سلول نقص می‌باشد. $L = N\sqrt{3}a$ ثابتی است که ابرسلول با آن در راستای x تکرار می‌شود، که در آن N تعداد سلول‌های کامل به اضافه سلول نقص می-باشد..... ٦٥

شکل ۲-۸: تغییر شعاع میله‌های همسایه اول نقص خطی در شبکه مربعی و مثلثی..... ٧٠

شکل ۲-۹: جابجایی میله‌های همسایه اول نقص خطی در شبکه مربعی و مثلثی..... ٧١

شکل ۲-۱۰: ابرسلول در نظر گرفته شده برای بررسی نقص نقطه‌ای. $L = Na$ ثابتی است که ابرسلول با آن در راستای x و y تکرار می‌شود.....۷۲

فصل سوم

شکل ۳-۱: بلور فوتونی دوبعدی با تقارن شبکه مربعی و متشکل از میله‌های دی‌الکتریک با سطح مقطع دایروی در زمینه هوا.....۸۰

شکل ۳-۲: ناحیه اول بریلوئن برای شبکه مربعی.....۸۱

شکل ۳-۳: ساختار نوار بلور فوتونی با شبکه مربعی متشکل از میله‌های سیلیکون با هندسه دایروی در زمینه هوا و برای قطبش مغناطیسی (مد TE). در این حالت منطقه ممنوعه فرکانسی وجود نخواهد داشت.....۸۱

شکل ۳-٤: ساختار نوار بلور فوتونی با شبکه مربعی متشکل از میله‌های سیلیکون با هندسه دایروی در زمینه هوا و برای قطبش الکتریکی (مد TM). در این حالت منطقه ممنوعه فرکانسی وجود خواهد داشت.....۸۲

شکل ۳-۵: کاواک بلور فوتونی دوبعدی که با تغییر شعاع یکی از میله‌های دی‌الکتریک در بلور فوتونی کامل ایجاد شده است.....۸۳

شکل ۳-٦: تغییرات مد فرکانسی کاواک در اثر تغییر در شعاع میله دی‌الکتریک کاواک. با افزایش r_D، مد کاواک به سمت پایین حرکت می‌کند. نواحی هاشورخورده بیانگر مناطق مجاز فرکانسی است.....۸٤

شکل ۳-۷: تغییرات توزیع فضایی میدان الکتریکی حالتهای جایگزیده کاواک بلور فوتونی نسبت به تغییر شعاع میله نقص. با تغییر شعاع میله نقص، توزیع فضایی میدان الکتریکی حالتهای متفاوتی به خود می-گیرد. رنگ قرمز و آبی نشان‌دهنده شدت میدان است.....۸۵

شکل ۳-۸: موجبر بلور فوتونی دوبعدی که با تغییر شعاع یک ردیف از میله‌های دی‌الکتریک در بلور فوتونی کامل ایجاد شده است.....۸۶

شکل ۳-۹: تغییرات ایجاد شده در ساختار باند تصویر شده بلور فوتونی دوبعدی متشکل از میله‌های دی‌الکتریک سیلیکون با $\varepsilon_a = 12.25$ در زمینه هوا، در اثر افزایش شعاع میله‌های دی‌الکتریک خط نقص. با افزایش r_D، مد موجبری به سمت فرکانسهای پایین‌تر کشیده می‌شود.....۸۷

شکل ۳-۱۰: تغییرات سرعت گروه موجبر بلور فوتونی با شعاع میله‌های نقص $r_D = 0.1a$ بر حسب بردار موج. سرعت گروه پایین در نزدیکی لبه‌های ناحیه بریلوئن حاصل می‌شود.....۸۸

شکل ۳-۱۱: توزیع میدان الکتریکی مد کاواک با شعاع میله نقص (الف) $r_D = 0$ و (ب) $r_D = 0.1a$. منبع تولید امواج الکترومغناطیسی در مرکز کاواک قرار گرفته است.....۹۰

شکل ۳-۱۲: ساختار باند سیستم کاواک-موجبر بلور فوتونی با تقارن شبکه مربعی و متشکل از میله‌های دی‌الکتریک سیلیکون با $\varepsilon_a = 12.25$ در زمینه هوا. الف) عدم تطابق فرکانسی. ب) تطابق فرکانسی.....۹۱

شکل ۳-۱۳: ساختار یک سیستم کاواک-موجبر. کاواک مشدد از حذف میله دی‌الکتریک مرکزی و موجبر از تغییر شعاع یک ردیف از میله‌های دی‌الکتریک در شبکه بلور ایجاد شده است.....۹۳

شکل ۳-۱۴: منحنی تغییرات بازده تزویج بر حسب شعاع میله‌های خط نقص موجبر. بازده تزویج با افزایش شعاع میله‌های خط نقص موجبر رفتار افت‌وخیزی، از خود نشان می‌دهد. بیشترین بازده تزویج در شعاع $r_D = 0.7a$ بدست می‌آید.....۹۴

شکل ۳-۱۵: منحنی پاشندگی موجبر ساختار کاواک-موجبر الف) به ازای $r_D = 0$ و ب) به ازای $r_D = 0.7a$. خط چین افقی بیانگر فرکانس تشدید کاواک است.....۹۵

شکل ۳-۱۶: طرح شماتیک موجبر کاواک‌های تزویج شده. در این حالت دوره تناوب ابرسلول در نظر گرفته شده برای محاسبه ساختار باند به صورت $R = 2a$ می‌باشد که a ثابت شبکه بلور است.....۹۷

شکل ۳-۱۷: ساختار باند تصویر شده موجبر کاواک‌های تزویج شده که با اعمال متناوب چند نقص نقطه‌ای در یک بلور فوتونی دو بعدی با تقارن شبکه مربعی و متشکل از میله‌های دی‌الکتریک با $\varepsilon_a = 12.25$ و در زمینه هوا تشکیل شده است، به ازای دو مقدار $r_D = 0$ و $r_D = 0.1a$ ۹۸

شکل ۳-۱۸: تغییرات سرعت گروه موجبر کاواک‌های تزویج شده به ازای $r_D = 0.1a$ بر حسب بردار موج ۹۹

شکل ۳-۱۹: ساختار یک سیستم کاواک-موجبر، شامل یک کاواک مشدد و یک موجبر کاواک‌های تزویج شده. شعاع میله نقص نقطه‌ای کاواک مشدد را با r_c و شعاع میله نقص نقطه‌ای کاواک‌های متناوب را با r_w نشان می‌دهیم ۱۰۰

شکل ۳-۲۰: نحوه تغییرات بازده تزویج ساختار کاواک-موجبر بر حسب تغییر شعاع میله نقص نقطه‌ای کاواک‌های متناوب (r_w) و به ازای سه مقدار $r_c = 0$، $r_c = 0.1a$ و $r_c = 0.15a$. بیشترین بازده تزویج زمانی حاصل می‌شود که $r_c = r_w$ ۱۰۱

شکل ۳-۲۱: ساختار باند سیستم کاواک-موجبر به ازای مقادیر مختلف r_w برای موجبر و به ازای الف) $r_c = 0$ و ب) $r_c = 0.1a$ برای کاواک. تلاقی فرکانسی بین منحنی پاشندگی موجبر و کاواک، همواره در شرایط $r_c = r_w$ برقرار خواهد بود ۱۰۲

پیش‌گفتار

از زمان ورود و ظهور مکانیک کوانتومی و اثبات وجود امواج مادی، همواره فیزیک‌دانان از ایده‌ها و روش‌های موجود در زمینه الکترومغناطیس و اپتیک، در حوزهٔ این علم نوین استفاده کرده‌اند. با توجه به این مسئله، تعداد زیادی از پدیده‌های مربوط به فیزیک حالت جامد در ارتباط با تحریک‌های الکترونی، با استفاده از امواج الکترومغناطیسی توجیه می‌شوند. این موضوع در حالی است که روند معکوس این قضیه، یعنی استفاده از ایده‌های موجود در زمینه مکانیک کوانتومی در الکترومغناطیس کمتر اتفاق افتاده است. از این نظر پدیدآمدن بلورهای فوتونی در اواخر دهه ۱۹۸۰، می‌تواند به عنوان مصداقی برای این روند معکوس در نظر گرفته شود. همانطور که تناوب ساختارها در بلورهای حالت جامد، باندهای انرژی و خواص رسانایی الکترون‌ها را تعیین می‌کند، تناوب در ساختارهای مواد اپتیکی در ابعاد طول موج نیز می‌تواند به عنوان روش بسیار قوی برای کنترل انرژی و چگالی شار فوتون‌ها در این مواد باشد. مسلماً تشابه بین امواج الکترونی و امواج الکترومغناطیسی یکی از نتایج رسمی رابطه‌ای است که بین معادله شرودینگر برای الکترون‌ها و معادلات ماکسول برای امواج الکترومغناطیسی وجود دارد. از دیدگاه فیزیک نظری، بلورها توسط ساختار نواری‌شان توصیف می‌شوند؛ به همین جهت مشخصه عمده بلورهای فوتونی نیز، نوار گاف فرکانسی آنها (ناحیه فرکانسی که انتشار مدهای الکترومغناطیسی در آن ممنوع است) می‌باشد.

جذابیت و کاربرد بلورهای فوتونی بدون در نظر گرفتن نقص‌های کنترل‌شده بسیار محدود می‌شود. ایجاد نقص در بلور فوتونی تقارن انتقالی را به هم می‌زند، که این باعث بوجود آمدن حالت‌های مجاز با فرکانس‌های مشخص در داخل گاف نواری می‌شود. کاواک‌ها و موجبرها که به ترتیب حاصل اعمال نقص‌های نقطه‌ای و خطی کنترل شده در شبکه بلور فوتونی می‌باشند، تقریباً در تمام مدارهای نوری بر پایه بلورهای فوتونی کاربرد دارند. عملکرد این مدارها ارتباط مستقیمی با تزویج نوری کاواک‌ها و موجبرهای بکار رفته در آنها دارد. هدف اصلی در این پایان‌نامه بررسی و بهبود بازده تزویج ساختارهای کاواک–موجبر می‌باشد. فصل اول این پژوهش، شامل معرفی بلورهای فوتونی، ساختار و خواص نوری

مهم آنها، ساختارهای نواری فوتونی، پارامترهای مهم در آنها و همچنین مفاهیم پایه مورد نیاز برای توصیف این ساختارها می‌باشد. فصل دوم شامل مطالبی در رابطه با روش‌های عددی مورد نیاز در محاسبه ساختار باند بلورهای فوتونی و نیز بازده تزویج بین کاواک و موجبر می‌باشد. در انتهای این فصل نرم‌افزارهای استفاده شده در این پژوهش، به طور مختصر معرفی می‌گردند. در این پایان‌نامه تمامی محاسبات مربوط به ساختار باند بلور فوتونی، توسط بسته نرم‌افزاری MPB و محاسبات مربوط به فاکتور کیفیت و بازده تزویج، توسط بسته نرم‌افزاری Meep انجام می‌پذیرد. در فصل سوم ضمن معرفی عوامل مؤثر در بهبود شدت تزویج، شرایط بهینه کردن بازده تزویج در یک سیستم کاواک–موجبر مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.

فصل اول

بررسی منابع

بلورهای فوتونی

مقدمه

برای معرفی بلورهای فوتونی بهتر است با طرح این سؤال که بلورهای فوتونی چیست و چه کاربردی در صنعت دارد، شروع کنیم. تکنولوژی دنیای امروز بیشتر با الکترون‌ها و نیمه‌هادی‌ها ارتباط پیدا می‌کند. بیشتر دستگاه‌ها و ابزارهایی که ما هر روز از آنها استفاده می‌کنیم مانند کامپیوتر، موبایل، رادیو و غیره، از نیمه‌هادی و فلزات ساخته شده‌اند که حامل‌های بار و اطلاعات در آنها، الکترون و حفره می‌باشند. الکترون‌ها برای انتقال اطلاعات دارای حداکثر سرعتی در حدود 10^5 m/s در نیمه‌هادی‌ها و یا فلزات هستند که این در مقایسه با سرعت نور در محیط‌های گوناگون که درحدود 10^8 m/s است بسیار کمتر می‌باشد. اگر برای انتقال اطلاعات از نور به جای الکترون استفاده کنیم، می‌توان دستگاه‌هایی تا هزار برابر سریعتر ساخت. در قطعات الکترونیکی امروزی برای انتقال و کنترل الکترون‌ها که همان حامل‌های اطلاعات هستند از بلورهای منظم نیمه‌هادی و فلزات استفاده می‌شود. بلورهای فوتونی مانند قطعات الکترونیکی معمولی، بلورهایی منظم از مواد شفاف هستند که با استفاده از آنها می‌توان نور را به کنترل در آورد. بلورهای فوتونی از نظر فیزیک، ساختار و نحوه تأثیر آنها بر حامل‌های اطلاعات، کاملاً مشابه بلورهای الکترونی معمولی می‌باشند؛ با این تفاوت که حامل‌های اطلاعات دیگر الکترون‌ها نیستند بلکه نور است و از طرفی دیگر عامل تکرار شونده در بلور بجای پتانسیل اتم‌ها یا مولکول‌ها، ثابت دی-الکتریک مواد تشکیل دهنده‌ی بلور فوتونی است. بلورهای فوتونی در واقع حاصل ادغام فیزیک حالت جامد و الکترومغناطیس می‌باشد.

طراحی موادی که قادر به انتشار نور در داخل خود باشند یا اجازه انتشار نور در جهت‌ها و فرکانس-های معینی را دهند و یا قادر به متمرکز کردن نور در یک محدوده خاصی باشند، نویدبخش پیشرفت‌های چشم‌گیر در صنعت ارتباطات خواهد بود. در حدود یکصد و چند سال قبل، لورد رایله[1] نشان داد

[1] - Lord Rayleigh