

شماره پایان نامه:.....



پایان نامه کارشناسی ارشد رشته برق گرایش الکترونیک

عنوان

سنسورهای تمام نوری مبتنی بر نور کند در بلورهای فوتونی

استاد راهنما:

دکتر مجید ابن علی حیدری

استاد مشاور:

دکتر نوشین قادری

پژوهشگر:

محبوبه علیدادی شمس آبادی

بهمن ماه ۱۳۹۲



دانشکده فنی و مهندسی

گروه برق

پایان نامه خانم محبوبه علیدادی شمس آبادی جهت اخذ کارشناسی ارشد رشته برق گرایش الکترونیک با عنوان سنسور های تمام نوری مبتنی بر نور کند در بلور های فوتونی در تاریخ با حضور هیئت داوران زیر بررسی و با نمره مورد تصویب نهایی قرار گرفت.

۱. استاد راهنمای پایان نامه دکتر مجید ابن علی با مرتبه علمی استادیار امضاء

۲. استاد مشاور پایان نامه دکتر نوشین قادری با مرتبه علمی استادیار امضاء

۳. استاد داور پایان نامه دکتر آرش دقیقی با مرتبه علمی استادیار امضاء

۴. استاد داور پایان نامه دکتر امیر هاشمی با مرتبه علمی استادیار امضاء

دکتر بهزاد قاسمی

معاون پژوهشی و تحصیلات تکمیلی

دانشکده فنی و مهندسی

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

تشکر و قدردانی

در اینجا بر خود لازم میدانم از زحمات و راهنمایی های بی دریغ استاد ارجمندم جناب آقای دکتر مجید ابن علی حیدری در به ثمر رسیدن این کار تشکر و قدردانی نمایم.

تقدیم به پدر، مادر و همسر مهربانم
به پاس زحمات و محبت های بی دریغشان

چکیده

در این پایان نامه یک سنسور نوری گاز متان با حساسیت بالا مبتنی بر نور کند در موجبرهای بلور فوتونی پیشنهاد شده است. تشخیص متان برای حفظ ایمنی در معادن بسیار با اهمیت است چرا که این گاز اشتعال پذیر بوده و دارای حد انفجار ۵٪ متان در هوا می باشد. بنابراین توسعه سنسورهای گاز متان برای جلوگیری از بالا رفتن مقدار آن از حد مجاز ضروری است. در این کار موجبرهای بلور فوتونی به عنوان سلول گاز استفاده شده اند. در موجبرهای بلور فوتونی نور می تواند فرکانسی در محدوده گاف باند فوتونی داشته باشد. ما می توانیم برای محدوده خاصی از فرکانس ها و به ازای پارامترهای هندسی مشخصی، درون موجبر نور کند تولید کنیم. در این فرکانس ها سرعت نور کاهش می یابد. بنابراین مزیت کلیدی این نوع ساختارها تجمع قوی نور ناشی از اثر نور کند و در نتیجه بر هم کنش قوی نور- ماده است که ما را برای کوچک کردن سائز سنسور توانا می سازد.

روش های عددی برای شبیه سازی موجبرهای بلور فوتونی طراحی شده، شامل تفاضل متناهی در حوزه زمان، بسط امواج تخت و روش المان های محدود می باشند.

در این کار ابتدا یک سنسور گاز متان جدید مبتنی بر اثر نور کند در موجبر بلور فوتونی میله ای طراحی شد. سپس با تغییر هندسه موجبر بلور فوتونی آن را به گونه ای مهندسی کردیم که بتواند در طول مسیر هم پاشندگی سرعت گروه مثبت و هم منفی را تجربه کند و همچنین فاصله مد اصلی با باند هوا در ناحیه نور کند حداکثر باشد که این منجر به جبران پاشندگی و کاهش تلفات و در نتیجه افزایش پیک جذب می شود. نتایج عددی نشان می دهد که اثر نور کند می تواند به طور مؤثری حساسیت تشخیص را در طیف سنج های جذب کوچک بالا ببرد. در این پروژه فاکتور افزایش بزرگی نزدیک $\gamma = 150$ ناشی از اثر نور کند بدست آمده است.

واژه های کلیدی: سنسور گاز، طیف سنجی جذب فرو سرخ، متان، موجبر بلور فوتونی، نور کند.

فهرست مطالب

شماره صفحه

عنوان

فصل اول: بلور های فوتونی

| | |
|----|---|
| ۹ | ۱-۱ مقدمه |
| ۱۰ | ۲-۱ معرفی انواع بلور فوتونی |
| ۱۱ | ۱-۲-۱ بلور های فوتونی یک بعدی |
| ۱۱ | ۲-۲-۱ بلور های فوتونی دو بعدی |
| ۱۲ | ۳-۱ شبکه معکوس و ناحیه ی بریلوین |
| ۱۲ | ۱-۳-۱ شبکه ی معکوس |
| ۱۳ | ۲-۳-۱ ناحیه ی بریلوین |
| ۱۴ | ۴-۱ تئوری بلاخ |
| ۱۵ | ۵-۱ منشأ فیزیکی گاف های باند فوتونی |
| ۱۸ | ۶-۱ دیاگرام باند ساختار بلور فوتونی دو بعدی و مود های TE و TM |
| ۲۱ | ۷-۱ نقص در بلورهای فوتونی |
| ۲۱ | ۱-۷-۱ ایجاد نقص در ساختار یک بعدی |
| ۲۲ | ۲-۷-۱ ایجاد نقص در ساختار دو بعدی |
| ۲۲ | ۱-۲-۷-۱ نقص نقطه ای |
| ۲۳ | ۲-۲-۷-۱ نقص خطی و موجبر بلور فوتونی دو بعدی |
| ۲۵ | ۸-۱ معادلات حاکم بر بلور فوتونی |
| ۲۷ | ۹-۱ روش های عددی در تحلیل بلورهای فوتون |
| ۳۰ | ۱-۹-۱ روش بسط امواج تخت |
| ۳۲ | ۱-۱-۹-۱ روش بسط امواج تخت دو بعدی |
| ۳۳ | ۲-۹-۱ روش تفاضل های متناهی در حوزه زمان |
| ۳۴ | ۱-۲-۹-۱ تفاضل متناهی و نماد گذاری ها |
| ۳۴ | ۲-۲-۹-۱ بیان تفاضل متناهی برای معادلات ماکسول در دو بعد |
| ۳۶ | ۱۰-۱ شرایط مرزی |

فصل دوم : نور کند

| | |
|----|--|
| ۴۰ | ۱-۲ مقدمه |
| ۴۱ | ۲-۲ نور کند از تئوری تا اجرا |
| ۴۱ | ۱-۲-۲ اصول و سرچشمه نور کند |
| ۴۲ | ۲-۲-۲ تکنیک های رسیدن به نور کند |
| ۴۳ | ۱-۲-۲-۲ تولید نور کند مبتنی بر ماده |
| ۴۴ | ۲-۲-۲-۲ ساختار های مهندسی شده برای تولید نور کند |
| ۴۶ | ۳-۲ کاربردهای عملی نور کند |

فصل سوم : طیف سنجی جذب گاز متان در ناحیه فرو سرخ

فهرست مطالب

| شماره صفحه | عنوان |
|------------|--|
| ۴۹ | ۱-۳ مقدمه..... |
| ۴۹ | ۲-۳ سنسور های گاز ناحیه فرو سرخ..... |
| ۵۰ | ۱-۲-۳ اصول عملکرد..... |
| ۵۱ | ۲-۲-۳ جذب یکتای گاز (اثر انگشت)..... |
| ۵۲ | ۳-۲-۳ فرکانس های ذاتی مولکولهای گاز..... |
| ۵۳ | ۴-۲-۳ اجزای ضروری برای آنالیز..... |
| ۵۳ | ۱-۴-۲-۳ آشکارساز..... |
| ۵۴ | ۲-۴-۲-۳ منابع فروسرخ..... |
| ۵۴ | ۳-۴-۲-۳ فیلتر نوری..... |
| ۵۵ | ۴-۴-۲-۳ سلول گاز یا مسیر نوری..... |
| ۵۵ | ۵-۲-۳ پیکربندی سنسورهای گاز فرو سرخ..... |
| ۵۶ | ۳-۳ موجبرهای بلور فوتونی نور کند..... |
| ۵۷ | ۴-۳ مدل تئوری (جذب بیر- لمبرت)..... |
| ۵۸ | ۵-۳ گاز متان..... |
| ۵۸ | ۱-۳-۵ منابع تولید کننده گاز متان..... |
| ۵۹ | ۲-۳-۵ تکنیک های تشخیص گاز متان..... |
| ۶۰ | ۳-۳-۵ طیف جذب گاز متان..... |
| ۶۰ | ۴-۳-۵ ضریب شکست گاز متان..... |

فصل چهارم : نتایج شبیه سازی

| | |
|----|---|
| ۶۳ | ۱-۴ مقدمه..... |
| ۶۳ | ۲-۴ ساختار سنسور گاز متان..... |
| ۶۵ | ۳-۴ مباحث و نتایج ساختار پیشنهادی..... |
| ۶۸ | ۴-۴ اصلاح ساختار موجبر بلور فوتونی میله ای..... |
| ۷۰ | ۱-۴-۴ تغییر قطر میله های ردیف اول..... |
| ۷۲ | ۲-۴-۴ تغییر قطر میله های ردیف دوم..... |
| ۷۴ | ۳-۴-۴ شیفت ردیف اول عمود بر مسیر موجبر..... |
| ۷۴ | ۴-۴-۴ شیفت ردیف اول در امتداد موجبر..... |
| ۷۴ | ۵-۴-۴ شیفت ردیف دوم در امتداد موجبر..... |
| ۷۶ | ۶-۴-۴ شیفت ردیف دوم عمود بر مسیر موجبر..... |
| ۷۷ | ۷-۴-۴ معرفی ساختار جدید مهندسی شده موجبر بلور فوتونی..... |

فصل پنجم : نتیجه گیری و پیشنهادات

| | |
|----|---------------------|
| ۸۰ | ۱-۵ نتیجه گیری..... |
| ۸۱ | ۲-۵ پیشنهادات..... |

فهرست مطالب

شماره صفحه

عنوان

۸۲.....منابع

فهرست شکل ها

شماره صفحه

عنوان

- شکل ۱-۱: بلور های فوتونی (الف) یک بعدی (ب) دو بعدی (ج) سه بعدی..... ۱۰
- شکل ۲-۱: نمایی از بلور فوتونی یک بعدی. اصطلاح یک بعدی به این دلیل استفاده می شود که تابع دی الکتریک $\epsilon(Z)$ تنها در امتداد محور Z تغییر می کند. سیستم شامل لایه های متناوب مواد (سفید و سبز) با ثابت های دی الکتریک مختلف و تناوب فضایی a است. ما فرض می کنیم هر لایه یکنواخت باشد و تا بی نهایت در امتداد محور X و Y گسترش یابد و همچنین فرض می کنیم تناوب در جهت Z تا بی نهایت ادامه دارد..... ۱۱
- شکل ۳-۱: (الف) بلور فوتونی دو بعدی مربعی (ب) بلور فوتونی دو بعدی مثلثی..... ۱۲
- شکل ۴-۱: (الف) شبکه ی مربعی. (ب) شبکه ی مثلثی. در سمت چپ شبکه در فضای واقعی قرار دارد. در وسط شبکه ی معکوس متناظر رسم شده است. در سمت راست، ساختار ناحیه ی اول بریلوین می باشد. نقطه ی وسط را به عنوان مرجع در نظر گرفته و خطوطی را از مرکز به بقیه نقاط شبکه وصل می کنیم (قرمز) و نیمسازهای عمود بر آنها را با رنگ آبی مشخص کرده و در نهایت ناحیه ی اول بریلوین را با رنگ زرد برجسته می کنیم. شکل ضمیمه شده ناحیه ی کاهش ناپذیر بریلوین را نشان می دهد..... ۱۴
- شکل ۵-۱: پیکربندی یک دی الکتریک با تقارن انتقالی گسسته. واحد تکرار شونده ی این سیستم متناوب، با جعبه ی a مشخص شده است [۴]..... ۱۵
- شکل ۶-۱: ساختار های باند فوتونی برای سه فیلم چند لایه ی مختلف. هر لایه دارای عرض $0.5a$ است. (الف) همه ی لایه ها ثابت دی الکتریک مشابه ۱۳ دارند. (ب) لایه ها به طور متناوب دارای ثابت دی الکتریک ۱۲ و ۱۳ هستند. (ج) لایه ها به طور متناوب دارای ثابت دی الکتریک ۱ و ۱۳ هستند [۴]..... ۱۶
- شکل ۷-۱: مود های وابسته به پایین ترین گاف باند ساختار باند رسم شده در شکل ۶-۱ (ب) در $k = \frac{\pi}{a}$. (الف) میدان الکتریکی برای مود در بالای باند ۱: (ب) میدان الکتریکی برای مود در پایین باند ۲: (ج) چگالی انرژی میدان الکتریکی $(\frac{|E|^2}{8\pi})$ باند ۱: (د) چگالی انرژی میدان الکتریکی باند ۲ [۴]..... ۱۷
- شکل ۸-۱: در بلور های فوتونی دو بعدی مودهای منتشر شده به موازات صفحه ی متناوب xy ($k_z = 0$)، می توانند به دو دسته ی TE و TM طبقه بندی شوند [۵]..... ۱۸
- شکل ۹-۱: ساختار باند و دیاگرام طیف انتقال یک بلور فوتونی دو بعدی که از حفره های هوا بر روی سیلیکون ساخته شده است. تناوب شبکه a ، ثابت شبکه $\epsilon = 11.9716$ و قطر حفره های هوا $r = 0.36a$ [۵]..... ۱۹
- شکل ۱۰-۱: ساختار باند فوتونی برای یک آرایش مربعی از ستون های دی الکتریک با $r=0.2a$. باند های آبی مودهای TM و باند های قرمز مودهای TE را نشان می دهند. ضمیمه ی سمت چپ ناحیه ی بریلوین کاهش نیافتنی و ضمیمه سمت راست یک نمایش از مقطع عرضی تابع دی الکتریک است. ستون ها با ثابت دی الکتریک $\epsilon = 8.9$ (به عنوان آلومینیوم) درون هوا $\epsilon = 1$ جاسازی شده اند [۴]..... ۲۰
- شکل ۱۱-۱: دیاگرام باند و گاف باند فوتونی برای آرایش شش ضلعی از میله های دی الکتریک در هوا (شکل بالا) و حفره های هوایی در دی الکتریک (شکل پایین). فرکانس ها حول مرزهای ناحیه بریلوین ناکاستنی (مثلث تیره در شش ضلعی منتظم میانی) رسم شده اند. خطوط ممتد قرمز نمایش دهنده قطبش TE و خطوط بریده آبی نمایش دهنده قطبش TM هستند..... ۲۰
- شکل ۱۲-۱: نمایش شماتیک محل های ممکن برای ایجاد نقص در ساختار بلور فوتونی یک بعدی. این نقص ها تناوب در جهت Z را می شکنند. ما مود در لبه ی بلور (سبز) را حالت صفحه ای و مود درون بدنه ی بلور (آبی) را حالت نقص می نامیم [۴]..... ۲۱

فهرست شکل ها

| عنوان | شماره صفحه |
|--|------------|
| شکل ۱-۱۳ : نمایش شماتیک مکان های ممکن برای نقص های نقطه ای، خطی و صفحه ای. ایجاد اختلال در یک ستون درون ساختار بلور فوتونی (زرد) اجازه ی ایجاد یک حالت نقص که هم در جهت X و هم در جهت Y محصور شده است را می دهد. با اختلال در یک ردیف درون ساختار بلور فوتونی (قرمز) یا در یک صفحه (سبز) می توان نور را در جهت X محصور کرد. فرض می شود میله ها در جهت Z تا بی نهایت ادامه دارند [۴]..... | ۲۲ |
| شکل ۱-۱۴ : ساختار باند نقص خطی (ضمیمه) که به وسیله ی برداشتن یک ردیف میله از شبکه ی مربعی شکل ۱-۱۰ ایجاد می شود. داخل گاف باند (زرد) یک باند نقص (قرمز) ناشی از ایجاد موجبر معرفی شده است..... | ۲۴ |
| شکل ۱-۱۵ : (الف) الگوی میدان الکتریکی در جهت Z با یک نقص خطی که ناشی از برداشتن یک ردیف از میله های درون شبکه ی مربعی شکل ۱-۱۰ است. میدان حاصل که برای بردار موج $k_y = 0.3 \left(\frac{2\pi}{a}\right)$ در امتداد نقص نشان داده شده، مود موجبر است که در امتداد نقص منتشر می شود. (ب) چگالی انرژی میدان الکتریکی در موجبر بلور فوتونی..... | ۲۴ |
| شکل ۱-۱۶ : نمونه ای از مش بندی یک موجبر بلور فوتونی..... | ۲۹ |
| شکل ۱-۱۷ : سلول واحد مکعبی در الگوریتم بی برای گسسته سازی دامنه ی شبیه سازی. همچنین المانهای E و H و تناوب فضایی آنها همان طور که در الگوریتم اجرا می شود نیز نشان داده شده است [۵۱]..... | ۳۴ |
| شکل ۱-۱۸ : سلول واحد مورد تحلیل در خانواده ۱ از مسائل بلور های فوتونی کامل [۱۲۳]..... | ۳۷ |
| شکل ۱-۱۹ : نمایش موجبر بلور فوتونی از خانواده ۲ [۱۲۳]..... | ۳۷ |
| شکل ۱-۲۰ : شرط مرزی شفاف در چهار سوی یک کاواک در خانواده ۳ اعمال می شود و دو محور تقارن وجود دارند که استفاده از آنها برای کاهش حجم محاسبه ممکن است [۱۲۳]..... | ۳۸ |
| شکل ۱-۲۱ : شرط مرزی شفاف در چهار سوی یک موجبر بلور فوتونی در خانواده ۴ اعمال می شود. یک محور تقارن نیز وجود دارد که استفاده از آن برای کاهش حجم محاسبه ممکن است [۱۲۳]..... | ۳۸ |
| شکل ۲-۱ : نمایش نقاط اندازه گیری سرعت های فاز، گروه و لبه جلویی پالس..... | ۴۲ |
| شکل ۲-۲ : موجبر بلور فوتونی نور کند (شکل پایین) و مؤلفه میدان TM موج نوری (شکل بالا) برای نشان دادن فشردگی پالس [۵]..... | ۴۷ |
| شکل ۲-۳ : استفاده از نور کند در موجبرهای بلور فوتونی برای بهبود حساسیت [۵]..... | ۴۷ |
| شکل ۳-۱ : نمایشگر گاز IR با سلول گاز بدون حفاظ [۸۲]..... | ۵۰ |
| شکل ۳-۲ : نمایش شماتیک میزان عبور و جذب و بازتاب در یک سیستم نوعی..... | ۵۱ |
| شکل ۳-۳ : موقیت ناحیه فرو سرخ در طیف الکترو مغناطیسی [۸۲]..... | ۵۱ |
| شکل ۳-۴ : فرکانس ذاتی بین پیوند های اتمی مولکول آب [۸۲]..... | ۵۲ |
| شکل ۳-۵ : انرژی جذب شده بوسیله مولکولهای گاز..... | ۵۳ |
| شکل ۳-۶ : آشکار ساز های (الف) پیزو الکتریک (ب) لافت (ج) نوری- صوتی [۸۲]..... | ۵۴ |
| شکل ۳-۷ : (الف) یک نمونه ساده از آشکار سازهای ناحیه فرو سرخ (ب) آشکار ساز دو اشعه ای ناحیه فرو سرخ [۸۲]..... | ۵۵ |
| شکل ۳-۸ : میزان فرو رفتگی جذبی یک ماده آنالیز در صورت وجود یا عدم وجود نور کند در یک سنسور زیستی [۴۴]..... | ۵۷ |
| شکل ۳-۹ : میزان گاز متان در سال های اخیر [۱۰۵]..... | ۵۸ |
| شکل ۳-۱۰ : منابع گاز متان [۱۰۶]..... | ۵۹ |

فهرست شکل ها

| عنوان | شماره صفحه |
|--|------------|
| شکل ۳-۱۱ : طیف جذب گاز متان، (ضمیمه) نمایش شماتیک مولکولی گاز متان [۱۱۵]..... | ۶۰ |
| شکل ۹-۹ : طیف جذب گاز متان در طول موج $7.625\mu m$ | ۶۱ |
| شکل ۴-۱ : شماتیکی از سنسور گاز در ابعاد بزرگ با طول مسیر بر هم کنش نور- ماده L..... | ۶۳ |
| شکل ۴-۲ : نمایش شماتیک سنسور گاز متان موجبر بلور فوتونی..... | ۶۴ |
| شکل ۴-۳ : ساختار باند بلور فوتونی پیشنهادی..... | ۶۴ |
| شکل ۴-۴ : ساختار باند قطبش TM موجبر بلور فوتونی میله ای. منحنی قرمز رنگ مود هدایت اصلی ناشی از نقص را نشان می دهد..... | ۶۵ |
| شکل ۴-۵ : (الف) شماتیک دو بعدی سنسور موجبر بلور فوتونی پیشنهادی (ب) الگوی میدان الکتریکی مود هدایت در جهت Z..... | ۶۶ |
| شکل ۴-۶ : طیف جذبی محاسبه شده گاز متان برای فرکانس های نرمالیزه مختلف..... | ۶۶ |
| شکل ۴-۷ : (الف) و (ب) ناحیه نور کند متناظر با $0.46 < k_z < 0.49$ را نشان می دهد (ناحیه هاشور زده آبی رنگ). (ج) سرعت گروه و ضریب شکست گروه (د) پیک های طیف جذب گاز متان به ازای فرکانس های نرمالیزه مختلف..... | ۶۸ |
| شکل ۴-۸ : تغییر شعاع دو ردیف اول میله ها و شیفت آنها در امتداد موجبر و عمود بر مسیر آن..... | ۶۹ |
| شکل ۴-۹ : فاصله بین ناحیه نور کند مود اصلی (U) با باند هوا (V: منحنی مود میدان الکتریکی برای حالتی که بلافاصله در بالای گاف باند فوتونی قرار گرفته است)..... | ۶۹ |
| شکل ۴-۱۰ : ساختار باند قطبش TM یک موجبر بلور فوتونی میله ای به ازای قطر های مختلف ردیف اول (r_1) ، r..... | ۷۰ |
| شکل ۴-۱۱ : فاصله بین مود هدایت و مود هوا در ناحیه نور کند (الف) $r_1 = 0.8r$ (ب) $r_1 = 0.9r$ (ج) $r_1 = 1.05r$ (د) $r_1 = 1.1r$ (ه) $r_1 = 1.15r$ (و) $r_1 = 1.2r$ (ز) $r_1 = 1.4r$ | ۷۱ |
| شکل ۴-۱۲ : طیف جذب محاسبه شده برای فرکانس های نرمالیزه مختلف در ناحیه نور کند و r_1 های متفاوت و مقایسه آنها با طیف جذب ساختار اولیه..... | ۷۲ |
| شکل ۴-۱۳ : ساختار باند قطبش TM یک موجبر بلور فوتونی میله ای به ازای قطر های مختلف ردیف دوم (r_2) ، r..... | ۷۳ |
| شکل ۴-۱۴ : فاصله بین مود هدایت و مود هوا در ناحیه نور کند (الف) $r_2 = 0.8r$ (ب) $r_2 = 1.2r$ | ۷۳ |
| شکل ۴-۱۵ : مقایسه طیف جذب ساختار اولیه و طیف جذب ساختار با $r_2 = 1.2r$ | ۷۳ |
| شکل ۴-۱۶ : فاصله بین مود اصلی و باند هوا در ناحیه نور کند (الف) $shiftx_1 = 0.05a$ (ب) $shiftx_1 = 0.1a$ (ج) $shiftx_1 = 0.15a$ (د) $shiftx_1 = 0.2a$ | ۷۴ |
| شکل ۴-۱۷ : ساختار باند قطبش TM یک موجبر بلور فوتونی میله ای به ازای شیفت ردیف دوم در امتداد نقص خطی موجبر $(shiftx_2)$ | ۷۵ |
| شکل ۴-۱۸ : فاصله بین مود اصلی و باند هوا در ناحیه نور کند (الف) $shiftx_2 = 0.1a$ (ب) $shiftx_2 = 0.2a$ | ۷۵ |
| شکل ۴-۱۹ : مقایسه پیک جذب ساختار اولیه و ساختار پیشنهادی با $shiftx_2 = 0.2a$ | ۷۶ |
| شکل ۴-۲۰ : ساختار باند قطبش TM یک موجبر بلور فوتونی میله ای به ازای شیفت ردیف عمود بر مسیر موجبر $(shifty_2)$ | ۷۶ |

فهرست شکل ها

| عنوان | شماره صفحه |
|---|------------|
| شکل ۴-۲۱ : فاصله بین مود اصلی و باند هوا در ناحیه نور کند (الف) $\text{shifty}_2 = -0.2 \frac{\sqrt{3}}{2} a$ (ب) $\text{shifty}_2 = 0.1 \frac{\sqrt{3}}{2} a$ (ج) $\text{shifty}_2 = 0.2 \frac{\sqrt{3}}{2} a$ (د) $\text{shifty}_2 = -0.2 \frac{\sqrt{3}}{2} a$ | ۷۷..... |
| شکل ۴-۲۲ : مقایسه پیک جذب ساختار اولیه و ساختار پیشنهادی با $\text{shifty}_2 = -0.2 \frac{\sqrt{3}}{2} a$ | ۷۷..... |
| شکل ۴-۲۳ : ساختار باند قطبش TM سنسور متان موجبر بلور فوتونی اصلاح شده شکل ۴-۲۴ : فاصله باند هوا و باند هدایت در ناحیه نور کند برای سنسور موجبر بلور فوتونی اصلاح شده..... | ۷۸..... |
| شکل ۴-۲۴ : فاصله باند هوا و باند هدایت در ناحیه نور کند برای سنسور موجبر بلور فوتونی اصلاح شده..... | ۷۸..... |
| شکل ۴-۲۵ : طیف جذب گاز متان برای ساختار با مشخصات $d = 0.4a$, $r_1 = 1.2r$, $\text{shifx}_2 = 0.2a$ و $\text{shifty}_2 = -0.2 \frac{\sqrt{3}}{2} a$ | ۷۹..... |

فهرست جدول ها

| شماره صفحه | عنوان |
|------------|---|
| جدول ۱-۲ | مقایسه روش های متفاوت بر اساس پارامترهای گوناگون از جمله دما، فاکتور کاهش تاخیر، اتلاف، پهنای باند، سرعت و اندازه [۱۲۴] |
| ۴۵ | |

فصل اول

بلورهای فوتونی

۱-۱ مقدمه

از زمان ظهور مکانیک کوانتوم و اثبات وجود امواج مادی^۱، فیزیکدانان به طور گسترده از مفاهیم و مبانی تئوری اپتیک و الکترو مغناطیس بهره برده اند. اپتیک به ندرت مفاهیمی از فیزیک را به کار می برد اما بر خلاف قاعده بلورهای فوتونی^۲ [۱، ۲] بطور وسیعی از دانش بیکران در حوزه فیزیک حالت جامد و فیزیک ماده ی چگالیده سود می برند.

بلورهای فوتونی مواد نوری یکتایی هستند که در آنها نفوذپذیری الکتریکی عایق^۳ با ضریب شکست^۴ به طور متناوب تغییر می کند. این تناوب و تشابه نزدیک بین معادلات ماکسول^۵ و معادلات شرودینگر^۶ منجر به مشاهده پدیده های مشابهی بین امواج الکترونیکی در کریستال ها با امواج الکترومغناطیس در بلورهای فوتونی شده است [۳]. برای مثال در یک کریستال، الکترون ها به عنوان موج منتشر می شوند و موج هایی که روابط و معیارهای مشخصی را دنبال می کنند می توانند بدون پراکندگی درون پتانسیل متناوب حرکت کنند. ممکن است گاف هایی در ساختار باند انرژی کریستال وجود داشته باشد به این معنی که الکترون اجازه انتشار با انرژی های خاصی را در مسیرهای خاصی ندارد. اگر پتانسیل شبکه به اندازه کافی قوی باشد، گاف می تواند روی همه مسیر های ممکن را بپوشاند و این منجر به ایجاد یک گاف باند کامل می شود (یک نیمه هادی یک گاف باند بین باندهای

¹ Matter waves

² Photonic crystals (PCs)

³ Dielectric permittivity (ϵ_r)

⁴ Refractive index (n)

⁵ Maxwell's equations

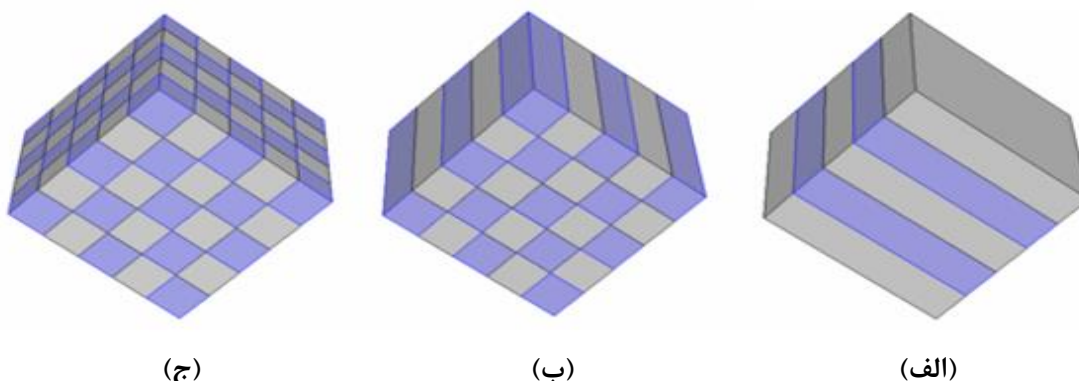
⁶ Schrodinger's equation

انرژی والانس^۱ و رسانایی^۲ دارد). به طور مشابه اگر به اندازه کافی اختلاف ضریب شکست بین مواد تشکیل دهنده بلورهای فوتونی وجود داشته باشد، ما می توانیم بلورهای فوتونی با گاف های باند فوتونی^۳ که از انتشار نور در جهت های خاص با فرکانس های خاصی جلوگیری می کنند، طراحی کرده و بسازیم. اگر بلور فوتونی برای رنج فرکانسی خاصی از انتشار امواج الکترومغناطیس با هر قطبش^۴، در هر جهت و برای هر منبعی جلوگیری کند به این معنی است که یک گاف باند فوتونی کامل وجود دارد. مشخصه اصلی بلورهای فوتونی دوره ای بودن ثابت دی الکتریک آنهاست. تغییرات متناوب در ضریب شکست می تواند ابعاد مختلف بلورهای فوتونی را بسازد. ضریب شکست ساختار، بصورت نسبت بین ماده با ثابت دی الکتریک زیاد و ماده با ثابت دی الکتریک کم که ساختار بلور فوتونی را تشکیل می دهند، تعریف می شود و میزان پاشندگی موج را درون ساختار بیان می کند. بلورهای فوتونی می توانند در یک، دو و سه بعد متناوب باشند که دوره تناوب آنها در محدوده طول موج فوتون است [۴، ۵].

در این فصل ابتدا انواع بلور فوتونی و کاربردهای هر یک از آنها معرفی می شوند. در گام بعد شبکه معکوس، ناحیه بریلوین و قضیه بلاخ را مطرح کرده و دلایل ایجاد گاف باند فوتونی درون ساختارهای متناوب شرح داده می شوند. در ادامه معادلات حاکم بر بلورهای فوتونی و انواع روش های حل عددی این معادلات در بلورهای فوتونی بیان می شوند و در نهایت مناسب ترین آنها را برای شبیه سازی ساختار پیشنهادی پروژه و خواص آن انتخاب می کنیم.

۲-۱ معرفی انواع بلور فوتونی

در سالهای اخیر بلورهای فوتونی علاقه زیادی را ناشی از خواص یکتا و بی نظیرشان به خود جلب کرده اند. بلور فوتونی یک ساختار متناوب با توانایی هدایت و دستکاری نور در ابعاد طول موج است [۶]. مطابق شکل ۱-۱ ضریب شکست این ساختار به طور متناوب در امتداد یک، دو یا سه بعد تغییر می کند. اگر این تکرار در یک بعد باشد به بلور فوتونی تشکیل شده، بلور فوتونی یک بعدی و اگر تکرار ساختار متناوب، در دو و سه بعد باشد، بلور های فوتونی دو و سه بعدی را به وجود می آورند [۴].

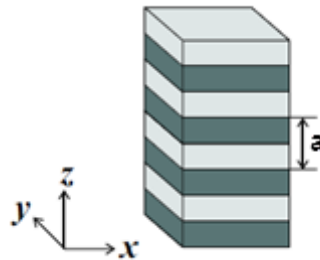


شکل ۱-۱: بلور های فوتونی (الف) یک بعدی (ب) دو بعدی (ج) سه بعدی

¹ Valence energy band
² Conduction energy band
³ Photonic band gaps
⁴ Polarization

۱-۲-۱ بلور های فوتونی یک بعدی

ساده ترین حالتی که برای یک سیستم متناوب می توان در نظر گرفت، از تکرار دو لایه همگن با ضخامت و ثابت گذردهی الکتریکی متفاوت به دست می آید. حتی در این سیستم ساده ما می توانیم بعضی از مهمترین خصوصیات بلورهای فوتونی مانند گاف باند و مودهایی که در نزدیکی نقص قرار می گیرند را تشخیص دهیم. شماتیک یک بلور فوتونی یک بعدی در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. این ساختار شامل لایه های متناوب مواد با ثابت های دی الکتریک متفاوت است.



شکل ۱-۲: نمایی از بلور فوتونی یک بعدی. اصطلاح یک بعدی به این دلیل استفاده می شود که تابع دی الکتریک $\epsilon(z)$ تنها در امتداد محور z تغییر می کند. سیستم شامل لایه های متناوب مواد (سفید و سبز) با ثابت های دی الکتریک مختلف و تناوب فضایی a است. ما فرض می کنیم هر لایه یکنواخت باشد و تا بی نهایت در امتداد محور x و y گسترش یابد و همچنین فرض می کنیم تناوب در جهت z تا بی نهایت ادامه دارد.

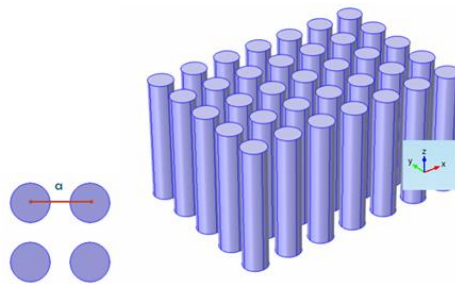
این نوع از بلورهای فوتونی برای نورهایی با فرکانس هایی در محدوده خاص به عنوان یک آینه (آینه برگ^۱) عمل می کنند اما اگر در همین شرایط در ساختار نقصی ایجاد شود می توان نور را درون آن متمرکز کرد. این مفاهیم معمولاً در آینه های دی الکتریک و فیلترهای نوری استفاده می شوند [۷].

۱-۲-۲ بلور های فوتونی دو بعدی

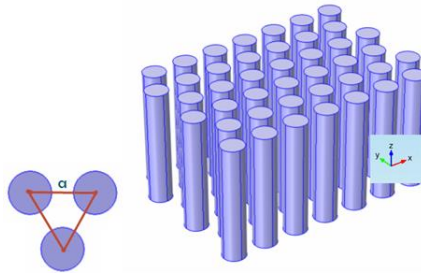
بلورهای فوتونی دو بعدی در امتداد دو محور، متناوب و در امتداد محور سوم، همگن^۲ هستند. نخستین ساختارهای بلور فوتونی دو بعدی شبکه های مربعی و مثلثی از استوانه ها بودند [۸، ۹]. معمولاً از بلورهای فوتونی با شبکه های مثلثی یا مربعی برای کاربردهای مختلف استفاده می شود. نمونه ای از شبکه دو بعدی مربعی و مثلثی در شکل ۱-۳ نشان داده شده است (ستون ها به اندازه کافی بلند فرض می شوند). سیستم در صفحه xy تقارن انتقالی گسسته دارد یعنی $\epsilon(r) = \epsilon(r + R)$ به طوریکه R هر ترکیب خطی از $a\hat{x}$ و $a\hat{y}$ است [۴].

¹ Bragg mirror

² Homogeneous



(الف)



(ب)

شکل ۱-۳: (الف) بلور فوتونی دو بعدی مربعی (ب) بلور فوتونی دو بعدی مثلثی

اگرچه مطالعه بر روی بلورهای فوتونی با کنترل انتشار خود به خودی^۱ اتم ها در ساختار سه بعدی شروع شد [۱۰] اما به دلیل نداشتن امکانات کافی برای ساخت دقیق بلورهای فوتونی سه بعدی و این که مجتمع سازی این ساختارها بر روی تراشه به کمک تکنولوژی‌های نور-الکترونیک موجود بسیار دشوار است، ما علاقه مندیم روی ساختارهای دو بعدی کار کنیم که به راحتی و با قابلیت اطمینان بالا [۱۰] با تکنیک‌های ساخت نیمه رسانا قابل پیاده سازی هستند و قابلیت قرار گرفتن روی تراشه را دارند [۵]. از این رو در این پروژه از ساختار دو بعدی مثلثی برای طراحی سنسور گاز متان استفاده شده است.

۳-۱ شبکه معکوس^۲ و ناحیه ی بریلوین^۳

برای پیاده سازی بلور های فوتونی در نرم افزار های شبیه سازی و حل معادلات حاکم بر آن ها لازم است شبکه معکوس و ناحیه بریلوین ساختار متناوب را در اختیار داشته باشیم. از این رو نحوه بدست آوردن آنها به طور مفصل بیان می شود.

۱-۳-۱ شبکه ی معکوس

زمانی که می خواهیم تبدیل فوریه یک تابع متناوب شبکه را بیان کنیم، به بردارهای شبکه معکوس نیازمندیم. در واقع شبکه ی معکوس تبدیل فوریه ی تابع فضایی ساختار اصلی می باشد [۵]. با داشتن بردارهای شبکه می توان بردارهای شبکه معکوس را متعاقباً محاسبه کرد. فرض کنیم بردار شبکه، \mathbf{R} و بردار شبکه معکوس، \mathbf{G} باشد. ما نیازمندیم همه ی \mathbf{G} هایی را که برای هر \mathbf{R} ، $\mathbf{G} \cdot \mathbf{R}$ ضرب یک عدد صحیح در 2π باشد بدست آوریم. هر بردار شبکه \mathbf{R} می تواند بر حسب بردارهای شبکه ی اولیه (کوچکترین بردارهایی

¹ Spontaneous emission

² Reciprocal lattice

³ Brillouin zone

که یک نقطه شبکه را به دیگری وصل می کنند) نوشته شود. برای مثال برای یک شبکه ی مکعبی ساده با فواصل a ، بردارهای R به فرم $R = la\hat{x} + ma\hat{y} + na\hat{z}$ هستند. l و m و n اعداد صحیح می باشند. در حالت کلی بردارهای شبکه ی اولیه a_1 و a_2 و a_3 نامیده می شوند. اگر بخواهیم بردارهای شبکه ی معکوس G را برای همان ساختار تعریف کنیم، هر بردار شبکه ی معکوس به صورت $G = \hat{l}b_1 + \hat{m}b_2 + \hat{n}b_3$ نوشته می شود به طوریکه $G \cdot R = 2\pi N$ پس می توان نوشت:

$$G \cdot R = (la_1 + ma_2 + na_3) \cdot (\hat{l}b_1 + \hat{m}b_2 + \hat{n}b_3) = 2\pi N \quad (1-1)$$

به ازای هر مجموعه ای از $\{a_1, a_2, a_3\}$ هدف ما بدست آوردن مجموعه ی متناظر $\{b_1, b_2, b_3\}$ است به گونه ای که $a_i \cdot b_j = 2\pi\delta_{ij}$. یک راه برای بدست آوردن بردارهای متناظر بهره بردن از خاصیت ضرب خارجی^۱ است (به یاد دارید که برای هر بردار x و y ، $x \cdot (x \times y) = 0$). ما می توانیم بردارهای شبکه معکوس را به صورت زیر محاسبه کنیم:

$$b_1 = \frac{2\pi a_2 \times a_3}{a_1 \cdot (a_2 \times a_3)}, \quad b_2 = \frac{2\pi a_3 \times a_1}{a_1 \cdot (a_2 \times a_3)}, \quad b_3 = \frac{2\pi a_1 \times a_2}{a_1 \cdot (a_2 \times a_3)} \quad (2-1)$$

به طور کلی اگر A یک ماتریس 3×3 باشد به طوری که ستون های آن a_1 و a_2 و a_3 باشند و B نیز یک ماتریس 3×3 باشد به طوری که b_1 و b_2 و b_3 ستون های آن باشند آنگاه $B = 2\pi A^{-1}$ برابر معکوس ترانهاد A است [۴، ۱۲۳].

۱-۳-۲ ناحیه بریلوین

مودهای الکترومغناطیسی می توانند به فرم بلاخ^۲ نوشته شوند (در بخش بعد شرح داده می شود). به طوری که یک موج تخت به وسیله تابعی که تناوبی مشابه شبکه دارد، مدوله می شود.

$$H_k(r) = e^{ik \cdot r} u_k(r) = e^{ik \cdot r} u_k(r + R) \quad (3-1)$$

یک خاصیت مهم حالات بلاخ این است که نیازی به مقادیر مختلف k برای رسیدن به مود های مختلف ندارد. به عبارت دیگر مودی با بردار موج k و بردار موج $k+G$ مشابه یکدیگرند. بردار موج k برای مشخص کردن رابطه ی فاز بین سلول های مختلف که بوسیله u توصیف می شوند به کار گرفته می شود.

اگر k به اندازه ی G افزایش پیدا کند فاز بین سلول ها به اندازه ی $G \cdot R$ یا همان $2\pi N$ افزایش می یابد که در واقع اختلاف فازی وجود ندارد. بنابر این افزایش k به اندازه ی G منجر به یک مود فیزیکی مشابه می شود. از این رو ما می توانیم توجهمان را به یک ناحیه ی محدود در شبکه معکوس که در آن نمی توان از هر قسمت حجم به قسمت دیگر بیش از G پیش رفت، محدود کنیم. همه ی مقادیر k که خارج این ناحیه می افتند، می توانند از داخل ناحیه ی مذکور به اضافه ی G حاصل شوند، بنابر این برچسب های زائد هستند و نیازی به محاسبه خارج از این ناحیه نیست. در واقع چنین نواحی بسیاری اما ما روی ناحیه ای که نزدیک $k=0$ است تمرکز می کنیم و به آن ناحیه اول بریلوین^۳ می گوییم. یک راه برای مشخص کردن ناحیه ی اول بریلوین این است که اطراف هر نقطه شبکه در فضای معکوس فضایی را که از بقیه نقاط به آن نزدیکتر است را برجسته کنیم [۴، ۱۲۳].

در شکل ۱-۴ بردارهای شبکه ی معکوس و ناحیه های بریلوین دو شبکه ی معروف مربعی و مثلثی رامشاهده می کنید که طبق تعاریف قبلی بدست آمده اند. همان طور که دیده می شود ساختار شبکه ی معکوس غیر از

¹ Cross product

² Bloch

³ First Brillouin zone