

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و

نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه

متعلق به دانشگاه رازی است.



دانشکده فنی و مهندسی
گروه مهندسی برق-الکترونیک

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته ی مهندسی برق
گرایش الکترونیک

عنوان پایان نامه
کاواک های مبتنی بر بلور فوتونی

اساتید راهنما:
دکتر محمد مهدی کارخانه چی
دکتر آرش صادق زاده

نگارش:
فرید فیضی کریم آبادی

اسفندماه ۱۳۹۲



دانشکده فنی مهندسی
گروه مهندسی برق

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی برق گرایش الکترونیک

نگارش:

فرید فیضی کریم آبادی

تحت عنوان

کاواک های مبتنی بر بلور فوتونی

در تاریخ ۱۳۹۲/۱۲/۱۱ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه خوب به تصویب نهایی رسید.

۱- استاد راهنمای اول : دکتر دکتر محمد مهدی کارخانه چی با مرتبه‌ی علمی استادیار امضاء

۲- استاد راهنمای دوم : دکتر آرش صادق زاده با مرتبه‌ی علمی استادیار امضاء

۳- استاد داور داخل گروه: دکتر محسن حیاتی با مرتبه‌ی علمی دانشیار امضاء

۴- استاد داور خارج از گروه: دکتر سید وهاب الدین مکی با مرتبه‌ی علمی استادیار امضاء

چکیده:

با گسترش روزافزون فناوری های مرتبط با پردازش کوانتومی اهمیت دسترسی به ادواتی برای حصول تزویج قوی میان ذرات هرچه بیشتر نمایان می گردد. در این میان زیرساختار مبتنی بر فناوری فوتونیک از اهمیت فوق العاده ای برخوردار است و در حقیقت بهترین دستاوردها در این خصوص توسط این فناوری بدست آمده اند. امکان تشخیص و گسیل تک فوتونها، و نیز تولید حالات درهم تنیده میان فوتون ها و الکترونها در ساختارهای حالت جامد میسر است مشروط به آن که ذرات باردار اصطلاحاً در تزویج قوی با میدان الکترومغناطیس فوتونها قرار بگیرد. یکی از موفق ترین مسیرهای حصول این هدف در دنیای امروز توسط جاسازی نقاط کوانتومی در کاواک های بلور فوتونی است. البته باوجود اینکه فناوری و فرآیندهای ساخت این ادوات بسیار پیشرفته و دشوار هستند، و در حال حاضر در انحصار معدودی از گروه های پژوهشی دنیاست، دانش تئوری در پس پرده این ادوات در ایران قابل مطالعه است.

کلید واژه ها: فوتون. کاواک . نقطه کوانتومی . کاواک کریستال فوتونی . الکتروپدینامیک کوانتومی

فصل اول: مفاهیم و ساختارهای پایه

۲-۱-۱-۱	مقدمه	۲
۲-۱-۲-۱	تارخچه	۳
۱-۲-۱-۱	ویژگی های ساختار بلور فوتونی تیغه ای	۳
۲-۲-۱	اندازه و مکان گاف فوتونی	۵
۳-۲-۱	اندازه گاف شعاع حفره های هوا	۷
۳-۱	طراحی کاواک با ضریب کیفیت نسبتاً بزرگ و حجم مد کوچک	۸
۱-۳-۱	تلفات و خارج شدن انرژی موج در کاواک	۸
۲-۳-۱	چگونگی تغییر ضریب کیفیت کاواک	۱۰
۳-۳-۱	تخمین ضریب کیفیت از طریق طیف بسامد	۱۳
۴-۳-۱	چگونگی تغییر ضریب کیفیت نسبت به تغییر شعاع کاواک	۱۴

فصل دوم: چگونگی طراحی کاواک به طور عمومی

۱-۲-۱	رابطه بین ضریب کیفیت یک مد کاواک با توزیع فوریه مکانی آن	۲۱
۱-۱-۲	روش محاسبه ضریب کیفیت	۲۱
۲-۱-۲	توان تشعشعی متوسط در یک سیکل زمانی	۲۲
۳-۱-۲	تعریف ضریب شایستگی در طراحی کاواک	۲۷
۲-۲	میدان مد تشدید با توزیع بهینه در فضای بردار موج	۲۷
۳-۲	محاسبه تابع ضریب شکست	۲۸
۴-۲	رابطه پاشندگی یک موجبر در جهت یک بلور فوتونی	۲۹
۵-۲	طراحی کاواک بلور فوتونی به شیوه معکوس	۳۳
۶-۲	تخمین تقریبی رفتار عمومی Q/V	۳۳
۱-۶-۲	طراحی تخمینی کاواک بلور فوتونی در حوزه k	۳۶
۲-۶-۲	تخمین طراحی کاواک بلور فوتونی از طریق توزیع میدان در فضای K	۳۸
۳-۶-۲	تخمین طراحی کاواک بلور فوتونی از طریق توزیع میدان در فضای k : روش دوم	۴۱

فصل سوم: شبیه سازی کریستال فوتونی GaAs با مسیر کاواک در دو بعد

۴۴	مقدمه	۴۴
۱-۳-۱	ویژگی های قطعه کریستال فوتونی GaAs شبیه سازی شده	۴۴
۲-۳-۱	مراحل شبیه سازی کریستال فوتونیک GaAs با نرم افزار comsol	۴۵
۱-۲-۳	تعریف مسیر اصلی شبیه سازی	۴۵
۲-۲-۳	تعریف قطعه ی شبیه سازی برای نرم افزار	۴۶
۳-۲-۳	مشخص کردن ماده (Material) استفاده شده در کریستال برای نرم افزار	۴۶

- ۴۷-۲-۳- تعریف پارامترهای مربوط به (GaAs) در نرم افزار..... ۴۷
- ۴۷-۲-۳- انتخاب حفره‌های هوا برای کریستال در نرم افزار..... ۴۷
- ۴۸-۲-۳- تعریف مرز پراکندگی برای میدان در ماده های به کار رفته در قطعه کریستالی..... ۴۸
- ۴۹-۲-۳- تعریف مش بندی در کریستال فوتونی ۴۹
- ۵۰-۲-۳- تعریف دامنه فرکانس کاری برای کریستال فوتونی..... ۵۰
- ۵۰-۲-۳- مشخص کردن نوع نمایش خروجی برای نرم افزار..... ۵۰
- ۵۱-۲-۳- مشخص کردن حدود داده ها برای نرم افزار..... ۵۱
- ۵۱-۲-۳- تنظیم نرم افزار برای نمایش پاسخ فرکانسی..... ۵۱
- ۵۲-۳- مشاهده نتایج شبیه سازی کریستال فوتونی..... ۵۲
- ۵۷- پیشنهادات..... ۵۷

۶۰- منابع..... ۶۰

فهرست شکل ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱ ساختار بلور فوتونی سه بعدی یابلانویچ همراه با ساختار نوار که در سال ۱۹۹۱ ساخته شد.....	۳
شکل ۲-۱ ساختار بلور فوتونی با آرایش مثلثی بصورت تیغه.....	۴
شکل ۳-۱ نمودار ساختار نوار مربوط به تیغه بلور فوتونی با آرایش مثلثی حفره های هوا.....	۴
شکل ۴-۱ نمودار چگونگی تغییر اندازه نسبی گاف به ضخامت تیغه.....	۶
شکل ۵-۱ نمودار چگونگی تغییر اندازه (راست) و اندازه نسبی (چپ) گاف نسبت به اندازه شعاع حفره های هوا.....	۷
شکل ۶-۱ مکان هندسی منحنی برخورد مخروط نور با صفحه $\omega = \omega_c$ (دایره قرمز).....	۹
شکل ۷-۱ منحنی اندازه تابع سینک مدوله شده توسط تابع سینوسی.....	۱۰
شکل ۸-۱ پارامترهای ساختاری کاواک بلور فوتونی.....	۱۱
شکل ۹-۱ طیف بسامدی پاسخ کاواک به سیگنال ورودی با پهنای باند زیاد.....	۱۲
شکل ۱۰-۱ نمودار چگونگی تغییر مولفه E_y نسبت به زمان بعد از خاتمه یافتن تحریک ورودی.....	۱۳
شکل ۱۱-۱ طیف بسامدی معادل با نمودارهای حوزه زمان در شکل (۱۰-۱).....	۱۴
شکل ۱۲-۱ پروفایل مکانی اندازه شدت میدان الکتریکی در صفحه $Z=0$ مربوط به مد با بسامد 0.2935 بهنجار شده. این مد نسبت به محور Y متقارن و نسبت به محور X پاد متقارن می باشد.....	۱۵
شکل ۱۳-۱ پروفایل مکانی اندازه شدت میدان الکتریکی در صفحه $Z=0$ مربوط به مد با بسامد 0.2932 بهنجار شده. این مد نسبت به محور Y پاد متقارن و نسبت به محور X متقارن می باشد.....	۱۵
شکل ۱۴-۱ پروفایل مکانی اندازه شدت میدان الکتریکی در صفحه $Z=0$ مربوط به مد با بسامد 0.3895 بهنجار شده. این مد نسبت به محور Y پاد متقارن و نسبت به محور X متقارن می باشد.....	۱۵
شکل ۱۵-۱ پروفایل مکانی اندازه شدت میدان الکتریکی در صفحه $Z=0$ مربوط به مد با بسامد 0.3758 بهنجار شده. این مد نسبت به محور Y پاد متقارن و نسبت به محور X متقارن می باشد.....	۱۵
شکل ۱۶-۱ پروفایل مکانی اندازه شدت میدان الکتریکی در صفحه $Z=0$ مربوط به مد با بسامد 0.3536 بهنجار شده. این مد نسبت به محور Y پاد متقارن و نسبت به محور X پاد متقارن میباشد.....	۱۶
شکل ۱۷-۱ پروفایل مکانی اندازه شدت میدان الکتریکی در صفحه $Z=0$ مربوط به مد با بسامد 0.3536 بهنجار شده. این مد نسبت به محور Y متقارن و نسبت به محور X متقارن می باشد.....	۱۶
شکل ۱۸-۱ چگونگی تغییر ضریب کیفیت دو مد کاواک نسبت به تغییر شعاع f	۱۷
شکل ۱۹-۱ طیف پاسخ بسامدی ساختار را به ازای $f=0$	۱۷
شکل ۲۰-۱ نمودار تغییرات ضریب کیفیت به حجم و تغییر بسامد تشدید مد نسبت به پارامتر p با ثابت نگاه داشتن $f=0.33a$	۱۸
شکل ۲۱-۱ نمودار تغییرات ضریب کیفیت به حجم و تغییر بسامد تشدید مد نسبت به پارامتر p با ثابت نگاه داشتن $f=0.30a$	۱۸
شکل ۲۲-۱ نمودار تغییرات ضریب کیفیت به حجم مد و تغییر بسامد تشدید مد نسبت به پارامتر p با ثابت نگاه داشتن $f=0.27a$	۱۹
شکل ۱-۲ تقریب زدن توان تشعشی Q_{\pm} از روی پروفایل میدان مجاور بر روی سطح S	۲۳

شکل ۲-۲ چپ: نمودار پاشندگی مدهای شبه TE برای بلور فوتونی با آرایش مربعی به همراه اولین ناحیه بریلیون در فضای شبکه معکوس و ابعاد نسبی ساختار شبیه سازی شده با $r/a = 0.4$ و $d/a = 0.55$ و $n = 3.6$ و شکل سمت راست: نمودار پاشندگی مدهای شبه TE برای بلور فوتونی با آرایش مثلثی به همراه اولین ناحیه بریلیون در فضای شبکه معکوس و ابعاد نسبی ساختار شبیه سازی شده با $r/a = 0.3$ و $d/a = 0.65$ و $n = 3.6$ در شبیه سازی انجام شده برای هر دو مورد واحد طول a به 20 قسمت تقسیم شده است..... ۲۸

شکل ۲-۳ چپ (نمودار پاشندگی برای موجبر مثلثی در جهت ΓJ با پارامترهای $r/a = 0.3$ و $d/a = 0.65$ و $n=3.6$ گاف فوتونی) ناحیه بین دو قسمت خاکستری (شامل سه مد می باشد. و شکل راست) مولفه B_z میدان مد های محبوس شده در موجبر مثلثی که با توجه به نوع تقارن در دو جهت x و y با اندیس های زوج یا فرد (o, e) علامت گذاری شده اند. مد های محبوس شده کاواک B_{eo} و B_{ee} , B_{oo} و B_{oe} احتیاج به اختلال اضافی ساختار برای ورود به ناحیه گاف فوتونی را دارا می باشند که توسط تغییر در قطر حفره های مجاور انجام پذیرفته است..... ۳۰

شکل ۲-۴ مقایسه ضریب کیفیت بدست آمده از معادله (18) و روش FDTD به ترتیب با مربع و دایره مشخص شده اند شکل سمت چپ) کاواک با برداشتن سه حفره در جهت ΓJ ایجاد شده و ضریب کیفیت آن با تنظیم کردن محل حفره های نزدیک به محل نقص بهینه شده است شکل سمت راست) کاواک دوقطبی X تشریح شده در مرجع [3]. ضریب کیفیت کاواک با منبسط کردن حفره های خط میانی کاواک در جهت ΓX تنظیم شده است..... ۳۲

شکل ۲-۵ مدهای ایده آل در سطح S بالای کاواک بلور فوتونی با طول محدود. تمامی شکلها دارای حجم مد تقریبی $(\lambda/n)^3$ می باشند. بخش های $a-c$ نشان دهنده مدها با پوش سینک و گوسی در راستای X و Y می باشند. شکل ها به ترتیب $H_z(x, y)$ و $FT_2(H_z)$ و $K(k_x, k_y)$ در داخل مخروط نور هستند. بخش های $d-g$ نمایش دهنده مدهای B_{oe} با پوش گوسی در هر دو راستای X و Y هستند. شکل ها به ترتیب $H_z(x, y)$, $K(k_x, k_y)$, $FT_2(H_z)$ و $Q_{\perp}(\sigma_y/a)$ هستند. Q_{\perp} از روی معادله شماره 7 بدون در نظر گرفتن E_z محاسبه شده است. بخش های $h-i$ نشان دهنده مدها با پوش گوسی در راستای X و Y هستند که میتوانند تابش روبه بالا را بخوبی محدود نمایند..... ۳۶

شکل ۲-۶ تحلیل تفاضل متناهی در حوزه زمان بدست آمده برای مدل کاواک گوسی $(a-c)$ و برای مدل کاواک سینک $(d-f)$ مدل گوسی: بخش نخست B_z و بخش دوم $|E|$ و بخش آخر قسمت نمودار آبی: تبدیل فوریه گرفته شده در بالای بلور فوتونی و نمودار قرمز: نمای تبدیل فوریه میدان اولیه که هدف رسیدن به آن بوده است. تبدیل فوریه میدان آغازین برای مدل کاواک به فرم سینک به دلیل نرخ نمونه برداری دندان دندانه (Jagged) شده است که علت آن نمونه برداری با نرخ شبیه سازی است. مشخصات کاواک بصورت 20 نقطه در هر تناوب a و شعاع $r = 0.3a$ و ضخامت بلور فوتونی با طول محدود $0.6a$ و ضریب انکساری 3.6 شبیه سازی شده است. شعاع حفره های نقص نسبت به a از مرکز بترتیب عبارت است از: $(0, 0.25, 0.5, 0.75, 0.1, 0.75, 0.1, 0.125, 0.125, 0.125, 0.125, 0.1, 0.125, 0.125, 0.1, 0.125, 0.125, 0.15, 0.3, 0.3)$ برای کاواک

سینکی و $(0.025, 0.025, 0.05, 0.1, 0.225)$ برای کاواک گوسی می باشد..... ۴۲

شکل ۳-۱ قطعه کریستال فوتونی GaAs با حفره های هوا..... ۴۵

شکل ۳-۲ مش بندی Mapped و Free Quad و Free triangular..... ۴۹

شکل ۳-۳ ساختار مش بندی کریستال فوتونی GaAs با حفره های هوا..... ۵۲

شکل ۳-۴) شکل (a) با توجه به جهت و بزرگی فلش‌ها جهت و شدت میدان را نشان می‌دهد و شکل (b) شدت انتشار موج در بین مسیر تعریف شده در سلول کریستالی..... ۵۳

شکل ۳-۵) شدت میدان ب صورت ۳ بعدی در سطح کریستال فوتونی را نشان می‌دهد..... ۵۳

شکل ۳-۶) انتشار شدت میدان برای سه طول موج متفاوت که (a) انتشار شدت میدان با مد دارای طول موج $1.15 * 10^{-6}$ و شکل (b) شدت میدان با مد دارای طول موج $0.985 * 10^{-6}$ و شکل (c) شدت میدان با مد دارای طول موج $0.82 * 10^{-6}$ را نشان می‌دهد..... ۵۴

شکل ۳-۷) پاسخ فرانسی در کریستال فوتونی برای دو مد با طول موج‌های $0.82 * 10^{-6}$ m و $0.985 * 10^{-6}$ m..... ۵۵

شکل ۳-۸) شدت انتشار میدان در یک مد مشخص برای دو کریستال فوتونی شکل (a) کریستال Si و شکل (b) کریستال GaAs را نشان می‌دهد..... ۵۶

فهرست جداول

صفحه

عنوان

- جدول ۱-۱ چگونگی تغییر مکان لبه های گاف فوتونی نسبت به اندازه ضخامت تیغه..... ۶
- جدول ۲-۱ چگونگی جابجایی لبه گاف نسبت به اندازه شعاع حفره های هوا..... ۷
- جدول ۱-۲ مقدار Q برای ساختارهای متفاوت بدست آمده از روش معکوس اول..... ۴۰
- جدول ۱-۳ میزان شدت میدان الکتریکی در ورودی و خروجی..... ۵۶

فصل اول

مفاهیم و ساختارهای پایه

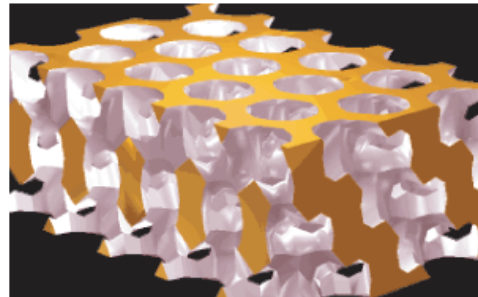
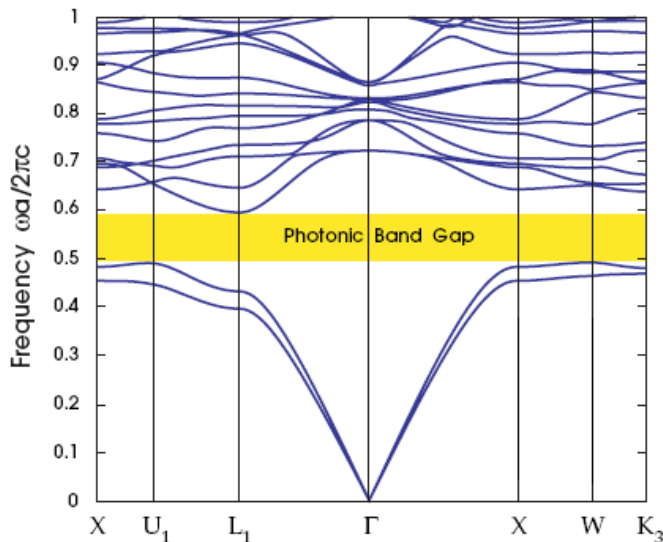
۱-۱- مقدمه

با گسترش روزافزون فناوری های مرتبط با پردازش کوانتومی اهمیت دسترسی به ادواتی برای حصول تزویج قوی میان ذرات هرچه بیشتر نمایان می گردد. در این میان زیرساختار مبتنی بر فناوری فوتونیک از اهمیت فوق العاده ای برخوردار است و در حقیقت بهترین دستاوردها در این خصوص توسط این فناوری بدست آمده اند. امکان تشخیص و گسیل تک فوتونها، و نیز تولید حالات درهم تنیده میان فوتونها و الکترونها در ساختارهای حالت جامد میسر است مشروط بدانکه ذرات باردار اصطلاحاً در تزویج قوی با میدان الکترومغناطیس فوتونها قرار بگیرد. یکی از موفق ترین مسیرهای حصول این هدف در دنیای امروز توسط جاسازی نقاط کوانتومی در کاواک های بلور فوتونی است. البته باوجود اینکه فن آوری و فرآیندهای ساخت این ادوات بسیار پیشرفته و دشوار هستند، و در حال حاضر در انحصار معدودی از گروه های پژوهشی دنیاست، دانش تئوری در پس پرده این ادوات در ایران قابل مطالعه است.

برای جلوگیری از فرار فوتون تابش شده از بازترکیب اکسیتون، می توان نقطه کوانتومی را درون یک کاواک فوتونی قرار داد. با توجه به ساختار بلورهای فوتونی و منحنی پاشندگی آنها می توان برای ساخت چنین کاواکی از آنها بهره برد. در حقیقت یکی از مهمترین و مورد علاقه ترین کاربردهای بلورهای فوتونی محبوس سازی نور در محدوده فضایی بسیار کوچک (کوچکتر از مکعب طول موج نوری) می باشد. روش اصلی محبوس سازی در اینجا بر خلاف ساختارهایی همچون میکرو دیسک و میکرو کره که عملکرد آنها تنها بر اصل بازتاب کلی داخلی یا ¹TIR استوار است، بازتاب نور توسط آینه براگ یا ²DBR می باشد می توان حدس زد که داشتن کاواکی با ضریب کیفیت بالا می تواند زمان بیشتری فوتون را در مکان مورد نظر نگاه دارد. لذا به نظر می رسد که استفاده از بلورهای فوتونی با گاف کامل (در همه جهات)، ایده آل باشد. در شکل شماره ۱-۱ نمونه ای از بلورهای فوتونی با گاف کامل را همراه با ساختار نوار آن مشاهده می کنید.

¹. Total Internal Reflection

². Distributed Bragg Reflection



شکل ۱-۱ ساختار بلور فوتونی سه بعدی یابلانویچ همراه با ساختار نوار که در سال 1991 ساخته شد.

۱-۲-۲- تاریخچه

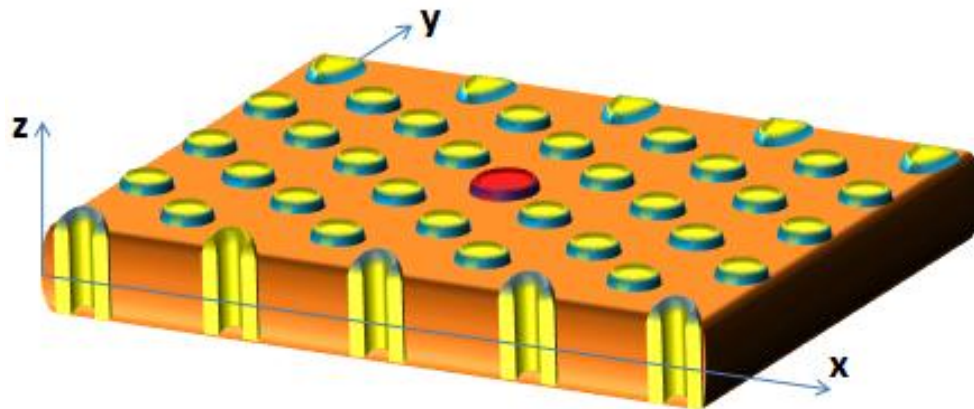
در سال ۱۹۸۰ آزمایشات جالبی بر روی اتم های قرار گرفته در میکرو کاواک ها و کاواک ها اپتیکی صورت گرفته و نشان داد که فرایندهای اپتیکی همچون گسیل خود به خودی^۱ می توان به شدت تحت تاثیر چگالی حالت های محیط تغییر یابد. CQED از سال ۱۹۹۰ موضوع اساسی تحقیق در زمینه الکترونیک نوری بوده است. و اخیرا آزمایش های عملی فراوانی جهت مشاهده پدیده های قابل پیش بینی مرتبط با چنین برهمکنشی و همچنین ایجاد حالت های پوشیده یا حالت های در هم تنیده و شکافتگی انرژی انجام پذیرفته و آزمایشی بر روی نقاط کوانتومی رشد یافته درون یک کاواک بلور فوتونی انجام پذیرفته و اثر وجود کاواک بر روی گسیل خود بخودی بررسی گشته است.

۱-۲-۲-۱ ویژگی های ساختار بلور فوتونی تیغه ای:

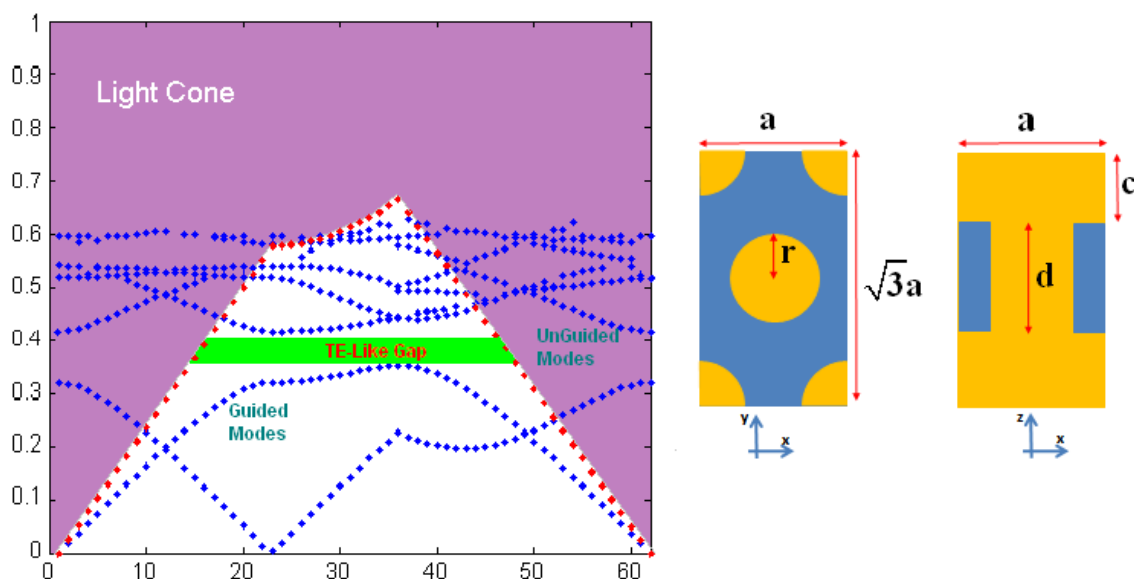
همانطور که در شکل شماره ۲-۱ دیده می شود، این ساختار نسبت به صفحه $z=0$ متقارن بوده و لذا می توان ویژه مدهای آن را به صورت جمع دو دسته مد با تقارن های زوج (شبه TE^z) و فرد (شبه TM^z) تجزیه کرد. اسامی انتخاب شده به دلیل شباهت تام این مدها در صفحه $z=0$ با مدهای TE^z و TM^z در بلورهای فوتونی دوبعدی می باشد. البته باید توجه داشت که تقارن زوج و فرد نسبت به صفحه تقارن $Z=0$ تنها برای کمیت های برداری همچون میدان الکتریکی صادق است. لذا تقارن برای کمیت های شبه برداری همچون میدان مغناطیسی می تواند مشابه با میدان الکتریکی نباشد. به ویژه در این مورد خاص تقارن موجود در میدان مغناطیسی، نسبت به میدان الکتریکی معکوس می باشد. در تصویر شماره ۱-۳ نمونه ای از منحنی پاشندگی

^۱. spontaneous-emission

این ساختار را مشاهده می کنیم که برای مدهای شبه TE^z صورت بهنجار شده، ترسیم شده است. برای بدست آوردن این منحنی از روش FDTD استفاده شده است.



شکل ۲-۱ ساختار بلور فوتونی با آرایش مثلثی بصورت تیغه



شکل ۳-۱ نمودار ساختار نوار مربوط به تیغه بلور فوتونی با آرایش مثلثی حفره های هوا

این منحنی به ازای مقادیر $r=0.4a, c=0.5a, d=0.2a$ بدست آمده است. همچنین واحد طول به ۱۲ قسمت تقسیم گردیده است. همچنین با توجه به اینکه از سلول واحد مستطیلی (به جای متوازی الاضلاع) استفاده شده است مدها دچار تا خوردگی^۱ شده اند. با توجه به اینکه در محیط همگن رابطه پاشندگی به صورت

^۱ . Folding

$\omega = k \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$ است، لذا در حالت کلی برای بیرون تیغه که در اینجا آن را هوا فرض کردیم رابطه زیر را خواهیم داشت.

$$\omega = c \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2} \quad 1-1$$

که در آن k_i بردار موج در جهت i است. همان طور که مشخص است اگر k_z عددی حقیقی باشد، مد مورد نظر در راستای ضخامت تیغه (راستای Z) متناوب بوده و مد در این راستا جایگزیده نخواهد بود. در این صورت موج می تواند به سهولت از تیغه خارج گردد. برای بدست آوردن مدهای جایگزیده باید موج در راستای Z افت کند و یا به عبارت دیگر k_z موهومی باشد.

برای این منظور کافیسیت بسامد زمانی مد مورد نظر از مقدار معینی کوچکتر باشد. برای بدست آوردن این حد کافیسیت در رابطه (1-1) k_z را صفر فرض کنیم.

$$\omega \leq c \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \quad 2-1$$

در نمودار ساختار نوار رسم شده در شکل شماره 1-3 خط قرمز این مرز را نشان میدهد که به آن مخروط نور¹ یا خط نور² اطلاق می گردد. همچنین بالای این خط که با رنگ بنفش مشخص شده است نشانگر مدهای غیر جایگزیده بوده که به آنها مدهای غیر هدایت شده میگوییم. پایین مخروط نور نیز مدهای هدایت شده³ را خواهیم داشت که در صفحه تیغه متناوب بوده و در راستای عمود بر آن (بیرون از تیغه) بطور نمایی نزولی می باشند (مانند سمت راست شکل شماره 1-3).

1-2-2- اندازه و مکان گاف فوتونی

برای طراحی یک کاواک فوتونی باید پارامترهای این ساختار را بطور مناسب انتخاب نماییم. یکی از مهم ترین ویژگی های ساختار نوار که باید در طراحی مورد توجه قرار گیرد، اندازه و مکان گاف فوتونی می باشد. برای درک رابطه کیفی بین اندازه گاف و پارامترهای ساختار، نمودارهای زیر بدست آورده شده اند. جدول شماره (1-1) چگونگی تغییر مکان گاف فوتونی را نسبت به اندازه ضخامت تیغه نشان می دهد. همچنین این جدول همراه با شکل شماره 1-4 چگونگی تغییر اندازه نسبی گاف را نسب به این پارامتر نشان می دهد.

¹ . Light Cone

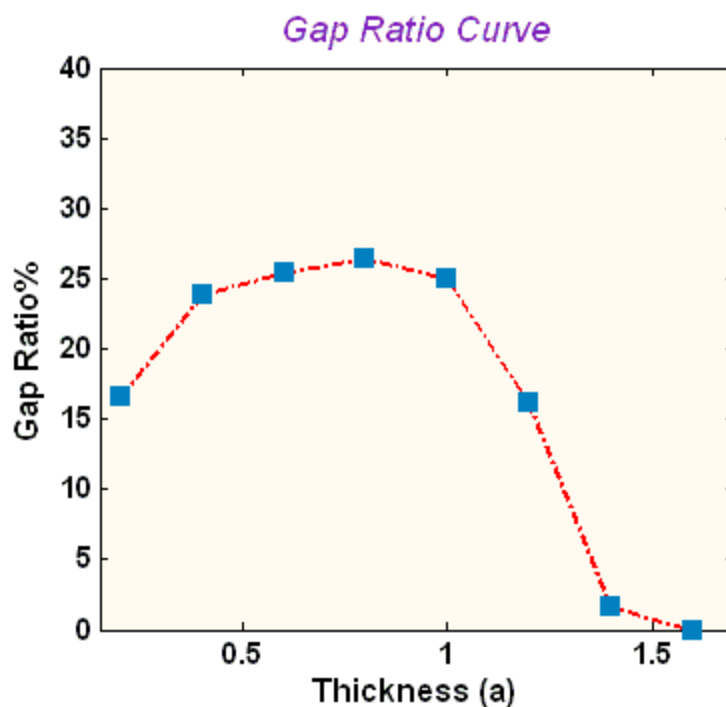
² . Light Line

³ . Guided Modes

جدول ۱-۱ چگونگی تغییر مکان لبه های گاف فوتونی نسبت به اندازه ضخامت تیغه

نسبت گاف به بسامد مرکزی	حداکثر فرکانس نوار دوم	حداکثر فرکانس نوار اول	ضخامت
16.54	0.4161	0.3525	0.2
23.89	0.3401	0.2675	0.4
25.39	0.3186	0.2468	0.6
26.41	0.3004	0.2303	0.8
25.04	0.2880	0.2239	1.0
16.17	0.2579	0.2193	1.2
1.664	0.2181	0.2145	1.4
0	0.2028	0.2119	1.6

لازم به ذکر است که این جدول با ثابت نگاه داشتن پارامترهای $r=0.3a$ و $c=0.5a$ و تقسیم واحد طول به ۱۲ قسمت بدست آمده است. همانطور که از شکل شماره ۱-۴ مشاهده میشود نسبت گاف فوتونی با افزایش ضخامت تیغه به آرامی افزایش یافته و به سمت حداکثر مقدار خود (که برابر با اندازه گاف در ساختار دوبعدی مشابه است) حرکت میکند. اما با افزایش بیشتر ضخامت به شدت افت می کند.



شکل ۱-۴ نمودار چگونگی تغییر اندازه نسبی گاف به ضخامت تیغه

علت این افت شدید، کاهش یافتن بسامد اولین مد^۱ عمودی (راستای z) و ورود نوار مربوط به آن به گاف می باشد. با توجه به این نمودار، انتخاب ضخامت تیغه در بازه $0.55a \leq d \leq a$ داشتن اندازه گافی بزرگ را تضمین خواهد کرد.

^۱ . Fundamental Mode

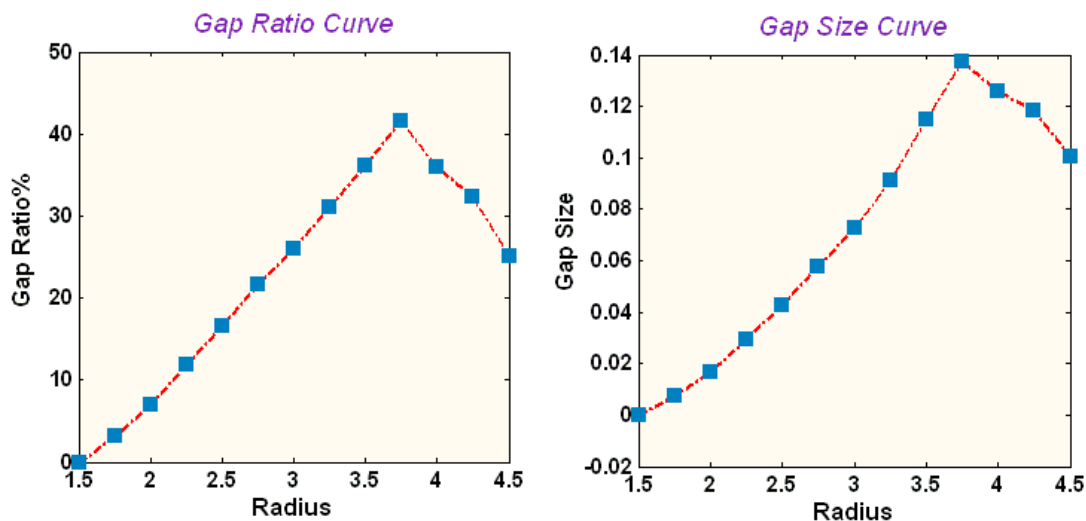
۱-۲-۳- در اندازه گاف شعاع حفره های هوا

پارامتر موثر دیگر در اندازه گاف شعاع حفره های هوا است. برای بدست آوردن نمودار مربوطه، این بار پارامتر $d=0.6a$ را ثابت نگاه داشته و علاوه بر آن واحد طول به ۲۰ قسمت افراز شده است. جدول شماره (۱-۲) همراه با شکل ۱-۵ این تغییرات را نشان میدهند.

جدول ۱-۲ چگونگی جابجایی لبه گاف نسبت به اندازه شعاع حفره های هوا

نسبت گاف به فرکانس مرکزی	حداقل فرکانس نوار دوم	حداکثر فرکانس اول	شعاع
0.0	0.2276	0.2277	0.15
3.18	0.2358	0.2284	0.175
6.92	0.2465	0.2300	2
11/92	0/2613	0/2319	2/25
16/57	0/2776	0/2351	2/5
21/60	0/2959	0/2382	2/75
25.94	0.3161	0.2435	3
30.02	0.3399	0.2486	3.25
36.17	0.3743	0.2595	3.5
41.49	0.4047	0.2674	3.75
36.04	0.4142	0.2882	4
32.39	0.4236	0.3055	4.25
25.14	0.4491	0.3488	4.5

همانطور که مشاهده میشود برای شعاع حفره ها نیز مقداری بهینه در حدود $r = 0.375a$ وجود دارد. افت نهایی اندازه گاف با افزایش شعاع به دلیل از بین رفتن تدریجی ساختار تناوبی قابل پیش بینی است.



شکل ۱-۵ نمودار چگونگی تغییر اندازه (راست) و اندازه نسبی (چپ) گاف نسبت به اندازه شعاع حفره های هوا

در هر حال انتخاب شعاع حفره ها در بازه $0.35a \leq r \leq 0.4a$ برای داشتن اندازه گاف بزرگ منطقی به نظر می رسد. حال که ساختار تیغه را مورد بررسی قرار دادیم، می توان برای طراحی کاواک اقدام نمود. بطور کلی با تغییر شعاع یکی از میله های هوا و یا پر کردن آن با ماده ای که دارای ϵ بالاتر باشد می توان یک مد جایگزیده ایجاد نمود.

۳-۱- طراحی کاواک با ضریب کیفیت نسبتاً بزرگ و حجم مد کوچک

همانطور که قبلاً اشاره شد، هدف بدست آوردن کاواکی با ضریب کیفیت بالا و حجم مد کوچک است. مشخص است که برای بدست آوردن کاواکی با ضریب کیفیت بالا یا تلفات کم باید از خارج شدن امواج الکترومغناطیسی از کاواک جلوگیری شده و آن را کاهش داد.

۳-۱-۱- تلفات و خارج شدن انرژی موج در کاواک

به طور کلی چهار عامل برای تلفات قابل تشخیص بوده و میتوان تلفات کل را به صورت زیر مدل نمود:

$$\gamma = \gamma_{\perp} + \gamma_{\parallel} + \gamma_s + \gamma_m \quad 3-1$$

که در آن γ_{\parallel} و γ_{\perp} به ترتیب نرخ تلفات و خارج شدن انرژی موج در جهات عمود بر صفحه و موازی با آن بوده و γ_s نشانگر تلفات ناشی از جذب ماده میباشد. همچنین γ_m مدل کننده تلفات ناشی از پراکندگی موج می باشد. که عموماً ناشی از نقص در فرآیند ساخت است. به طور معادل رابطه (۳-۱) را می توان بر حسب چهار ضریب کیفیت، به صورت زیر باز نویسی نمود:

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_{\perp}} + \frac{1}{Q_{\parallel}} + \frac{1}{Q_s} + \frac{1}{Q_m} \quad 4-1$$

که در آن ضرایب کیفیت به شکل زیر تعریف شده اند:

$$Q \triangleq \frac{2\omega}{\gamma}$$

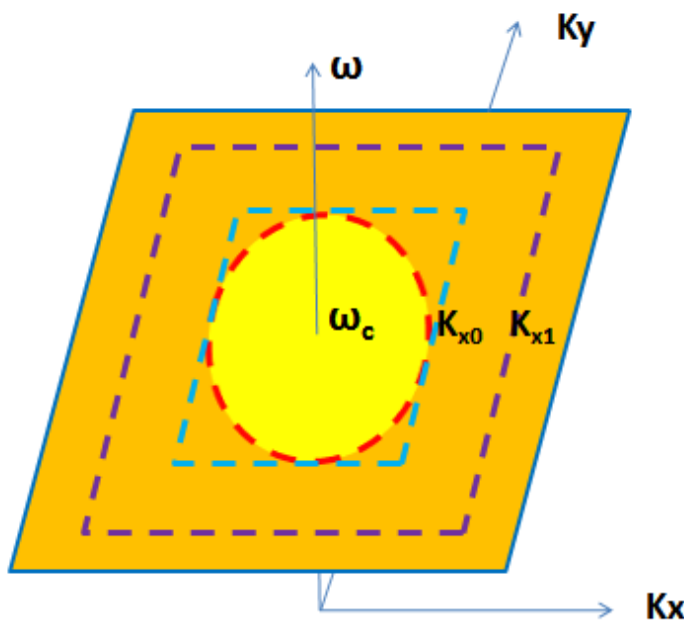
$$Q \triangleq \omega \frac{\langle E_{mode} \rangle}{\langle P \rangle} \quad 5-1$$

$$Q_M \triangleq \frac{4n\pi}{\lambda\alpha_M}$$

که در آن ω بسامد زمانی مد و $\langle E_{mode} \rangle$ و $\langle P \rangle$ به ترتیب مقدار متوسط انرژی مد و انرژی تلف شده در یک سیکل میباشد. همچنین α_M ضریب جذب اپتیکی^۱ ماده بوده n ضریب شکست ماده است. در هر صورت نوع طراحی در مقدار γ_s و γ_m نقش بزرگی نداشته و علاوه بر آن می تواند بسیار کوچکتر از دو عامل دیگر باشد. لذا ما فقط به بررسی دو عامل γ_{\parallel} و γ_{\perp} می پردازیم.

^۱ . Optical Absorbption Coefficient

با توجه به ساختار پیشنهادی بدیهی است که با افزایش تعداد حفره های هوا در صفحه تیغه، ساختار دو بعدی در صفحه به شکل ایده آل خود نزدیک شده و سبب می گردد تا موج در صفحه بطور کامل جایگزیده گردد. می توان نشان داد که با افزایش هر ردیف حفره هوا Q_{\parallel} بطور نمایی افزایش خواهد یافت. بنابراین به نظر میرسد تنها عامل محدود کننده ضریب کیفیت Q_{\perp} باشد. با توجه به ساختار نوار تیغه، وجود مخروط نور عامل تلفات در راستای Z می باشد. بنابراین به نظر می رسد که برای داشتن تلفات کم، مد مورد نظر باید دارای مولفه های کوچکی در ناحیه مخروط نور باشد.



شکل ۶-۱ مکان هندسی منحنی برخورد مخروط نور با صفحه $\omega = \omega_c$ (دایره قرمز)

بدیهی است که اگر مد مورد نظر دارای هیچ مولفه های در این ناحیه نباشد، هیچ گونه تلفاتی در جهت Z نداشته و Q_{\perp} بینهایت خواهد شد. برای اینکه دیدی شهودی از پروفایل مکانی چنین مدی پیدا کنیم، فرض کنیم مد مورد نظر دارای بسامد زمانی ω_c باشد. اگر کانتور^۱ مخروط نور را در صفحه $\omega = \omega_c$ مربعی همچون مربع آبی رنگ شکل ۶-۱ فرض نماییم، علاوه بر آن اگر خود را به موجی محدود نماییم که بسامد مکانی آن کمتر از مقدار معینی باشد، همچون مربع بنفش رنگ شکل (۶-۱) می توان دریافت که پوش پروفایل مکانی مد مورد نظر، باید در جهت x و y شبیه تابع سینک^۲ باشد.

^۱ . Contour

^۲ . Sinc