دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

گروه الکترونیک

پایاننامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته طراحی مدارات مجتمع نوری

عنوان

بررسی رفتار غیرخطی موجبرهای نوری در رژیم نور کند

استادان راهنما

دکتر علی رستمی

دکتر عبدالرحمان نامدار

استاد مشاور

دکتر رضا یدی پور

پژوهشگر

الهام رحمانی اصل

شهریور ماه ۱۳۸۹

بسم الله الرحمن الرحیم

تقدیم به

خانوادهٔ عزیزم

تقدیر و تشکر

سپاس پروردگار مهربان را که لطف و رحمت بی‌اندازه‌اش از ازل شامل حالمان بوده و هست، همواره در تاریکیها و گمگشتگی ها روشنی بخش و هدایتگر راهمان است و سختیها و دشواریها با یاد و یاریش سهل و آسان می‌گردد.

از کمکها و راهنماییهای استاد راهنمای ارجمندم آقای دکتر رستمی کمال تشکر را دارم که چگونگی راه رفتن در مسیر رسیدن به هدف را به من آموختند. همچنین جا دارد که از اساتید بزرگوار آقای دکتر عبدالرحمان نامدار و آقای دکتر یدی پور که راهنمایی و مشاوره این پایاننامه را به عهده داشتند، تقدیر و تشکر نمایم. از خانواده عزیزم، دوستانم بویژه پریسای عزیزم و نیز تمامی کسانی که به نحوی در این راه یاریگر من بوده‌اند تقدیر و تشکر می‌کنم.

نام خانوادگی دانشجو: رحمانی اصل نام: الهام

عنوان پایاننامه: رفتار غیرخطی موجبرهای نوری در رژیم نور کند

استادان راهنما: دکتر علی رستمی
دکتر عبدالرحمان نامدار
استاد مشاور: دکتر رضا یدی پور

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد رشته: مهندسی برق گرایش: طراحی مدارات مجتمع نوری
دانشگاه: تبریز دانشکده: مهندسی برق و کامپیوتر
تاریخ فارغ التحصیلی: تعداد صفحه:۱۲۱

کلید واژه ها: نور کند (Slow Light)، اثر غیرخطی کر(Nonlinear Kerr Effect)، موجبر کاواک کوپل شده (CCW)، فتونیک کریستال (PC)، روش بسط امواج تخت (PWE Method)، روش تفاضل محدود در حوزۀ زمان (FDTD Method).

چکیده:

در حالی که تکنولوژی روز دنیا به سمت تحقق سیستمهای تمام نوری پیش می‌رود اندازۀ ادوات نوری مانعی اساسی در این راه است. از سوی دیگر توسعۀ ادوات لازم برای پردازش تمام نوری سیگنال نیازمند موادی است که خواص غیرخطی قوی دارند اما بیشتر مواد، غیرخطیت ضعیفی دارند که این لازم می‌دارد که ادوات طول زیادی داشته باشند و یا برای عملکرد به توانهای نوری بسیار بالایی نیاز داشته باشند.

"ادامهٔ چکیده"

استفاده از ساختارهای نور کند راه حل مناسبی برای از بین بردن این موانع است. در این ساختارها سرعت گروه نور کاهش می‌یابد و بنابراین بر هم کنش بین ماده و میدان نوری افزایش پیدا می‌کند در نتیجه اثرات غیرخطی افزایش داده می‌شوند. همچنین کاهش سرعت نور باعث فشرده شدن موج منتشر شده در رژیم نور کند و در نتیجه افزایش شدت میدان می‌شود. بنابراین نور کند باعث کاهش قابل توجهی هم در طول و هم در توان عملیاتی ادوات می‌گردد.

در این پایان نامه هدف این است که با مورد استفاده قرار دادن موجبرهای نوری در رژیم نور کند و افزایش اثر غیرخطی Kerr در این موجبرها، سوییچی تمام نوری در ابعاد میکرومتر و با توان عملیاتی کم طراحی گردد. برای این کار ماخ زندری را که متشکل از موجبرهای کاواک کوپل شدهٔ فتونیک کریستالی است طراحی کرده‌ایم، با اعمال اثر غیرخطی Kerr در یکی از بازوهای ماخ زندر و عمل در رژیم نور کند و تنظیم طول بازوهای ماخ زندر و همین طور ویژگیهای ساختار آن، امواج انتشار یافته در دو بازوی آن با یکدیگر اختلاف فازی به اندازهٔ π پیدا می‌کنند و در نتیجه با یکدیگر تداخل ویرانگر دارند، که این همان عملکرد سوییچ است.

برای بدست آوردن ساختار باندی فتونیک کریستال و موجبر و نیز ویژگیهای ساختار، روش PWE را به کار گرفته‌ایم و عملکرد سوییچ طراحی شده را با شبیه‌سازی FDTD مورد ارزیابی قرار داده‌ایم. نهایتاً سوییچی به طول ۱۱۶ میکرومتر و با توان عملیاتی ۲۶۰ میلی وات طراحی کرده‌ایم که نتایج شبیه‌سازی صحت عملکرد این سوییچ را نشان می‌دهد این در حالی است که سوییچهای متداول نوری ابعادی در حد سانتیمتر و نیز توان عملیاتی بالاتری دارند.

مقدمه ۱

فصل اول ۲

مقدمه ای بر فتونیک کریستالها ۳

کاربرد فتونیک کریستالها ۵

انتشار نور در محیطهای پریودیک ۷

خاصیت scaling معادلات ماکسول ۱۰

شبکهٔ PC ۱۱

مفاهیم پایه ۱۱

سلول واحد ۱۱

بردارهای شبکه ۱۳

شبکهٔ معکوس ۱۴

تئوری بلوخ فلوکه ۱۷

موجبرها و رزوناتورهای فتونیک کریستالی ۱۸

کارهای انجام شده در حوزهٔ نور کند ۲۰

نور کند در محیط شفافیت القایی الکترومغناطیسی ۲۰

نور کند در نیمه هادیها ۲۲

نور کند در موجبرهای فتونیک کریستالی ۲۳

چگونه PC نور کند تولید می‌کند؟ ۲۴

نور کند دور از لبهٔ باند ۲۸

افزایش بر هم کنش های خطی ۳۰

مقایسهٔ کاواک ها و موجبرهای نور کند ۳۲
افزایش شدت ۳۲
مقایسهٔ پهنای باند ۳۵
تلفات ۳۶
کوپلینگ به رژیم نور کند ۳۹
موجبرهای کاواک کوپل شده ۴۱
تقریب تئوری پیوستگی شدید ۴۳
کوپلینگ در موجبرهای کاواک کوپل شده ۵۰
حوزهٔ غیرخطی نور ۵۱
فصل دوم ۵۶
معرفی سیستم ۵۷
روش بسط امواج تخت ۵۹
روش supercell ۶۶
سوراخها در اندازه های متفاوت ۶۹
محدودیتهای روش بسط امواج تخت ۶۹
مطالعه و بررسی ویژگیهای ساختار ۶۹
تقریب تفاضل محدود ۷۱
روش تفاضل محدود در حوزهٔ زمان ۷۱
معادلات ماکسول ۷۳
شرایط مرزی ۷۴
معادلات تجدید میدانهای مغناطیسی ۷۶
معادلات تجدید میدان الکتریکی ۷۹
معادلات تجدید میدان جابجایی ۸۰

اضافه کردن منبع ۸۱
تبدیلات فوریه ۸۳
پاشندگی عددی ۸۴

پیاده سازی ۸۵
مقدار دهی اولیه ۸۵
محاسبهٔ ضرایب تجدید ۸۶
حلقهٔ اصلی FDTD ۸۸

پیاده سازی ساختار ۹۰
ساختار مربعی ۹۵
ساختار مثلثی در راستای $\Gamma - K$ ۱۰۲
ساختار مثلثی در راستای $\Gamma - M$ ۱۰۸

نتایج و بحث ۱۱۳

پیشنهادات ۱۱۵

مراجع ۱۱۶

شکل (۱-۱)- فتونیک کریستال یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی ۳
شکل (۳-۱)- فیبر بند گپ فوتونیکی ۶
شکل (۴-۱)- خمش و اتصال Y در موجبر فتونیک کریستالی..... ۷
شکل (۵-۱)- کاربردهای فتونیک کریستال ۷
شکل (۶-۱)- نحوۀ بدست آوردن سلول واحد..... ۱۳
شکل (۷-۱)- انتخاب بردارهای شبکۀ متفاوت برای یک شبکۀ فتونیک کریستالی یکسان ۱۴
شکل (۸-۱)- نحوۀ بدست آوردن ناحیۀ بریلوییِن اول ۱۶
شکل (۹-۱)- نقص ایجاد شده در فتونیک کریستال یک بعدی..... ۱۸
شکل (۱۰-۱)- نمونه هایی از موجبرهای نقص خط..... ۱۹
شکل (۱۱-۱)- موجبرهای نقص خط ۲۰
شکل (۱۲-۱)- منحنیهای پاشندگی ۲۵
شکل (۱۳-۱)- مد کند..... ۲۷
شکل (۱۴-۱)- شباهت بین یک موجبر W1 و فتونیک کریستال یک بعدی ۲۷
شکل (۱۵-۱)- منحنی پاشندگی موجبر W1..... ۲۸
شکل (۱۶-۱)- مدیریت سرعت گروه در یک محدودۀ معین ۳۰
شکل (۱۷-۱)- افزایش حساسیت فاز در رژیم نور کند ۳۱
شکل (۱۸-۱)- اثرات گین و تلف درآینه ها که منجر به افزایش شدت در کاواک می‌شود..... ۳۳
شکل (۱۹-۱)- عبور پالس از یک موجبر نوری نور کند ۳۴
شکل (۲۱-۱)- شکل مد، مدهای موجبر فتونیک کریستالی در رژیم نور کند (c/25) و در رژیم نور تند (c/5)..... ۴۰
شکل (۲۲-۱)- مکانیزم موجبری ۴۱
شکل (۲۳-۱)- موجبرهای رزوناتور نوری کوپل شده ۴۲
شکل (۲۴-۱)- نحوۀ هدایت موج در یک موجبر کاواک کوپل شده فتونیک کریستالی ۴۳
شکل (۲۵-۱)- طیف عبور موجبرهای کاواک کوپل شده ۴۸
شکل (۲۶-۱)- طیف عبور و توزیع میدان مد یک موجبر کاواک کوپل شدۀ مستقیم..... ۴۹
شکل (۲۷-۱)- طیف عبور و توزیع میدان در یک موجبر کاواک کوپل شدۀ زیگزاگی شکل..... ۵۰
شکل (۲۸-۱)- منحنی های پاشندگی، سرعت گروه و تاخیر زمانی یک موجبر کاواک کوپل شدۀ مستقیم ۵۰
شکل (۲-۱)- سوییچ ماخ زندر فتونیک کریستالی..... ۵۹
شکل (۲-۲)- ناحیۀ بریلوییِن کاهش ناپذیر ۶۲
شکل (۳-۲)- همگرایی روش معکوس و روش HO..... ۶۶
شکل (۴-۲)- دو ترکیب سوپرسل مختلف..... ۶۷
شکل (۵-۲)- روش تصویر سازی برای بدست آوردن بردارهای موج در موجبر دارای نقص خط..... ۷۰

شکل (۶-۲)- سلول واحد شبکهٔ Yee برای سیستمهای یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی ۷۳
شکل (۷-۲)- ترکیب مدل FDTD ۷۶
شکل (۸-۲)-تکنیک اضافه کردن منبع به روش TF/SF ۸۲
شکل (۹-۲)- موجبر W2 مورد استفاده برای طراحی سوییچ ۹۲
شکل (۱۰-۲)- ساختار باندی موجبر W2 برای پلاریزاسیون TE ۹۳
شکل (۱۱-۲)- ساختار باندی تصویر شدهٔ موجبر W2 برای پلاریزاسیون TE ۹۳
شکل (۱۲-۲)- ساختار باندی شبکه فتونیک کریستال ساختار ۱ ..... ۹۶
شکل (۱۳-۲)- بخشی از موجبر کاواک کوپل شده در فتونیک کریستال مربعی با $\Lambda = 7a$ ۹۷
شکل (۱۴-۲)- ساختار باندی تصویر شده برای موجبر نشان داه شده در شکل (۱۳-۲) ۹۷
شکل (۱۵-۲)- توان دوم دامنهٔ میدان بر حسب زمان ۹۹
شکل (۱۶-۲)- ساختار باندی شبکهٔ فتونیک کریستالی ساختار ۲ ..... ۱۰۰
شکل (۱۷-۲)- ساختار باندی تصویر شده برای موجبر ساختار ۲ ..... ۱۰۱
شکل (۱۸-۲)- ساختار باندی شبکهٔ فتونیک کریستالی ساختار ۳ ..... ۱۰۲
شکل (۱۹-۲)- بخشی از موجبر کاواک کوپل شده با $\Lambda = 4a$ که در راستای $\Gamma - K$ ایجاد شده است ۱۰۳
شکل (۲۰-۲)- ساختار باندی تصویر شده برای شبکهٔ فتونیک کریستالی ساختار ۳ ..... ۱۰۴
شکل (۲۱-۲)- دامنهٔ میدان الکتریکی در داخل موجبر ساختار ۳ ..... ۱۰۵
شکل (۲۲-۲)- نمودار ساختار باندی برای شبکهٔ فتونیک کریستالی مثلثی ساختار ۴ ..... ۱۰۶
شکل (۲۳-۲)- ساختار باندی تصویر شده برای موجبر ساختار ۴ ..... ۱۰۷
شکل (۲۴-۲)- توان مرتبه دوم میدان الکتریکی موج منتشره در موجبر کاواک کوپل شدهٔ ساختار ۴ بر حسب زمان ... ۱۰۸
شکل (۲۵-۲)- ساختار باندی شبکهٔ فتونیک کریستالی ساختار ۵ ..... ۱۰۹
شکل (۲۶-۲)- ساختار باندی تصویر شده برای موجبر ساختار ۵ ..... ۱۱۰
شکل (۲۸-۲)- دامنه پالس ورودی و خروجی سوییچ در حالتی که اثر Kerr اعمال نشده است ۱۱۲
شکل (۲۹-۲)- دامنهٔ پالس ورودی و خروجی در حالتی که اثر Kerr اعمال شده است ۱۱۲

اختصارات

CCW	Coupled Cavity Waveguide
CROW	Coupled Resonator Optical Waveguide
EIT	Electromagnetically Induced Transparency
FDM	Finite Difference Method
FDTD	Finite Difference Time Domain
FFT	Fast Fourier Transform
FOM	Figure of Merit
FWHM	Full Width Half Maximum
FWM	Four Wave Mixing
MQW	Multi Quantum Well
PC	Photonic Crystal
PML	Perfectly Matched Layer
PWE	Plan Wave Expansion
QD	Quantum Dot
SHG	Second Harmonic Generation
SIT	Self Induced Transparency
SPM	Self Phase Modulation
TE	Transverse Electric
TM	Transverse Magnetic
VCSEL	Vertical Cavity Surface Emitting Laser

مقدمه

پدیده‌هایی مثل تولید هارمونی دوم، جمع و تفریق فرکانسی، بر هم کنش پارامتری نوری، تولید هارمونی سوم، متمرکز شدن خودبخودی نور، پاشندگی بریلوین تحریک شده، پاشندگی رامان تحریک شده، پدیده هایی در حوزهٔ نور غیرخطی هستند که برای اهداف تقویت، سوییچینگ، تبدیل فرکانس، مدولاسیون و کاربردهای بسیار دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین غیرخطیت، امکان پردازش تمام نوری سیگنالهای نوری را فراهم می‌کند اما کار در حوزهٔ غیرخطی مستلزم این است که سیگنالهای نوری شدتهای بسیار بالایی داشته باشند و این مشکل اساسی در حوزهٔ نور غیرخطی است. بنابراین امکان فراهم آوردن غیرخطیت در حضور میدانهای دارای شدت کم برای برطرف کردن این مشکل، زمینهٔ تحقیق جالب و قابل توجهی است. از طرف دیگر سایز المانهای نوری یک مشکل اساسی برای یکپارچه سازی سیستمهای نوری در ابعاد وسیع است، بنابراین کاهش ابعاد به مرتبهٔ میکرومتر گام مهمی در جهت ساخت مدارات مجتمع نوری به شمار می‌رود.

کاهش سرعت نور، می‌تواند راه حلی برای حل این مشکلات باشد به این ترتیب که با کاهش سرعت نور، زمان عبور نور از محیط و در نتیجه بر هم کنش نور و ماده افزایش پیدا می‌کند بنابراین اثرات غیرخطی نیز افزایش می‌یابد. یکی از روشهای کاهش سرعت نور، استفاده از ساختارهای فتونیک کریستالی است. فتونیک کریستالها ساختارهای پریودیکی هستند که پریودی از مرتبه طول موج دارند. ویژگی اساسی این ساختارها فراهم آوردن امکان کنترل نور، داشتن ابعاد کوچک و نیز تلفات کم است. درپایان نامهٔ حاضر با استفاده از ساختار فتونیک کریستالی و رژیم نورکند، اثر غیرخطی Kerr افزایش داده شده و بر این اساس سوییچی تمام نوری در ابعاد میکرومتر تحقق داده شده است که در عین حال توان عملیاتی بسیار کمی دارد.

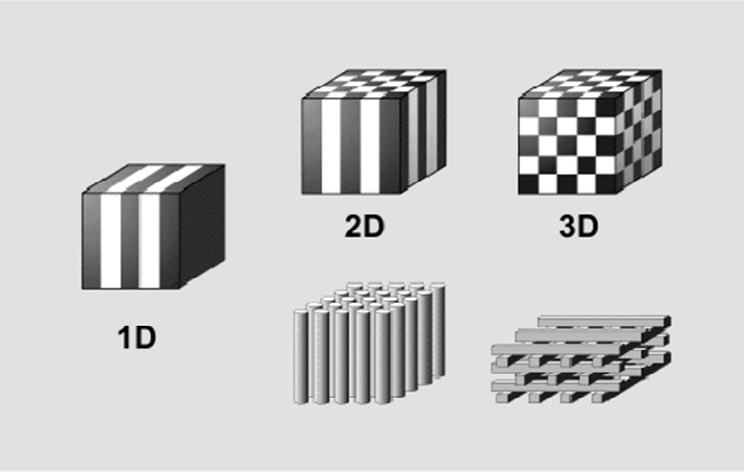
در ابتدای فصل اول پایان نامه شرح اولیه‌ای از فتونیک کریستالها که ساختار پایه و مبنای سوییچ مورد نظر را تشکیل می‌دهند، آورده شده است. سپس پیشینه‌ای از نور کند در محیط های مختلف از جمله فتونیک کریستالها بیان شده است و در ادامه موجبرهای کاواک کوپل شدهٔ فتونیک کریستالی که در این پایان‌نامه، کاهش سرعت نور به کمک آن انجام یافته است، مورد بررسی قرارگرفته‌اند. در پایان فصل اول به حوزهٔ نور غیرخطی و اثر غیرخطی Kerr پرداخته شده است. در فصل دوم ابتدا روشهایی که برای شبیه سازی ساختار مورد استفاده قرار گرفته‌اند شرح داده شده‌اند که دو روش PWE و FDTD هستند. سپس روند طراحی و ساختارهای انتخاب شده برای پیاده سازی سوییچ مورد نظر آورده شده‌اند.

فصل اول

بررسی منابع

مقدمه‌ای بر فتونیک کریستالها

فتونیک کریستالها دستهٔ جدیدی از محیطهای نوری هستند که یا بصورت ساختارهای طبیعی موجود هستند و یا بصورت مصنوعی ساخته می‌شوند و تغییرات پریودیکی از ضریب شکست دارند. این محیط ها ویژگیهای بخصوصی دارند که زمینهٔ کاربردهای بسیاری را بر مبنای آنها فراهم آورده است. بسته به هندسهٔ ساختارشان، فتونیک کریستالها به سه دستهٔ یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی تقسیم می‌شوند. در فتونیک کریستالهای یک بعدی، تغییرات پریودیک ضریب دی‌الکتریک فقط در یک جهت اتفاق می‌افتد و ساختار در دو جهت دیگر یکنواخت است.



شکل (۱-۱)- فتونیک کریستال یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی.

مثالی از این نوع PC، ساختار برگ گریتینگ[1] است که به طور وسیعی به عنوان آینه‌های توزیع شده[2] در لیزرهای VCSEL استفاده می‌شوند بعلاوه چنین ساختارهایی به عنوان پوشش های ضد بازتابش[3] که بازتابش سطوح را به مقدار زیادی کاهش می‌دهند نیز استفاده می‌شوند که در بهبود کیفیت لنزها، منشورها و دیگر ادوات نوری مؤثرند. فتونیک کریستالهای دو بعدی می‌توانند ساختارهای متنوع نسبتاً زیادی داشته باشند چون در دو راستا تغییرات پریودیک ضریب دی‌الکتریک دارند و محیط در جهت سوم یکنواخت است. فتونیک کریستالهای دو بعدی را در طبیعت نیز می‌توان یافت به عنوان مثال نقشهای روی بال پروانه و رنگین کمان آن به علت انعکاس نور در اثر برخورد به ساختار فتونیک کریستالی است که روی

[1] Bragg Grating
[2] Distributed reflector
[3] Antireflecting coating

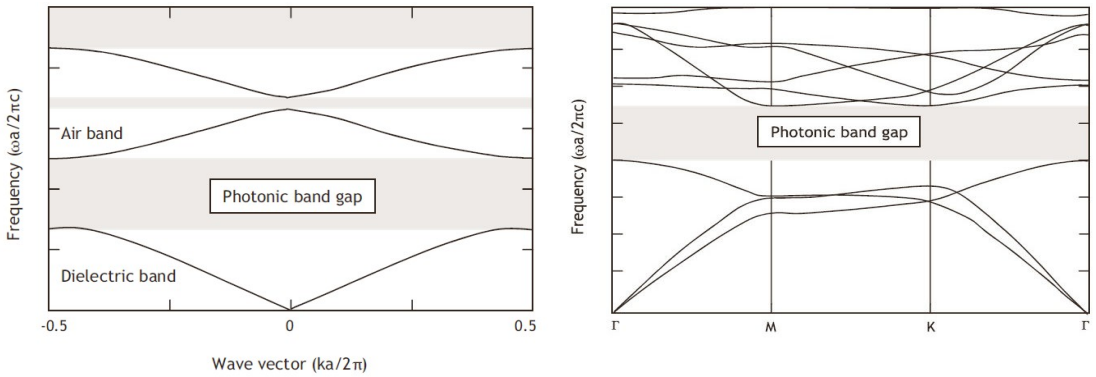
بال پروانه وجود دارد. در فتونیک کریستالهای سه بعدی ضریب دی‌الکتریک در هر سه جهت تغییرات پریودیک دارد و به همین علت تنوع ساختار در PC سه بعدی بسیار بیشتر از PC یک بعدی و دو بعدی است. ویژگیهای فتونیک کریستالها به علت وجود تغییرات پریودیک ضریب دی‌الکتریک یا ضریب شکست محیط است و توسط این تغییرات ویژگیهایشان تعیین می‌شود به همین علت اثرات مشاهده شده در PC شباهت بسیار زیادی به فیزیک حالت جامد یعنی ساختارهای پریودیک اتمها در شبکهٔ کریستالی دارد. شباهت بین فیزیک PC و فیزیک حالت جامد این امکان را بوجود می‌آورد که شباهت بین برخی از ویژگیها و روشهای محاسباتی موجود در فیزیک PC و حالت جامد را دریافته و مورد استفاده قرار دهیم. مهمترین شباهتی که وجود دارد به این ترتیب است که تغییرات پریودیک ضریب شکست در PC، شبکه-ای مشابه شبکهٔ اتمی حالت جامد بوجود می‌آورد. رفتار فوتونها در PC مانند رفتار الکترون و حفره در یک شبکهٔ اتمی است، به علت وجود تناوب، هم PC و هم شبکهٔ کریستالی حالت جامد گاف باندی دارند که این گاف باندی محدوده‌ای از انرژیها است که در این محدوده ذره نمی‌تواند وارد ساختار شود. از نظر تئوری تعیین توابع ویژه در PC خیلی شبیه محاسبهٔ توابع موج ذره‌ای در فیزیک حالت جامد است. از این شباهت برای بدست آوردن ساختار باندی فتونیکی استفاده می‌شود. اما در کنار شباهت های بسیار، برخی تفاوتهای اساسی نیز وجود دارد. یکی از مهمترین تفاوتها توزیع انرژی ذره است، الکترونها از توزیع فرمی دیراک تبعیت می‌کنند ولی فوتونها از توزیع بوس انیشتین. بعلاوه الکترونها تحت تأثیر میدان داخل کریستال قرار می‌گیرند که این منجر می‌شود به اینکه میدان داخل کریستال در محاسبات گنجانده شود ولی فوتونها تحت تأثیر این میدان نیستند و بنابراین محاسبهٔ توزیع میدان نوری یا ساختار باندی فوتونیکی ساده است. ویژگی اصلی فتونیک کریستالها این است که یک گاف باندی کامل برای رنج خاصی از فرکانسها و پلاریزاسیونها دارند وجود این گاف باندی امکان کنترل کامل تابش و انتشار نور را فراهم می‌آورد. تغییرات پریودیک ضریب شکست، اثرات پاشندگی برگ[1] متعددی بوجود می‌آورد که وقتی طول موج نور تابیده شده به ساختار PC با پریود ساختار قابل مقایسه باشد امواجی که دچار پراکندگی[2] شده‌اند بصورت ویرانگر یا سازنده با هم تداخل می‌کنند بطوری که الگوی پاشندگی ویژه‌ای بوجود می‌آورند که در فرکانسهای معینی از انتشار نور جلوگیری می‌کند که این همان گاف باندی است که در فتونیک کریستالها وجود دارد [۱].

[1] Bragg
[2] Scattering

کاربرد فتونیک کریستالها

بیشتر کاربردهای PC از پدیدهٔ گاف باندی فتونیکی استفاده می‌کنند. از وجود گافهای باندی برای طراحی بازتابنده‌های دی‌الکتریک کم تلف استفاده می‌شود که می‌توانند نور را در کانال ها (موجبرها) یا نقص هایی (رزوناتورها) که در PC ایجاد می‌شوند و در ابعادی قابل مقایسه با طول موج نور هستند، هدایت یا حبس کنند.

امروزه مواد طبیعی که بیشترین استفاده را برای بازتاباندن امواج الکترو مغناطیسی دارند فلزات هستند. در رژیم مایکروویو ($\lambda\sim1\text{cm}$) بیشتر فلزات بازتابش بالایی دارند و نیز تلفات جذب کمی دارند اما در محدودهٔ نور مرئی ($\lambda\sim400\text{nm-}800\text{nm}$) و مادون قرمز ($\lambda\sim800\text{nm-}20\mu\text{m}$) تلفاتی حدود ۲۰٪-۱۰٪ دارند بنابراین در این محدوده قابلیت استفادهٔ کمی دارند. فتونیک کریستالها در تحقق محیط هایی با بازتابش قوی و زیاد و در عین حال کم تلف در نواحی مادون قرمز و مرئی انعطاف بی نظیری دارند که توسط تغییر هندسهٔ آنها می‌توان محل طیف عملکرد PC را طراحی کرد.



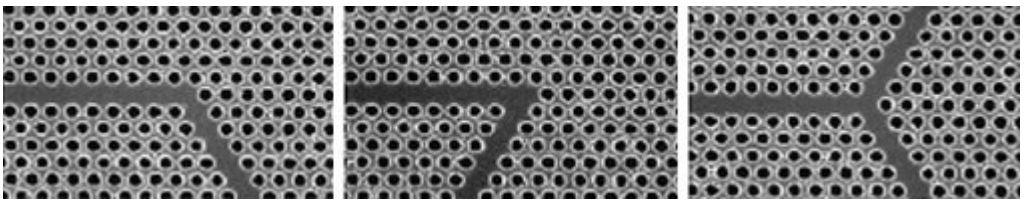
شکل(۲-۱)- گاف باندی فوتونیکی؛ راست: گاف باندی فوتونیکی برای فتونیک کریستال دو بعدی؛ چپ: گاف باندی فتونیکی برای فتونیک کریستال یک بعدی.

فتونیک کریستالها قابلیت بازتاباندن نور را در تمام زوایای تابش و در تمام پلاریزاسیونها دارند و طول موج بازتابش نیز قابل طراحی است. همچنین از فتونیک کریستالها برای هدایت در داخل یک هسته با ضریب شکست پایین استفاده می‌شود و برای این کار باید یک انعکاس دهندهٔ PC طراحی کنیم که برای یک زاویه انتشار ویژه، کارآمد باشد یا از انعکاس دهندهٔ فتونیک کریستالی دو بعدی استفاده کنیم که به عنوان مثال از آرایه‌ای از سوراخهای هوایی که در داخل غلاف یک فیبر نوری ایجاد شده‌اند، ساخته شده باشد. چنین فیبری، فیبر فتونیک بند گپ نامیده می‌شود و از شیشه سیلیکا ساخته می‌شود.

شکل (۳-۱)- فیبر بند گپ فوتونیکی.

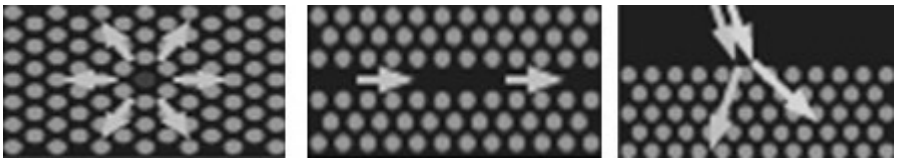
یکی از کاربردهای موجبرهای PC استفاده از آنها برای اتصال المانها در مدارات مجتمع نوری است. درحالت کلی با خم کردن موجبر می‌توان راستای تابش نور را از راستای انتشار اولیهٔ آن تغییر داد اما با کاهش شعاع خمش، تلفات تابشی از موجبر به مقدار زیادی افزایش می‌یابد. اگر موجبرهای PC در مدارات مجتمع نوری مورد استفاده قرار بگیرند استفاده از المانهای فشرده‌ای که نور را هدایت می‌کنند

مثل خمش ها و اتصالاتی به شکل T وY و غیره اجتناب ناپذیر است و این المانها باید تا حد امکان کم تلف باشند. خمش ها و اتصالات می‌توانند با تعریف و تغییر توپولوژی ساختار طوری بهینه سازی شوند که هیچ تلف تابش و هیچ انعکاسی در جهت عکس انتشار نداشته باشند.



شکل (۴-۱)- خمش و اتصال Y در موجبر فتونیک کریستالی؛راست: اتصال Y؛وسط:خمش؛ چپ: خمش.

کاربرد مهم دیگر فتونیک کریستالها استفاده از آنها به عنوان یک محیط حبس کنندهٔ نور برای میکرو-کاواک های فتونیکی است. میکروکاواک ها، المان های اساسی برای ادوات نوری مختلف مثل فیلترهای طول موج، مالتی پلکسرها و لیزرها هستند اگر در داخل میکروکاواک یک محیط گین قرار داده شود می-تواند به عنوان کاواک لیزر استفاده شود که منجر به بوجود آمدن لیزرهایی کم حجم با قابلیت تنظیم جهت تابش می‌شود که به آسانی قابلیت یکپارچه شدن را با دیگر المانهای PC تخت دارند. کاربردهای بسیار متنوع دیگر از جمله خطوط تاخیر نوری فشرده، حافظهٔ نوری را نیز می‌توان برای فتونیک کریستالها نام برد.



شکل (۵-۱)- کاربردهای فتونیک کریستال؛ راست: لنز؛ وسط: موجبر؛ چپ: کاواک فتونیک کریستالی.

انتشار نور در محیطهای پریودیک

برای درک چگونگی رفتار نور در فتونیک کریستالها نیاز به مطالعهٔ انتشار نور در محیط های پریودیک داریم که در ادامه به این موضوع می‌پردازیم.

الکترومغناطیس در ابعاد ماکروسکوپیک و از جمله انتشار نور در داخل PC توسط چهار معادلهٔ ماکسول[1] توصیف می‌شود. این معادلات در واحد SI برابر است با

$$\nabla . \mathrm{B} = 0 \qquad (۱-۱)$$

$$\nabla \times \mathrm{E} + \frac{\partial \mathrm{B}}{\partial \mathrm{t}} = 0 \qquad (۱-۲)$$

$$\nabla . \mathrm{D} = \rho \qquad (۱-۳)$$

$$\nabla \times \mathrm{H} - \frac{\partial \mathrm{D}}{\partial \mathrm{t}} = \mathrm{J} \qquad (۱-۴)$$

که E و B مقادیر متوسط میدان الکتریکی و القای مغناطیسی برای حالتی هستند که معادلات ماکروسکوپیک ماکسول در خلاء در نظر گرفته شود. برای محیط دی‌الکتریک همگن رابطهٔ بین مقادیر ماکروسکوپیک یعنی جابجایی D و میدان مغناطیسی H و مقادیر میکروسکوپیک E و B با معادلات زیر داده می‌شود:

$$\mathrm{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \mathrm{E}\,,\ \varepsilon = 1 + \chi_\mathrm{e} \qquad (۱-۵)$$

$$\mathrm{H} = \frac{1}{\mu_0}\frac{1}{\mu}\mathrm{B}\,, \mu = 1 + \chi_\mathrm{m} \qquad (۱-۶)$$

ε و μ به ترتیب ثابت دی‌الکتریک نسبی و حساسیت مغناطیسی نسبی هستند. فرض می‌شود میدانها ضعیف باشند و از نظر زمانی و مکانی تغییرات خیلی سریعی نداشته باشند و بنابراین می‌توانیم این ساده-سازیها را داشته باشیم که بارهای آزاد(ρ) یا جریانهای آزاد (J) قابل اغماض هستند، همچنین نیروهای میدانها به اندازهٔ کافی کوچک هستند که در رژیم خطی در نظر گرفته شوند و ماده، ماکروسکوپیک و همسانگرد[2] است یعنی ثابت دی‌الکتریک $\varepsilon(\mathrm{r})$ اسکالر است، حساسیت مغناطیسی نیز تقریباً برابر ۱ است $(\mu_\mathrm{r} \approx 1)$ و بالاخره اینکه فقط دی‌الکتریک هایی که بدون تلف هستند یعنی $\varepsilon(\mathrm{r})$ در آنها، یک کمیت اسکالر حقیقی است، در نظر گرفته می‌شوند با این فرضیات خواهیم داشت:

$$\mathrm{D}(\mathrm{r}) = \varepsilon_0 \varepsilon(\mathrm{r}) \mathrm{E}(\mathrm{r})$$

$$\mathrm{B}(\mathrm{r}) = \mu_0 \mathrm{H}(\mathrm{r})$$

[1] Maxwell
[2] Isotropic