

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



گروه مهندسی اپتیک - لیزر

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک گرایش اتمی - مولکولی

عنوان پایان نامه:

طراحی فیلترهای تمام نوری با استفاده از بلورهای فوتونی یک بعدی

اساتید راهنما:

دکتر کاظم جمشیدی قلعه

دکتر حسین لطفی

استاد مشاور:

مهندس مهدی آس

پژوهشگر:

زهرا بهمه ء

بهمن ماه ۱۳۹۰

نام خانوادگی دانشجو: بهمهء

نام: زهرا

عنوان پایان نامه: طراحی فیلترهای تمام نوری با استفاده از بلورهای فوتونی یک بعدی

اساتید راهنما: دکتر حسین لطفی و دکتر کاظم جمشیدی قلعه

استاد مشاور: مهندس مهدی آس

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد رشته: فیزیک اتمی و مولکولی گرایش: اپتیک و لیزر
دانشگاه: بناب تاریخ فارغ التحصیلی: ۱۳۹۰/۱۲/۱۷ تعداد صفحه: ۹۲

کلید واژه ها: بلور فوتونی، فیلتر چند کاناله، فیلتر تمام نوری، بلور فوتونی شبه متناوب، مد نقص، فرامواد مواد ناهمسانگرد، فیلتر تمام سویه، گاف باند،

چکیده:

مدارات مجتمع و سیستم های تمام نوری یکی از زمینه های جذاب برای محققین بخش پردازش سیگنال با سرعت بالا شده است، بطوریکه یکی از مهمترین بلوک های پایه در این بخش، بلوک فیلترینگ می باشد. در این پایان نامه فیلترهای تمام نوری با سه ساختار متداول: ساختار متناوب شامل یک لایه نقص، شبه متناوب تیو-مورس و فیوناجی بررسی شده است. اثر زاویه تابش و قطبش میدان فرودی روی عملکرد فیلتری هر کدام از ساختارها در طول موج تشدید متناظر خود بررسی و مقایسه شده و ساختاری که بهترین کارایی (فیلتر باریک گذر با شدت انتقال نزدیک به واحد) را از خود نشان می دهد معرفی شده است. در ادامه یک ساختار بلور فوتونی یک بعدی متناوب که لایه های آن از مواد چپگرد ناهمسانگرد و راستگرد همسانگرد انتخاب شده، مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. اثر قطبش و زاویه تابش میدان فرودی، همچنین اثر افزایش زاویه بین محور نوری ماده ناهمسانگرد با راستای تناوب بررسی شده است. نتایج نشان می دهد با تنظیم زاویه تابش میدان فرودی و زاویه بین محور نوری ماده ناهمسانگرد با راستای تناوب در نواحی فرکانسی معین ساختار به عنوان فیلتر چند کاناله و فیلتر با باند ممنوع عمل می کند و به یک ساختار با خواص فیلتری قابل کنترل دست یافتیم.

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

چکیده

فصل اول؛ مقدمه و پیشینه

مقدمه..... ۲

Error! Bookmark not defined...... (۱-۱) فیلتر چیست.....

بلورهای یونی..... (۲-۱) ۴

بلورهای فوتونی..... (۳-۱) ۵

بلورهای فوتونی شبهمتناوب (۴-۱) ۷

فرامواد..... (۵-۱) ۷

مد نقص..... (۶-۱) ۱۰

ماتریس انتقال و ضرایب انتقال و انعکاس از یک لایه..... (۷-۱) ۱۱

انواع گاف باند..... (۸-۱) ۱۶

گاف باند براگ..... (۱-۸-۱) ۱۶

گاف باند ضریب شکست میانگین صفر..... (۲-۸-۱) ۱۷

گاف باند گذردهی الکتریکی و تراوایی مغناطیسی میانگین صفر..... (۳-۸-۱) ۱۷

گاف باند با فاز مؤثر صفر..... (۴-۸-۱) ۱۷

- ۱۸-۸-۵) گاف باند زاویه‌ای..... ۱۸
- ۱۹-۹) مواد همسانگرد..... ۱۹
- ۱۰-۱) مواد ناهمسانگرد..... ۱۹
- ۱۱-۱) لزوم استفاده از بلورهای فوتونی در صنعت ارتباطات..... ۲۰

فصل دوم: مبانی و روشها

- مقدمه..... ۲۴
- ۱-۲) فیلترهای چند کاناله..... ۲۵
- ۱-۲-۱) شرط ایجاد مدهای رزونانس به عنوان کانال‌های فیلتری..... ۲۵
- ۱-۲-۲) اثر تعداد تناوب بر روی کانال‌های فیلتر..... ۲۶
- ۱-۲-۳) اثر تغییر ضخامت لایه‌ها روی کانال‌های فیلتری و گاف باندها..... ۲۸
- ۱-۲-۴) وابستگی فاکتور کیفیت فیلتر به ضخامت لایه‌های ساختار..... ۲۹
- ۱-۲-۵) اثر تغییر زاویه تابش بر روی کانال‌های فیلتری..... ۲۹
- ۲-۲) فیلترهای تنظیم پذیر با ساختار تیو-مورس..... ۳۰
- ۱-۲-۲) اثر تغییر مرتبه ساختار فیلتری روی گاف باند ممنوع..... ۳۱
- ۲-۲-۲) اثر قطبش نور تابشی روی لبه‌های باند انعکاسی و مدهای رزونانس..... ۳۳
- ۲-۲-۳) تبدیل باند انعکاسی به باند انتقالی با انتخاب پارامترهای مناسب..... ۳۴
- ۲-۲-۴) اثر افزایش ضخامت لایه‌ها روی باند انتقالی (گذر) تمام سویه..... ۳۵
- ۳-۲) فیلترهای پایین گذر و مستقل از قطبش..... ۳۶

- ۳۷.....(۱-۳-۲) اثر زاویه تابش و قطبش میدان تابشی روی عملکرد فیلتر با انتخاب لایه نقص بهینه.....
- ۳۹.....(۲-۳-۲) بهینه‌سازی ضخامت لایه نقص و تحقق فیلتر فضایی مستقل از قطبش.....
- ۴۰.....(۳-۳-۲) تأثیر تعداد تناوب روی پهنای باند فضایی فیلتر.....
- ۴۲.....(۴-۳-۲) توزیع فضایی فیلتر.....
- ۴۳.....(۵-۳-۲) تأثیر اتلاف روی کانال فیلتری.....
- ۴۴.....(۴-۲) فیلترهای با باند ممنوع تمام سوبه.....
- ۴۵.....(۱-۴-۲) رابطه پاشندگی برای مد TE.....
- ۴۶.....(۲-۴-۲) رابطه پاشندگی برای مد TM.....
- ۴۷.....(۳-۴-۲) تئوری محیط مؤثر.....
- ۴۹.....(۴-۴-۲) اثر تغییر زاویه تابش میدان و ضخامت لایه‌ها روی باند انعکاسی برای قطبش TE.....
- ۵۳.....(۵-۴-۲) اثر تغییر زاویه تابش میدان و ضخامت لایه‌ها روی باند انعکاسی برای قطبش TM.....
- ۵۶.....(۵-۲) فیلتر تک کاناله.....
- ۵۶.....(۱-۵-۲) ماتریس انتقال ساختار نامتجانس متشکل از مواد دی‌الکتریکی و مغناطیسی.....
- ۵۸.....(۲-۵-۲) الگوریتم ژنتیک اعشاری.....
- ۶۱.....(۳-۵-۲) نتایج محاسبات.....

فصل سوم: بحث و نتیجه‌گیری

- ۶۳.....مقدمه.....
- ۶۴.....(۱-۳) مقایسه عملکرد فیلتری در چند ساختار بلور فوتونی یک بعدی.....

۳-۱-۱) ساختار متناوب با لایه نقص ۶۶

۳-۱-۲) ساختار فیوناچی..... ۶۷

۳-۱-۳) ساختار تیو-مورس..... ۶۹

۳-۱-۴) اثر زاویه تابش و قطبش میدان روی مد ساختار متناوب با لایه نقص از مواد دی الکتریک..... ۷۱

۳-۱-۵) اثر زاویه تابش و قطبش میدان روی مد ساختار تیومورس از مواد دی الکتریک..... ۷۲

۳-۱-۶) اثر زاویه تابش و قطبش میدان روی مد ساختار تیومورس از مواد تک منفی..... ۷۲

۳-۱-۷) مقایسه سه ساختار مورد بررسی از لحاظ تعداد تناوب و ضخامت کل..... ۷۳

۳-۲) فیلتر تمام نوری با لایه‌هایی از مواد ناهمسانگرد چپ گرد..... ۷۴

۳-۲-۱) اثر زاویه تابش روی عملکرد ساختار فیلتری درحالتی که زاویه بین محور نوری با راستای تناوب

$\varphi = 0^\circ$ است..... ۷۶

۳-۲-۲) اثر افزایش زاویه بین محور نوری با راستای تناوب روی عملکرد ساختار فیلتری..... ۷۹

نتیجه‌گیری..... ۸۳

پیشنهادات..... ۸۴

مراجع..... ۸۵

- شکل (۱-۱): شماتیکی از بلور یونی..... ۵
- شکل (۲-۱): تصاویری از بلورهای فوتونی (الف) یک‌بعدی، (ب) دوبعدی؛ (ج) سه‌بعدی..... ۶
- شکل (۳-۱): طبقه‌بندی مواد بر اساس خواص الکترومغناطیسی..... ۸
- شکل (۴-۱): شماتیکی از جهت‌های میدان الکتریکی و مغناطیسی، بردار موج و پوینتینگ (a) محیط دست راست، (b) محیط دست چپ..... ۹
- شکل (۵-۱): انتشار موج از محیط دست راست به دست چپ (a)، انتشار نور از محیط دست راست به محیط دست راست (b)..... ۱۰
- شکل (۶-۱): بازتاب و انتقال امواج از یک لایه با ضخامت d و ضریب شکست n_1 ۱۱
- شکل (۱-۲): طیف انتقالی ساختار متناوب $(AB)^m$ برای مقادیر مختلف $m=2,3,4,5$ ۲۷
- شکل (۲-۲): طیف انتقالی ساختار متناوب $(AB)^4$ ، ضخامت لایه A ثابت و $d_B=10,20,30,40,50\text{mm}$ ۲۸
- شکل (۳-۲): گاف باندها و مدهای رزونانس ساختار $(AB)^4$ با ضخامت‌های مختلف d_B و ضخامت ثابت d_A ۲۹
- شکل (۴-۲): گاف باندها و مدهای رزونانس ساختار $(AB)^4$ در زوایای تابش مختلف..... ۳۰
- شکل (۵-۲): طیف انعکاسی در زاویه‌ی تابش عمود برای مرتبه‌های مختلف ساختار $T-M$ ۳۲
- شکل (۶-۲): منحنی دامنه میانگین گذردهی الکتریکی و میانگین تراوایی مغناطیسی بر حسب فرکانس زاویه-ای..... ۳۳
- شکل (۷-۲): وابستگی طیف انعکاسی به قطبش‌های TE و TM برای ساختار $T-M$ از مرتبه‌ی پنجم (S_5)..... ۳۴

شکل(۲-۸): طیف انتقالی برای موج تخت در تابش عمود برای مراتب پایین ساختار T-M با ضخامت

۳۴..... $d_A = d_B$

شکل(۲-۹): وابستگی طیف انتقالی ساختار T-M، S_4 به ضخامت d_A و d_B ۳۵

شکل(۲-۱۰): طیف انتقالی برای ساختار S_2 با ضخامت‌های $d_A = d_B = 20, 25, 30mm$ ۳۵

شکل(۲-۱۱): طیف شماتیکی از ساختار 1DPC با لایه نقص $(AB)^N C(BA)^N$ ۳۷

شکل(۲-۱۲): طیف انتقالی ساختار $(AB)^N C(BA)^N$ به ضخامت $d_C = 36mm$ در زاویه های تابش مختلف. ۳۷

شکل(۲-۱۳): طیف انتقالی ساختار $(AB)^N C(BA)^N$ به ضخامت $d_C = 90mm$ در زاویه های تابش مختلف. ۳۸

شکل(۲-۱۴): انحراف نسبی $(v_{TE} - v_{TM})/v_{TM}$ بر حسب تابعی از زاویه تابش با $d_C = 36, 70, 90, 110mm$ ۳۹

شکل(۲-۱۵): مقایسه انتقال فیلترهای فضایی مبتنی بر مدهای نقص وابسته به قطبش و مستقل از قطبش ۴۰

شکل(۲-۱۶): انتقال بر حسب زاویه تابش برای فیلترهای فضایی پایین گذر با تعداد تناوب مختلف..... ۴۱

شکل(۲-۱۷): توزیع فضایی میدان فیلترهای فضایی $(AB)^8 C(BA)^8$ در زوایای تابش $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ ۴۲

شکل(۲-۱۸): انتقال بر حسب زاویه تابش برای فیلتر فضایی $(AB)^8 C(BA)^8$ با فاکتور میرایی مختلف..... ۴۴

شکل(۲-۱۹): ساختار لایه‌ای یک بعدی، لایه‌های A محیط ناهمسانگرد و لایه‌های B محیط همسانگرد می-

باشند..... ۴۵

شکل(۲-۲۰): پاسخ معادله (۲-۲۵) در زاویه‌های تابش مختلف برای قطبش TE، $m = 0, -1, -2$ ۵۰

شکل(۲-۲۱): طیف انتقالی برای نمونه اول ساختار با لایه ناهمسانگرد برای موج TE در زوایای تابش

مختلف..... ۵۱

شکل(۲-۲۲): طیف انتقالی برای نمونه دوم ساختار با لایه ناهمسانگرد برای موج TE در زوایای تابش

مختلف.....۵۲

شکل(۲-۲۳): طیف انتقالی ساختار با لایه ناهمسانگرد برای موج TE با ضخامت های مختلف.....۵۳

شکل(۲-۲۴): پاسخ معادله (۲-۲۵) در زاویه های تابش مختلف برای قطبش TM، $m=0, -1, -2$۵۳

شکل(۲-۲۵): طیف انتقالی ساختار با لایه ناهمسانگرد برای نمونه اول موج TM در زوایای تابش مختلف.....۵۴

شکل(۲-۲۶): طیف انتقالی ساختار با لایه ناهمسانگرد برای نمونه دوم موج TM در زوایای تابش مختلف.....۵۴

شکل(۲-۲۷): همانند شکل (۲-۲۴) برای نمونه TM رسم شده است.....۵۶

شکل(۲-۲۸): شماتیکی از فیلتر با ساختار نامتجانس $(\alpha_1 A, \alpha_2 B)^P (\beta_2 B, \beta_1 A)^P$۵۷

شکل(۲-۲۹): طیف انتقالی ساختار $(.2878A, .2955B)^{14} (.191A, .201B)^{14}$ ، در زاویه های تابش مختلف.....۶۰

شکل(۲-۳۰): طیف انتقالی ساختار $(.2878A, .2955B)^{14} (.191A, .201B)^{14}$ ، در زاویه تابش عمود.....۶۱

شکل(۳-۱): طیف تراگسیل ساختار $(AB)^8 D(AB)^8$ ، (a) لایه های SNG و (b) DPS هستند.....۶۶

شکل(۳-۲): شماتیکی از ساختار مراتب پایین ساختار فیبوناچی.....۶۷

شکل(۳-۳): طیف تراگسیل برای ساختار فیبوناچی مرتبه $n=8$ ، (a) لایه های SNG و (b) DPS هستند.....۶۸

شکل(۳-۴): شماتیکی از ساختار مراتب پایین ساختار تیو-مورس.....۶۹

شکل(۳-۵): طیف تراگسیل برای ساختار تیومورس مرتبه پنجم، (a) لایه های SNG و (b) DPS هستند.....۷۰

شکل(۳-۶): رفتار مد تشدیدی در ساختار متناوب شامل یک لایه نقص با زاویه تابش برای قطبش TE و

.....۷۱ TM

شکل (۷-۳): رفتار مد تشدیدی حول فرکانس $1.5 \times 10^{15} \text{ Hz}$ هرتز در ساختار تیو- مورس با افزایش زاویه

تابش ۷۲

شکل (۸-۳): رفتار مد تشدیدی در ساختار تیو- مورس وقتی که جنس لایه‌ها از مواد تک منفی هستند..... ۷۳

شکل (۹-۳): ساختار لایه‌ای یک بعدی، لایه‌های A محیط ناهمسانگرد و لایه‌های B محیط همسانگرد می-

باشند ۷۴

شکل (۱۰-۳): طیف تراگسیل ساختار $(AB)^{60}$ با زاویه ثابت $\varphi = 0^\circ$ و $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 85^\circ$ در حالت TE..... ۷۷

شکل (۱۱-۳): طیف تراگسیل ساختار $(AB)^{60}$ با زاویه ثابت $\varphi = 0^\circ$ و $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 85^\circ$ در حالت TM..... ۷۸

شکل (۱۲-۳): طیف تراگسیل ساختار $(AB)^{60}$ با زاویه ثابت $\theta = 0^\circ$ و $\varphi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 85^\circ$ در حالت TE..... ۷۹

شکل (۱۳-۳): طیف تراگسیل ساختار $(AB)^{60}$ با زاویه ثابت $\theta = 85^\circ$ و $\varphi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 85^\circ$ در حالت TM..... ۸۰

شکل (۱۴-۳): طیف تراگسیل ساختار $(AB)^{60}$ با زاویه ثابت $\theta = 85^\circ$ و $\varphi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 85^\circ$ در حالت TE..... ۸۱

شکل (۱۵-۳): طیف تراگسیل ساختار $(AB)^{60}$ با زاویه ثابت $\theta = 85^\circ$ و $\varphi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 85^\circ$ در حالت TM... ۸۲

فصل اول

مقدمه و پیشینه

مقدمه

در دو دهه گذشته مرز جدیدی با هدف کنترل بشر بر خواص مواد، پدید آمده است که کنترل خواص اپتیکی مواد را برعهده دارد. اگر بتوانیم مواد را طوری مهندسی کنیم که نور منتشر نشود یا فقط در جهت‌های معینی منتشر شود و یا در نواحی ویژه‌ای جایگزیده گردد در واقع به طراحی فیلترهای نوری پرداخته‌ایم. هر وسیله اپتیکی که در ابزارهای ارتباطی امروزی استفاده می‌شود، دارای یک فیلتر است. این وسیله، می‌تواند درایو نوری موجود در لپ تاپ شما باشد یا کابلی که ارتباط تلفنی را از راه دور میسر می‌سازد. هر سیستم ارتباطی نیازمند فیلترهایی است تا سیگنال را تصفیه کرده و پیغام‌های متفاوت را تفسیر کند. با پیدایش و اختراع لیزر و فیبرنوری، صنعت مخابرات به طور جدی متحول شد و مخابرات نوری بوجود آمد. مخابرات نوری عبارت است از هر فرم انتقال اطلاعات که در آن نور واسط انتقال داده‌ها باشد. کانال چنین ارتباطی می‌تواند فضای آزاد، هوا یا فیبرنوری باشد. در مخابرات نوری هنوز از سیستم‌های الکترونیکی استفاده می‌شود که این سیستم‌ها سرعت پردازش و مسیردهی اطلاعات را پایین می‌آورد. حل این مشکل با تمام نوری کردن تمام ادوات به کار رفته در این مدارات ممکن است. به همین دلیل امروزه یکی از جبهه‌های پررونق در علم فوتونیک ساخت جایگزین‌های این ادوات الکترونیکی به صورت نوری می‌باشد. بلورهای فوتونی ساختارهایی هستند که برای طراحی آسان این نوع ادوات مورد استفاده قرار می‌گیرند.

بلورهای فوتونی مفهوم جدیدی در دانش مدرن می‌باشند که بین گرایش‌های مختلف همچون نانوآپتیک، میکروالکترونیک و فیزیک حالت جامد ارتباط برقرار می‌کند و کاربردهای فراوانی در زمینه‌های مختلف از جمله صنعت مخابرات، اپتوالکترونیک، ارتباطات و مدارهای مجتمع تمام نوری و... دارند [۱،۲].

در این فصل ابتدا به معرفی چند نوع فیلتر پرداخته، سپس توضیحاتی در مورد بلورهای یونی و فوتونی، بلورهای فوتونی شبه‌متناوب، مواد ناهمسانگرد و... می‌دهیم. روش ریاضی به کار رفته در این پایان‌نامه ماتریس انتقال است که به معرفی آن در این فصل پرداخته‌ایم. سپس، انواع گاف باندها را معرفی می‌کنیم و در انتهای این فصل، لزوم استفاده از بلورهای فوتونی در صنعت ارتباطات ذکر شده است.

۱-۱) فیلتر چیست؟

فیلتر در اصطلاح به معنی صافی و ابهام‌زدایی است. از انواع فیلترها می‌توان فیلترهای الکترونیکی، نوری و تمام‌نوری و ... را نام برد. فیلتر الکترونیکی، مداری است که از آن برای حذف یا عبور محدوده‌ی فرکانسی معین استفاده می‌شود [۳]. از انواع فیلترهای نوری که در دوربین‌های دیجیتال مورد استفاده قرار می‌گیرند، فیلترهای پلاریزه، رنگی، ستاره‌ای و... است [۴]. منظور اصلی استفاده از فیلترهای پلاریزه به حداقل رساندن انعکاس‌های نور از سطح اشیاء نظیر آب و شیشه است. فیلترهای پلاریزه از نوعی شیشه با توانایی پلاریزه کردن نور تشکیل شده‌اند. فیلتر پلاریزه انعکاس‌های نور را که در جهات مختلف از روی سطوح و محیط پراکنده می‌شوند، جذب نموده، تنها به نورهایی که در جهتی خاص منعکس می‌شوند اجازه عبور می‌دهند، به این عمل قطبی کردن نور و یا پلاریزاسیون گفته می‌شود. پلاریزاسیون نور باعث بهبود تباین تصویر می‌شود. فیلترهای ستاره‌ای برای ایجاد جلوه‌های ویژه به کار می‌رود. برای ایجاد درخشندگی یا شکست روی نورها طراحی شده است. این فیلتر دارای خطوط افقی و عمودی و گاهی اوقات مورب است که نقاط نورانی را دچار شکست می‌کند. بسته به نوع فیلتر، نورها دارای شعاع‌هایی هستند که به رنگهای رنگین‌کمانی دیده می‌شوند.

مدارات مجتمع و سیستم‌های تمام نوری یکی از زمینه‌های جذاب برای محققین بخش پردازش سیگنال با سرعت بالا شده است، بطوریکه یکی از مهمترین بلوک‌های پایه در این بخش،

بلوک فیلترینگ می‌باشد، به عبارت دیگر آنالیز طیفی یکی از پرکاربردترین بخش‌های بلوک فیلترینگ است. از دهه گذشته تقاضا برای استفاده از فیلترهای قابل تنظیم برای بکارگیری در سیستم‌های تقسیم طول موجی^۱ [۴-۵] در سیستم‌های مخابرات نوری به خاطر افزایش ظرفیت طول موجهای ارسالی و دریافتی در کانال‌های مخابراتی و همچنین کاهش ابعاد قطعات مخابراتی برای قرار گرفتن در کنار سایر عناصر رو به افزایش بوده است. در سیستم‌های تقسیم طول موج یکی از ضروری‌ترین بلوک‌ها فیلترهای باند باریک می‌باشد. با این امر فاصله کانال‌ها به هم نزدیک شده و در نتیجه حجم بالایی از اطلاعات را می‌توان ارسال و دریافت کرد. فیلترهای نوری مبتنی بر محیط‌های لایه‌ای و یا مبتنی بر لایه نازک، جزء اولین دسته از فیلترها هستند که به طور چشمگیری در سیستم‌های تقسیم طول موج در سال ۱۹۹۰ بکار گرفته شد. امروزه فیلترهای مبتنی بر محیط‌های لایه‌ای نازک در سیستم مخابرات نوری حضور چشمگیری دارد. در طی سالیان گذشته انواع مختلفی از فیلترهای نوری طراحی و به بازار عرضه شده‌اند، به عنوان نمونه می‌توان به فیلترهای مبتنی بر آرایه توری‌های موجبری^۲ و فیلترهای مبتنی بر توری‌های براگ^۳ که برای عمل فیلترینگ در سیستم‌های تقسیم طول موج بکار می‌رود، اشاره کرد [۷]. اصول عملکرد اکثر ساختارهای فیلترینگ از جمله ساختارهای یاد شده بر اساس پدیده تداخل است. ساختارهایی که در بالا اشاره شد، هر کدام دارای معایب و مزایایی هستند ولی یکی از معایب مشترک این ساختارها ناتوانی در مجتمع شدن آنها می‌باشد که از مؤثر بودن آن می‌کاهد. فیلترهای تمام‌نوری: فیلترهای مبتنی بر بلورهای فوتونی^۴ و فیلترهای مبتنی بر بلورهای فوتونی شبه‌متناوب^۵ دارای ساختارهایی با حجم بسیار کم هستند. بنابراین جایگاه ویژه‌ای در صنعت ارتباطات نوری و مدارهای مجتمع پیدا کرده‌اند و موضوع مورد بحث ما در این پایان‌نامه قرار گرفته است.

۲-۱) بلورهای یونی

یک بلور عبارت است از آرایش تناوبی از اتم‌ها یا مولکول‌ها، یعنی یک بلوک ساختاری ساده و پایه از اتم‌ها یا مولکول‌ها در فضا تکرار می‌شود. در شکل (۱-۱) شماتیکی از بلورهای یونی نشان داده شده است. دوره‌ای بودن شبکه بلور، خواص الکتریکی شبکه بلوری را کنترل می‌کند. به طور دقیق‌تر اجزای اصلی بلورها و هندسه آنها نقش مستقیم در خواص رسانندگی آنها دارند و بسیاری از خواص رسانش بلور را تعیین می‌کند، به‌ویژه باند گاف‌هایی در ساختار باند انرژی بلور

¹ Wave Division Multiplexing

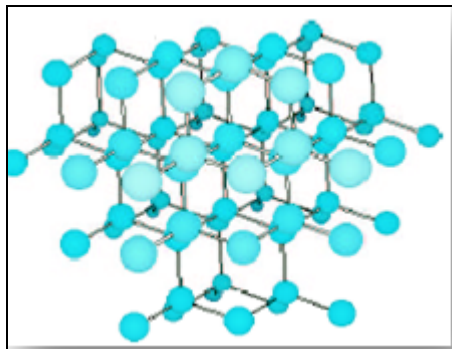
² Waveguide grating

³ Bragg grating

⁴ Photonic crystal (PC)

⁵ Quasi crystal

ایجاد می‌کند. در فیزیک حالت جامد به مناطقی که هیچ حالت الکترونی نمی‌تواند وجود داشته باشد نوار ممنوعه گفته می‌شود. در نیمه‌رساناها و نارساناها، گاف نواری حد پایین نوار رسانش و حد بالای نوار ظرفیت است، به طوری که الکترون‌ها امکان برانگیزش به آنها را ندارند. در واقع الکترون‌ها رفتار موجی از خود نشان می‌دهند و این امواج در یک پتانسیل دوره‌ای منتشر می‌شوند. اگر پتانسیل به حد کافی قوی باشد یک گاف باند^۱ کامل تشکیل خواهد شد مانند نیمه‌هادی‌ها که دارای یک گاف باند کامل بین باندهای رسانش و ظرفیت هستند [۸]. مشابه فوتونیکی نیمه‌هادی‌ها، بلورهای فوتونی هستند. حال اگر امواج الکترونی با امواج اپتیکی و پتانسیل دوره‌ای شبکه با مدل ضریب شکست تناوبی جایگزین شود، در این صورت پراکندگی در سطوح مرزی، نواحی مجاز و ممنوع نظیر گاف نواری ویژه حالت‌های الکترونی در نیمه‌رسانا ایجاد می‌کند. در بلورهای یونی پتانسیل متناوب و ثابت شبکه، ثابت هستند. بنابراین هر نتیجه از باند گاف انرژی ثابت می‌ماند اما در بلورهای نوری وجود باند گاف به شدت وابسته به هندسه شبکه و ثابت دی‌الکتریک می‌باشد.



شکل (۱-۱). شماتیکی از بلورهای یونی

۳-۱) بلورهای فوتونی

بلورهای فوتونی ساختارهایی با توزیع ضریب شکست متناوب هستند که از سال ۱۸۸۷ مورد مطالعه قرار گرفته‌اند ولی عبارت "بلور فوتونی" برای اولین بار ۱۰۰ سال بعد، زمانی که الی یابلانویچ^۲ مقاله مشهور خود را درباره بلورهای فوتونی در سال ۱۹۸۷ منتشر کرد، مورد استفاده قرار گرفت [۹،۱۰]. قبل از سال ۱۹۸۷ بلورهای فوتونی یک بعدی به صورت ساختار لایه‌ای متناوب از مواد دی‌الکتریک به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار می‌گرفت، هر چند بدان نام بلورهای فوتونی اطلاق نمی‌گرفت. ویژگی اصلی بلور فوتونی، گاف باند فوتونی است که امواج الکترومغناطیسی با طول

^۱Gap band

^۲E. Yablonovitch

موجی در محدوده این گاف نمی‌توانند از ساختار عبور کنند. در واقع در این بازه فرکانسی نور به طور کامل بازتابش می‌یابد. صفر شدن ضریب دامنه تراگسیل در این بازه فرکانسی، سبب نامگذاری آن به نوار ممنوع^۱ فوتونی شده است. با صرف نظر کردن از جذب نوری در لایه‌های متناوب، پراکندگی و انعکاس در مرز بین دو لایه را می‌توان عامل اساسی بوجود آمدن نوار ممنوع فوتونی برشمرد. تناوب در یک بلور فوتونی در حد طول موج طراحی می‌باشد. ضخامت اپتیکی لایه‌ها از شرط یک-چهارم طول موج^۲، تبعیت می‌کنند. اگر تناوب در یک بعد تکرار شود، بلور فوتونی یک بعدی نامیده می‌شود. تکرار این تناوب در دو و سه بعد، به ترتیب بلور فوتونی دو و سه بعدی را تشکیل می‌دهند. در شکل زیر انواع بلور فوتونی، یک بعدی، دو و سه بعدی نمایش داده شده است.



(ج) سه بعدی

(ب) دو بعدی

(الف) یک بعدی

شکل (۱-۲). تصاویری از بلورهای فوتونی (الف) یک بعدی، (ب) دو بعدی و (ج) سه بعدی

همان‌طور که می‌دانیم از ویژگی‌های منحصربه‌فرد بلورهای فوتونی، انعکاس کامل نور هنگامی که فرکانس آن در گاف فوتونی قرار دارد، می‌باشد. از دیگر خواص بسیار مهم بلورهای فوتونی می‌توان به اثر ابرمنشور^۳ و شکست منفی اشاره کرد [۱۱]. هر دو این ویژگی در واقع از پاشندگی^۴ بسیار شدید و غیرعادی نور در آنها سرچشمه می‌گیرد. از کاربرد خاصیت ابرمنشور می‌توان در تفکیک کانال‌های چگال مخابرات نوری و از کاربردهای شکست منفی می‌توان به بازسازی کامل تصویر منبع نقطه‌ای نور توسط بلور فوتونی اشاره کرد [۱۱]. زمانی که یک موج با فرکانسی در ناحیه گاف باند از خارج به سطح بلور می‌خورد، بردار موج حقیقی برای هر مد در آن فرکانس وجود ندارد و بردار موج مختلط می‌باشد، مؤلفه موهومی بردار موج باعث می‌شود دامنه موج به صورت

^۱Stop band

^۲ Quarter Wave(QW)

^۳ super-refraction

^۴ Dispersion

نمایی داخل بلور کاهش یابد. وقتی می‌گوییم هیچ حالتی در گاف باند فوتونی وجود ندارد منظور این است که هیچ حالت قابل توسعه‌ای وجود ندارد و موج میرا می‌شود.

اولین بلورهای فوتونی شناخته شده، یک بعدی بودند و به علت بازتابش ایجاد شده، برای ساخت آینه‌ها به کار می‌رفتند که مزیت‌هایی نسبت به آینه‌های فلزی معمولی داشتند. آینه‌های فلزی علاوه بر اینکه روی اصول کاملاً متفاوتی عمل می‌کنند، هنگامی که نور به آنها برخورد می‌کند بیشتر جذب شده تا اینکه بازتاب شود و این جذب بیشتر در طول موج‌های کوتاه که برای لیزرها و ارتباطات نوری مفید هستند، بیشتر می‌شود، ولی بلورهای فوتونی بر هم کنش ضعیفی با نور دارند و می‌توانند جذب پایینی را تقریباً در هر طول موج داشته باشند.

مواد زیادی در ساختار بلورهای فوتونی استفاده می‌شود که از آن جمله می‌توان به مواد دی-الکتریک، فلزات، فرامواد^۱، ابرساناها، بلورهای مایع^۲ و... اشاره کرد. بلورهای فوتونی متشکل از فرامواد "شبه بلورهای فوتونی" نامیده می‌شود [۱۲-۱۳]. بلورهای فوتونی در نواحی فرکانسی نوری، میکروموج و فرسرخ می‌توانند کاربردهای مهمی داشته باشند و از آنها می‌توان در کارهای صنعتی مانند موجبرهای بلور فوتونیک بدون اتلاف، لیزرهای بلور فوتونی با آستانه پایین، انعکاس دهنده‌های تمام‌سویه [۱۴]، موجبرهای دی‌الکتریک، تشدیدگرهای لیزری، مدارهای تمام‌نوری، دیودهای نوری و فیلترهای نوری و... اشاره کرد.

۴-۱) بلورهای فوتونی شبه‌متناوب

ساختار فوتونی شبه‌متناوب به وسیله یک قاعده بازگشتی ریاضی ساده تعریف می‌شود. این ساختارها از لحاظ نظم ساختاری بین ساختار متناوب منظم و نامنظم قرار دارند [۱۵-۱۷]. از کنار هم قرار دادن چندین نوع مختلف از لایه‌های دی‌الکتریک مطابق با دنباله بازگشتی خاصی، تشکیل می‌شوند. از جمله این دنباله‌ها می‌توان به دنباله تیو-مورس^۳، فیبوناچی^۴، رودین-شاپیرو^۵ و کانتور^۶ و... اشاره کرد. از ساختارهایی که در این پایان‌نامه مورد بررسی قرار گرفته است، ساختارهای تیو-مورس و فیبوناچی است.

۵-۱) فرامواد

¹ Metamaterial

² Liquid crystal

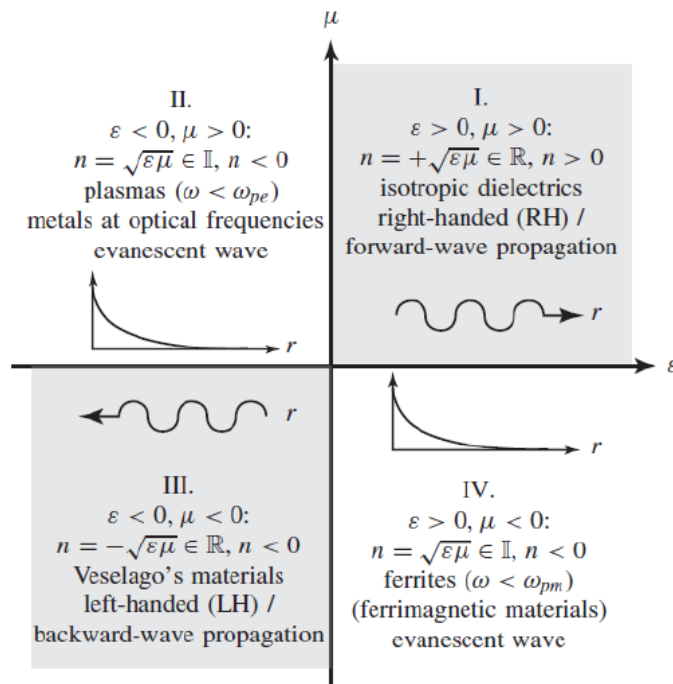
³ Thue-Morse(T-M)

⁴ Fibonacci

⁵ Rodin-Shapiro

⁶ Cantor

مواد از لحاظ خواص الکترومغناطیسی به چهار دسته طبقه‌بندی می‌شوند (مطابق شکل (۳-۱)): تمام مواد طبیعی اطراف ما مانند شیشه، الماس و نظیر آنها دارای $\epsilon > 0, \mu > 0$ و ضریب شکست مثبت هستند؛ اما مواد مصنوعی - که به نامهایی چون مواد با ضریب شکست منفی و یا محیط‌های دوبار منفی^۱ و یا مواد دست چپی^۲ و یا محیط‌های موج برگشتی^۳ معروفند- تمام این مقادیر منفی است.



شکل (۳-۱). طبقه‌بندی مواد بر اساس خواص الکترومغناطیسی

در اپتیک به طور معمول ضریب شکست هر ماده با اندازه‌گیری چگالی اپتیکی ماده بدست می‌آید و به صورت $n = c/v$ مشخص می‌شود. c ، نشان‌دهنده سرعت نور در خلأ و v سرعت یک موج الکترومغناطیس تخت در ماده است. همچنین با استفاده از روابط ماکسول نیز می‌توان ضریب شکست را به صورت $n^2 = \epsilon\mu$ نشان داد. در مواد اپتیکی معمول که در ربع اول جدول (۳-۱) قرار دارند، مقدار $\epsilon > 0, \mu > 0$ است و به سادگی مقدار $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ خواهد بود. این مواد به نامهای دوبار مثبت^۴ و یا مواد دست راستی^۵ معروفند. مواد در ربع دوم و چهارم یکی از پارامترهای آنها، ϵ و یا μ

¹ Double negative (DNG)

² Left Hand Material (LHM)

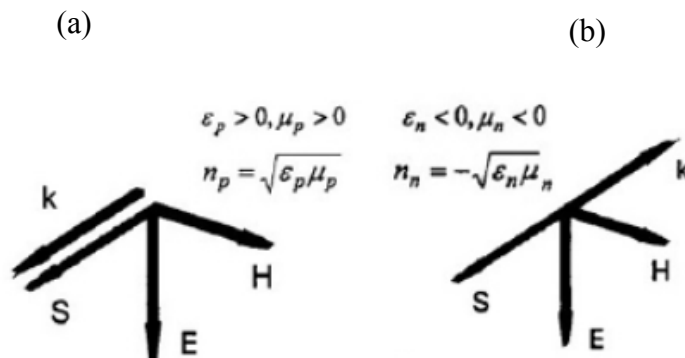
³ Backward Wave (BW)

⁴ Double positive (DPS)

⁵ Right Handed Material (RHM)

منفی می‌باشد. بنابراین به این مواد فرامواد تک منفی^۱ گفته می‌شود. مواد در ربع دوم دارای $\epsilon < 0, \mu > 0$ هستند بنابراین به این مواد، ϵ -منفی^۲ و در ربع چهارم، $\epsilon > 0, \mu < 0$ می‌باشند، مواد μ -منفی^۳ نامیده می‌شوند.

توجه به روابط ماکسول، اگر مقدار $\epsilon\mu > 0$ باشد، موج در ماده مورد نظر انتشار پیدا می‌کند و اگر $\epsilon\mu < 0$ در ماده نمی‌تواند انتشار یابد. اگر محیطی در یک بازه فرکانسی خاص دارای $\epsilon < 0, \mu < 0$ باشد، موج در این باند فرکانسی می‌تواند در محیط انتشار یابد. به چنین محیطی دوبار منفی می‌گویند. ابتدا در سال ۱۹۶۷ و سلاگو چنین محیطی در یک بازه فرکانسی خاص مورد توجه، تجزیه و تحلیل قرار داد و سپس توسط پندری^۴ و اسمیت^۵ به صورت تجربی ساخته شد [۱۸-۲۰]. و سلاگو پیش‌بینی کرد رابطه بین $\vec{H}, \vec{E}, \vec{K}$ از قانون دست چپ بدست می‌آید؛ در نتیجه به این مواد، مواد دست چپی گفته می‌شود. در این محیط‌ها بردار پوییتینگ (\vec{S}) و بردار موج (\vec{K}) پادموازی هستند. خواص دست چپی و پادموازی در شکل (۴-۱) نشان داده شده است.



شکل (۴-۱). شماتیکی از جهت‌های میدان الکتریکی و مغناطیسی، بردار موج و پوییتینگ (a) محیط دست راست و (b) محیط دست چپ.

از خواص دیگر مواد با ضریب شکست منفی، انکسار منفی است. فرض می‌کنیم نور از محیطی با ضریب شکست مثبت وارد محیط با ضریب شکست منفی شود. با توجه به قانون اسنل ($n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$) طرف چپ رابطه دارای مقدار مثبت است و n_2 مقداری منفی است

¹ Single-Negative (SNG)

² Epsilon-Negative Material (ENG)

³ Mu-Negative Material (MNG)

⁴ J.B. Pendry

⁵ D.R. Smith