



دانشگاه شاهرود

دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد

رشته برق گرایش الکترونیک

عنوان پایان نامه :

جهت دهی پرتو نوری در موجبر های بلور فوتونی

دو بعدی

استاد راهنما :

جناب آقای دکتر ثقفی

نگارش :

علی رضا مبینی

شهریور ۱۳۸۸

چکیده پایان نامه

بلور های فوتونی ساختار هایی هستند که ضریب شکست آنها در یک، دو و سه بعد بطور متناوب با دوره تناوبی در حدود طول موج نور تغییری کند. این تناوب در ضریب شکست باعث بوجود آمدن شکاف یا باند توقف در نمودار باند میشود که ویژگی بارز بلور های فوتونی است. آنچه مسئله را جالب تر میکند تغییر باند توقف فوتونی و ایجاد حالت های مجاز در آن با وارد کردن نقص در ساختار است که پایه کاربرد های فراوانی است.

کاربردهای بلور فوتونی که میتوانند از ساختارهای چون موجبر، فیبر نوری، صافی نوری، کوپلر، تشدیدگر، مالتی پلکسر، دی مالتی پلکسر و تاخیر دهنده هاشروع شده و تا مباحثی چون طراحی گیت های اپتیکی، فلیپ فلاپ های نوری، ترانزیستور های نوری و مدارهای مجتمع اپتیکی پیش رود همکنون نیز در حال گسترش است. امروزه ساختارهای بلور فوتونی برای پیاده سازی برخی عملگرهای کوانتومی مانند هادمارد استفاده شده است و ساختارهای مناسبی برای بحث در مورد پردازش کوانتومی هستند.

روش های مختلفی چون بسط امواج تخت، تفاضل متناهی در زمان، تفاضا متناهی در فرکانس، ماتریس پراکندگی و چند قطبی های متعدد برای تحلیل و شبیه سازی های ساختار های بلور فوتونی وجود دارد که هر یک دارای مزیت و معایب خاص خود و در جایی قابل استفاده است. در این پایان نامه در ابتدا ساختارهای متفاوتی از بلور های فوتونی مانند موجبر ساده $W1$ ، موجبر T شکل، انواع فیلتر و تشدیدگر با نرم افزار **RSOFT** با بهره گیری از روش های بسط امواج تخت و تفاضل متناهی در زمان شبیه سازی شده و سپس با تاکید بر ویژگی موجبری بلور فوتونی نحوه ورود، انتشار و نهایتا خروج و کوپلینگ نور از افزاره که با تغییر مشخصه های بلور فوتونی مانند نوع ساختار، ضرایب شکست و... میتواند تغییر می کند مورد بررسی قرار گرفته است. با کنترل این مشخصه ها نمودار شدت میدان را در راستای دلخواه بهینه شده است بطوری که نور خروجی با ۹۲ درصد میدان کل در جهت عمودی کوپل شده است. با کنترل این ویژگی بویژه در هنگام خروج نور از افزاره، میتوان افزاره هایی مثل مالتی پلکسر، دی مالتی پلکسر، مبدل آنالوگ به دیجیتال و دیجیتال به آنالوگ نوری، آنتن های مخابراتی، گیت های اپتیکی و... با مشخصات بهتر طراحی نمود. از طرفی خود مسئله کوپلینگ بین ادوات مختلف مثل انواع فیبرها، تقسیم گر های نوری و... به جهت مندی پرتو نوری وابسته است که بر اهمیت موضوع مورد بررسی می افزاید.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۱- فصل اول: مقدمه ای بر بلور فوتونی	۸
۱-۱- ساختارهای بلور فوتونی	۱۴
۲-۱- اصول کارکرد بلور فوتونی	۱۷
۳-۱- نحوه ساخت بلور فوتونی و آرایه های مبتنی بر آن	۲۶
۴-۱- کاربردهای بلور فوتونی	۲۰
۵-۱- شرایط مورد نیاز برای تحقق موجبر های بلور فوتونی	۲۸
۱-۵-۱- طراحی موجبر	۳۰
۱-۱-۵-۱- موجبر بلور فوتونی W_1	۳۰
۲-۱-۵-۱- موجبر W_3	۳۱
۳-۱-۵-۱- موجبر با فضای موجبری کاهش یافته	۳۲
۴-۱-۵-۱- موجبر W_1 با حفره های تغییر شکل یافته	۳۳
۵-۱-۵-۱- موجبر W_1 شیاردار	۳۵
۶-۱-۵-۱- سیم ایجاد شده در بلور فوتونی	۳۵
۷-۱-۵-۱- موجبر های هیبرید	۳۷
۶-۱- بررسی روش های کولپینگ و روش های بهینه سازی آن	۳۷
۱-۶-۱- استفاده از میکروولنز های خارجی	۳۸
۲-۶-۱- مخروطی کردن سطح خروجی موجبر	۴۰
۳-۶-۱- تغییر ضرایب گذردهی در سطح خروجی با تزریق مایع	۴۲
۴-۶-۱- استفاده از ساختار موجبر هیبرید یا حفره های نانویی در موجبر	۴۴
۵-۶-۱- استفاده از روش کولپینگ محو شونده	۴۶
۶-۶-۱- استفاده از مود های سطحی موجبر	۴۷
۷-۶-۱- ایجاد سطح مقعر در موجبر	۴۹
۸-۶-۱- کولپینگ بهینه از طریق دندانهای ای کردن ساختار	۵۰

۵۳	۲- فصل دوم: روشهای تحلیل و شبیه سازی بلورهای فوتونی
۵۳	۱-۲- بررسی روش های شبیه سازی بلور فوتونی
۵۴	۲-۱-۱- بسط امواج تخت
۵۶	۲-۱-۲- تفاضل های متناهی در زمان
۶۱	۲-۱-۳- تفاضل های متناهی در بسامد
۶۱	۲-۱-۴- المان های محدود
۶۱	۲-۱-۴-۱- المان محدود در فرکانس
۶۲	۲-۴-۱-۲- المان محدود در زمان
۶۳	۲-۱-۵- ماتریس اسکترینگ (SMM)
۶۶	۲-۱-۶- چند قطبی های متعدد (MMP)
۶۸	۳- فصل سوم: نتایج شبیه سازی
۶۸	۳-۱- معرفی نرم افزار شبیه ساز
۶۹	۳-۲- محاسبه باند توقف یک بلور دوبعدی کامل با شبکه مربعی با روش PWE در نرم افزار مطلب
۷۲	۳-۳- باند توقف یک بلور دوبعدی مثلثی کامل
۷۳	۳-۴- موجبر بلور فوتونی
۷۵	۳-۵- صافی نوری
۷۹	۳-۶- موجبر T شکل
۸۵	۳-۷- موجبر جهت مند
۸۵	۳-۷-۱- موجبر جهت مند باز
۹۵	۳-۷-۲- موجبر با انتهای بسته
۹۸	۳-۸- بهینه سازی ساختارها
۹۸	۳-۸-۱- تغییر فرکانس مرکزی حفره ها
۱۰۲	۳-۸-۲- تغییر ضریب بازتاب موج در موجبر
۱۰۵	۳-۸-۳- تغییر ضریب شکست استوانه وسط
۱۰۸	۳-۸-۴- افزایش تعداد حفره های تشدید
۱۰۹	۳-۸-۵- موجبر با حفره تشدید در وسط

- ۱۱۱ ۳-۸-۶- موجبر با حفره های تشدید نامتقارن
- ۱۱۲..... ۳-۹-۹- موجبر افقی با حفره تشدید
- ۱۱۳ ۳-۹-۱- موجبر افقی با یک حفره تشدید
- ۱۱۴ ۳-۹-۲- موجبر افقی با دو حفره تشدید
- ۱۱۵..... ۳-۹-۳- تغییر شعاع استوانه در موجبر افقی با دو حفره تشدید و بررسی ایده دی مالتی پلکسر
- ۱۱۹ ۳-۹-۴- موجبر افقی با سه حفره تشدید
- ۱۲۰..... ۳-۹-۵- تغییر شعاع استوانه در موجبر افقی با دو حفره تشدید و بررسی ایده دی مالتی پلکسر
- ۱۲۲ ۳-۱۰-۱- تغییر شکل حفره های تشدید
- ۱۲۴ ۳-۱۰-۱- اضافه کردن استوانه های داخلی به حفره های تشدید
- ۱۲۶..... ۳-۱۰-۲- تغییر ضرایب ایندکس حفره های تشدید برای بدست آوردن طول موج های مختلف
- ۱۲۸ ۳-۱۰-۳- طراحی **plexer** با باابعاد بهینه و خروجی های مجزا از هم
- ۱۲۹ ۴- نتیجه گیری و پیشنهادات
- ۱۳۲ ۴-۱- نتیجه گیری
- ۱۳۳ ۴-۲- پیشنهادات
- ۱۳۵ ۵- مراجع و ضمائم

پیش‌گفتار

طراحی بلور فوتونی از حوزه‌های جدیدی است که اخیراً بشدت مورد توجه قرار گرفته است. آنچه بلورهای فوتونی را مورد توجه اهل علم قرار داده از یک طرف کاربرد وسیع این بلورها و از طرف دیگر ویژگی‌های منحصر به فرد بلورهای فوتونی است. بلور فوتونی پتانسیل لازم را دارد که بلوک اصلی در طراحی اجزاء مدارهای مجتمع نوری در آینده باشد. افزاره‌های بسیار زیادی مانند موجبر، فیبر نوری، خم‌ها، شکافندها، تشدیدگرها ... وجود دارد که قابلیت پیاده‌سازی روی تیغه‌های بلور فوتونی را دارند. بر این اساس بر آن شدیم تا در فصول این پایان‌نامه انتشار نور در ساختارهای بلور فوتونی، نحوه ورود، انتشار و نهایتاً خروج نور از افزاره که با تغییر مشخصه‌های بلور فوتونی مانند نوع ساختار، ضرایب شکست، نحوه کوپلینگ و... میتواند تغییر کند را مورد بررسی قرار دهیم. این کار در فصول آتی به ترتیب زیر انجام شده است.

فصل اول را با عناوین کلی چون آشنایی با ساختار بلور فوتونی، اصول کارکرد، ویژگیها و کاربردهای آن آغاز می‌کنیم. در این فصل خواهیم دید که بلور فوتونی در واقع یک محیط اپتیکی است که مقدار ضریب شکست مواد در دوره تناوبی که قابل مقایسه با طول موج نور است تکرار میشود. بسته به اینکه این تکرار در یک، دو و یا سه بعد باشد سه نوع بلور فوتونی خواهیم داشت که شبکه مربعی و مثلثی معروفترین ساختارها در دو بعد است. در سه بعد نیز چهارده گروه بلور فوتونی وجود دارد.

انتشار نور یا بطور دقیق تر فوتون در درون این بلورها با حل معادلات ماکسول بررسی میشود. حل این معادلات ما را به مقادیر ویژه ای میرساند که نواحی توقف را در نمودار فرکانسی فوتون‌ها مشخص میکنند درست شبیه آنچه برای حل معادلات شرودینگر در بررسی حرکت الکترون در نیمه هادی داشتیم. وجود این باند توقف ویژگی مشترک همه بلورهای فوتونی است. مسئله جالب آن است که این باند توقف با وارد کردن نقص در ساختار تغییر کرده و نواحی مجازی در آن به وجود می‌آید که کاربردهای زیادی را برای بلور فوتونی شامل انواع فیبر، موجبر، فیلتر نوری، تشدیدگر ایجاد می‌کند که توضیحات آن به تفصیل خواهد آمد. اما آنچه برای هدف آینده که پیاده‌سازی یک سیستم نوری است ضروری است مجتمع سازی این ادوات است که مستلزم کوپل موج از یک افزاره به افزاره دیگر است که باید با بطور بهینه وبا ضریب بالا و تلفات کم صورت بگیرد. در این خصوص جهت مند کردن پرتو نوری در هنگام ورود و خروج از افزاره بسیار مهم خواهد شد که روش‌های مختلفی تاکنون برای آن ابداع شده که در فصل یک در بخش ۱-۶-۸ آورده شده است و بحث بیشتر روی این موضوع و ارائه راهکارهای جدید در فصل سه این نوشتار آورده شده است.

بی شک در این جا نیز مانند هر جای دیگر کامپیو تر برای شبیه سازی معادلات بلور فو تونی به کمک ما خواهد آمد. برای حل و شبیه سازی این معادلات روش های متنوع و شناخته شده ای وجود دارد که دسته ای از آنها مانند بسط امواج تخت و روش تفاضل متناهی در زمان و یا فرکانس برای خواننده آشنا و دسته ای دیگر مانند روش ماتریس پراکندگی، روش چند قطبی متعدد جدید است که توضیحات آن در فصل دوم این نوشتار با عنوان کلی آشنایی با روشهای تحلیل و شبیه سازی بلور های فوتونی در ساختارهای مختلف خواهد آمد.

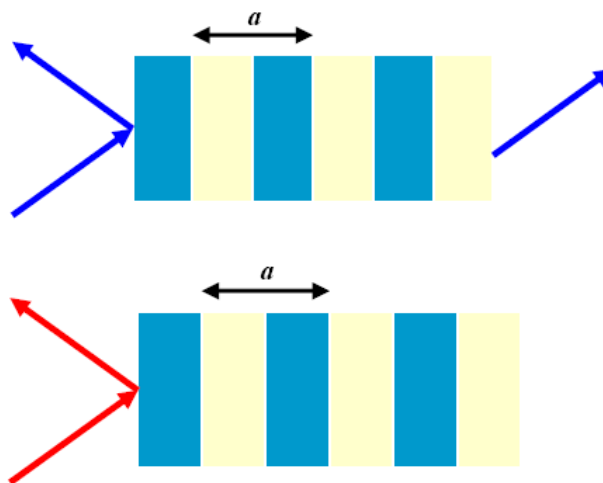
در فصل سوم با بهره گیری از نرم افزار شبیه ساز **rsoft** که امروزه نرم افزار متعارف و معتبری برای اهل فن آن است ساختار های متفاوتی را با بهره گیری از دو روش بسط امواج تخت و تفاضل متناهی در زمان برای ساختار های متعددی چون موجبر ساده **W1**، موجبر **T** شکل، انواع فیلتر انجام داده ایم و سپس با استفاده از ایده های فصل اول، بحث تداخل در اپتیک و کمی نوآوری ساختار موجبر را بگونه ای تغییر داده ایم که راستاوری نور در آن تغییر کند. بررسی نمودار شدت میدان خروجی در نقاط مختلف، تغییر فرکانس مرکزی، کاهش و افزایش شدت فرکانس ها میانی و کناری از دیگر بحث ها مطرح شده در این فصل است. در همه جا سعی شده است که ویژگی بوجود آمده را به نقطه کاربردی آن که شامل فیلتر، مالتی پلکسر و دی مالتی پلکسر، مبدل دیجیتال به آنالوگ و آنالوگ به دیجیتال است نزدیک کنیم. در نهایت نیز با اندک تجربه ای که در این زمینه اندوخته ایم راهکارهایی را که برای ادامه کار در این زمینه و زمینه های مشابه میتواند مفید واقع شود به عنوان پیشنهادات آورده ایم .

امید است مجموعه تلاشهای انجام شده منجر به گامی هر چند کوچک در زمینه اعتلای این دانش گردد و این نوشتار نقطه مثبتی در حرکت رهجویان آینده باشد.

۱- فصل اول: مقدمه ای بر بلور فوتونی

۱-۱- ساختارهای بلور فوتونی

بلور فوتونی را به طور ساده میتوان یک محیط با خواص اپتیکی متناوب تعریف کرد. محیطی که در آن امواج الکترومغناطیسی با فرکانس های خاصی می توانند عبور کنند. بعنوان مثال محیط اپتیکی متناوبی در شکل (۱-۱) نشان داده شده است که قسمت های تیره دارای گذردهی الکتریکی ϵ و مغناطیسی μ همگن و متفاوتی نسبت به قسمت های



شکل (۱-۱): بلور فوتونی یک بعدی و پاسخ آن به دو طول موج متفاوت آبی و قرمز [۱].

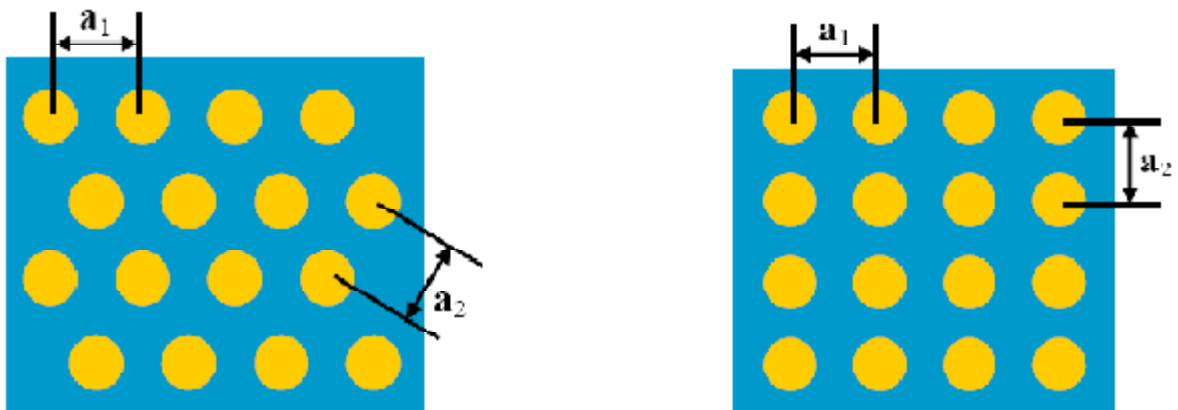
روشن هستند. این سیستم را میتوان به عنوان یک بلور فوتونی ساده ی یک بعدی در نظر گرفت. بلور فوتونی بسیار پاشنده است و میزان گذردهی و انعکاس آن به شدت وابسته به طول موج میباشد. این ویژگی در شکل بالا برای یک بلور فوتونی که ضریب گذردهی آن برای نور آبی بزرگتر از صفر و برای نور قرمز تقریباً صفر می باشد نمایش داده شده

است. یعنی امواج با گستره فرکانسی متناظر با نور آبی از بلور فوتونی عبور می کنند در حالیکه امواج با گستره فرکانسی متناظر با نور قرمز از آن عبور نمی کنند.

در شکل فوق a ثابت شبکه و یا دوره ی تناوب نامیده می شود و نمایان گر حداقل طول فضایی است که ساختار شبکه در آن تکرار می گردد. به بیان دیگر $\epsilon(\mathbf{x}) = \epsilon(\mathbf{x}+a)$ که در آن تابع گذردهی الکتریکی است. می توان نشان داد که مهمترین اثر ناشی از تناوب وجود محدوده های پیوسته و گرا ندار در حوزه ی بسامد است که در آنها امکان انتشار موج در ساختار وجود ندارد. به این نواحی شکاف فوتونی یا نوار ممنوع بسامد گفته می شود. بین هر دوشکاف فوتونی متوالی یک نوار مجاز بسامد قرار دارد و برعکس که انتشار موج در آن تحت شرایطی امکان پذیر است. یک شکاف فوتونی با $[f_1, f_2]$ مشخص شود که در آن $f_1 < f_2$ آن گاه $f_c = \frac{(f_1+f_2)}{2}$ بسامد مرکزی شکاف و $\Delta f_c = f_2 - f_1$ پهنای شکاف نامیده میشوند.

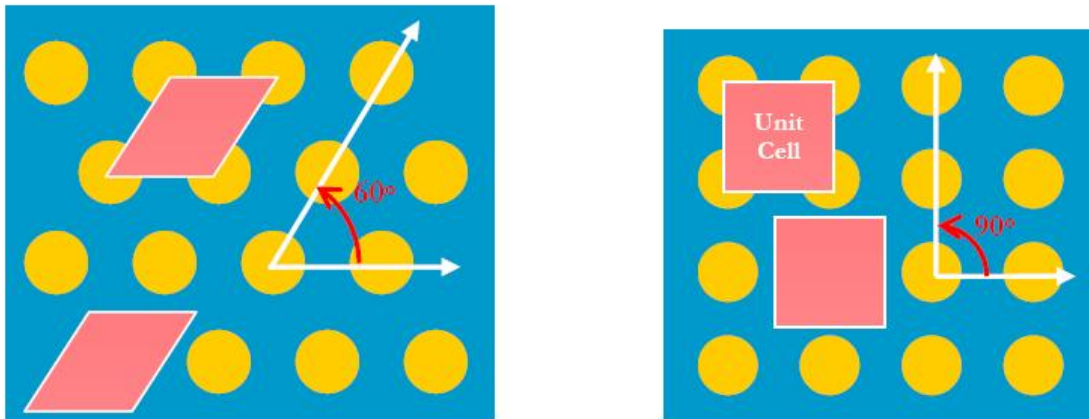
معمولاً در طراحی هندسه های گوناگون بلورهای فوتونی علاقه مندیم ساختارهایی با عریض ترین پهنای نسبی شکاف را که بصورت $m = \frac{\Delta f_c}{f_c}$ تعریف می شود را به دست آوریم.

در دو بعد یک بلور فوتونی را می توان مانند یک آرایه ی تناوب از دو دی الکتریک فرض نمود. ساده ترین هندسه ها با این احتساب در دو بعد همانند گروه های بلوری براویس در فیزیک حالت جامد به پنج خانواده ی اصلی قابل تقسیم خواهند بود. اما تنها دو گروه بلوری در دو بعد از اهمیت برخوردارند که در شکل (۲-۱) نمایش داده شده اند.



شکل (۲-۱): نمایش دو هندسه پایه بلور فوتونی، سمت راست: ساختار مربعی، سمت چپ: ساختار مثلثی [۱].

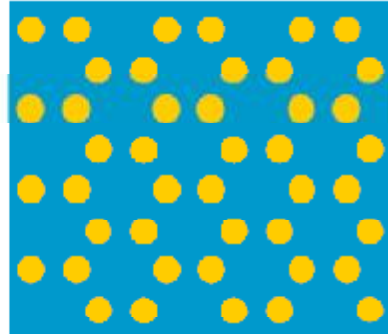
a_1, a_2 بردارهای پایه شبکه نامیده میشوند. به سادگی دیده می شود که علاوه بر تقارن انتقالی که همان ویژگی تناوب مکانی است گونه ای دیگری از تقارن در اثر دوران حول مبدا وجود دارد که بلور فوتونی را بدون تغییر باقی می گذارد. به بیان دیگر بلور فوتونی نسبت به آن تبدیل ناوردا است. در ساختار مربعی (مثلثی) این زاویه برابر 90° (60°) درجه است که موجب تقارن دورانی چهارگون و شش گون می گردد و در اشکال زیر نمایش داده شده است.



شکل (۳-۱): نمایش تقارن دورانی و سلول واحد در بلور های فوتونی دو بعدی [۱].

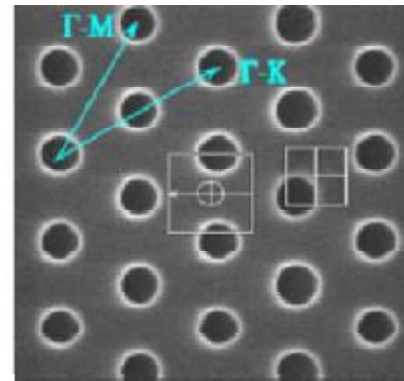
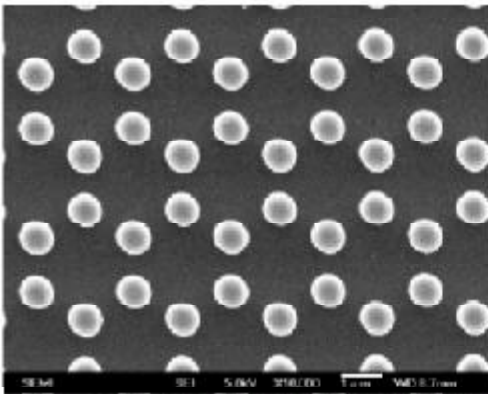
همان طور که در شکل فوق با نواحی صورتی رنگ مشخص شده است سلول واحد در دو بعد (سه بعد) سطح (حجم) متشکل از دو (سه) بردار پایه است و در واقع سلول واحد از نظر سطح (حجم) کوچک ترین جزیی است که با انتقال و تکرار آن بتوان کل بلور فوتونی را بازسازی نمود. گرچه این انتخاب منحصر به فرد نیست ولی معمولا ساده ترین انتخاب برای بلور فوتونی مربعی و مثلثی به ترتیب مربع و لوزی با اضلاع a برابر با ثابت شبکه است.

شبکه مشهور دو بعدی دیگری که در واقع از خانواده ی بلور فوتونی مثلثی شمرده میشود شبکه گرافیت یا لانه زنبوری است که در شکل بعد نمایش داده شده است و دارای تقارن دورانی شش گون می باشد. همچنین فیبر براگ در شکل زیر را میتوان حالت خاصی از بلور فوتونی دو بعدی در دستگاه مختصات استوانه ای فرض نمود.

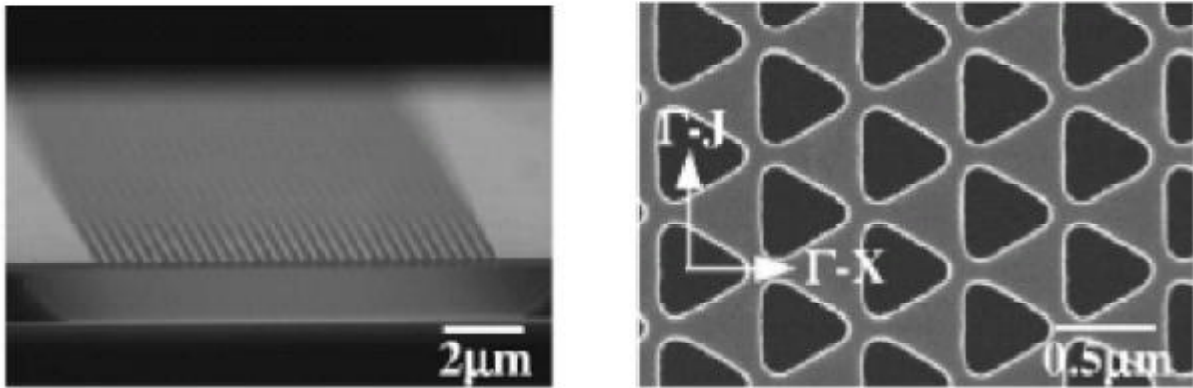


شکل (۴-۱): بلور های فوتونی گرافیت (شکل راست) و فیبر براگ (شکل چپ) [۱].

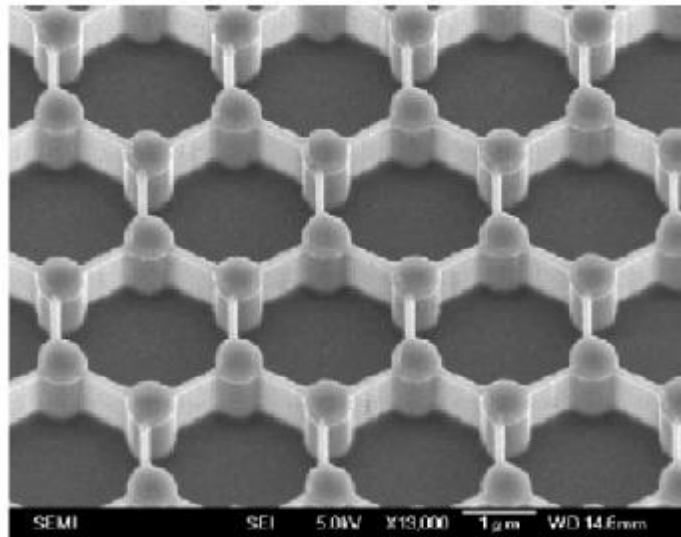
در عمل ساخت بلورهای فوتونی شامل مراحل و فرآیندهای متعدد و پیچیده ای است مانند آن چه در اشکال زیر آورده شده است. در شکل (۵-۱) تصاویری از ساختارهای واقعی دو بعدی مثلثی و گرافیت نمایش داده شده که با میکروسکوپ الکترونی گرفته شده است. البته مادامی که ویژگی های تقارن دو یا چند ساختار بلور فوتونی یکسان می باشد امکان پذیر است که آنها را هنوز از یک خانواده محسوب کنیم، حتی اگر فرضاً برای مثال شکل سوراخها یا استوانه ها گرد نباشد. این حالت برای دو بلور فوتونی با سوراخهای مثلثی در شکل (۶-۱) و گرافیت با اتصالات پل مانند میان استوانه ها در شکل (۱-۱) (۷) نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که ساختارهای دو بعدی در واقع در امتداد محور عمود بر صفحه دارای ضخامت محدود (ساختار تیغه ای) و معمولاً در حد ۲۰۰ تا ۵۰۰ نانومتری باشند.



شکل (۵-۱): بلور های فوتونی گرافیت (در راست) و مثلثی (در چپ) [۳].



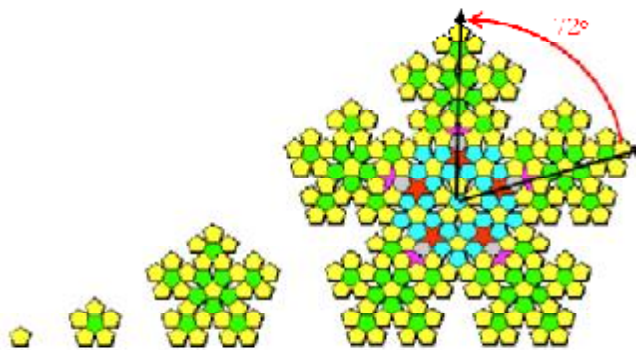
شکل (۶-۱): تصویر تیغه بلور فوتونی دو بعدی مثلثی با سوراخ های مثلثی [۳].



شکل (۷-۱): بلور فوتونی گرافیت با تیغه اتصال میان استوانه ها [۳].

تقارن دورانی در بلورهای فوتونی دو بعدی تا این جا به دو حالت چهارگون و ششگون تقسیم شد. در واقع می توان نشان داد که امکان داشتن تقارنهای دورانی در ساختارهای دو بعدی تنها به دوگون، سه گون، چهارگون و شش گون محدود

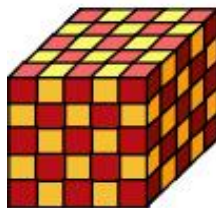
میگردد [۶]. در غیر اینصورت تقارن دورانی با تقارن انتقالی ناسازگار خواهد بود. در شکل (۸-۱) نمونه ای از یک هندسه ی پنج گون نمایش داده شده است. همان طور که دیده می شود این ساختار تحت دورانهای ۷۲ درجه ، و آن هم تنها حول یک نقطه مرکز در صفحه، ناوردا است ولی فاقد هرگونه تقارن انتقالی هندسی دقیق می باشد. اما از آن جایی که ساختارهایی از این دست هنوز دارای بسیاری خواص اپتیکی مطلوب و قابل توجه می باشند و دست کم نظم هندسی (تقارن دورانی) بر آنها حکمفرما است تحت عنوان شبه بلورها طبقه بندی می شوند.



شکل (۸-۱): ساختار هندسی شبه بلور با تقارن دورانی پنج گون [۴].

ساختار سه بعدی بلورهای فوتونی شبیه شکل (۹-۱) است. ساختار در هر سه بعد دارای تکرار است. طبقه بندی بلورهای فوتونی در سه بعد از نظر گروه های بلوری همانند بلورهای الکترونی در فیزیک حالت جامد به ۱۴ گروه اصلی شبکه براوایس انجام می شود. ساختار ظاهری یک بلور فوتونی سه بعدی به صورت زیر است:

3D



شکل (۹-۱): ساختار بلور فوتونی در سه بعد [۵].

۲-۱- اصول کارکرد بلور فوتونی

برای بررسی بلور فوتونی باید معادلات حاکم بر حرکت نور در محیطهای متناوب اپتیکی را مطالعه کنیم. این معادلات از جنبه های مختلفی شبیه به معادلات حاکم بر حرکت الکترون منفرد در یک چاه پتانسیل مستقل از زمان، یا همان معادله ی شرودینگر هستند [۳]. به عنوان مثال برای یک الکترون غیرنسبیتی که در پتانسیل $V(\mathbf{r})$ حرکت می کند داریم:

$$\frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi(\mathbf{r}) + V(\mathbf{r})\psi(\mathbf{r}) = E\psi(\mathbf{r}) \quad (1-1)$$

\hbar ثابت کاهش یافته ی پلانک m جرم الکترون آزاد، $\psi(\mathbf{r})$ تابع موج الکترون و E انرژی می باشد. با تعریف عملگر هامیلتونی H به صورت زیر:

$$H \triangleq \frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}) \quad (2-1)$$

معادله (۱-۱) بصورت زیر در می آید:

$$H\psi = E\psi \quad (3-1)$$

این معادله در حقیقت مستقیماً با یک مسأله ی مقدار ویژه در جبر ماتریس ها قابل قیاس است که در آن E مقادیر ویژه ماتریس مربعی متناظر با عملگر هامیلتونی H باشد. در حقیقت با کمک حل مقدار مستقیم معادله دیفرانسیل (۱-۱) می توان این مقادیر ویژه را با روش های مرسوم یافت. در مقایسه با تابع موج الکترون برای توضیح انتشار امواج نور یا حرکت فوتون ها در تقریب الکترومغناطیس کلاسیک از معادلات ماکسول استفاده می شود:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1-4-1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \quad (2-4-1)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (3-4-1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4-4-1)$$

در محیط بدون بار آزاد و چگالی جریان آزاد الکتریکی که شرایط $J(\mathbf{r}) \equiv 0$ و $\rho(\mathbf{r}) \equiv 0$ حاکم است معادلات ماکسول به شکل زیر ساده و در واقع خطی می شوند:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1-5-1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2-5-1)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0 \quad (3-5-1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4-5-1)$$

با کمی دقت می توان دید که برای امواج الکترومغناطیس معادلات (1-5-1) و (2-5-1) به ترتیب و خود به خود معادلات (3-5-1) و (4-5-1) را ارضا میکنند. این مسأله موجب می گردد تا حل خود آنها احتیاج به دست کم دو معادله ی دیگر داشته باشد که به معادلات ساختاری مشهورند. معادلات ساختاری در حالت کلی به فرم زیر قابل نمایش هستند [1].

$$\vec{D} = \vec{D}(\vec{E}, \vec{B}, \vec{S}) \quad (6-1)$$

$$\vec{H} = \vec{H}(\vec{E}, \vec{B}, \vec{S}) \quad (7-1)$$

که در آن S تانسور کرنش می باشد. در غیاب فعالیت اپتیکی و اثر پیزوالکتریک خواهیم داشت :

$$D_i(r, t) \varepsilon_{ij} \varepsilon_{ij}(r, t) E_j(r, t) + \varepsilon_{ijk} \chi_{ijk}^{(r)}(r, t) E_j(r, t) E_k(r, t) + \varepsilon_{ijkl} \chi_{ijkl}^{(r)}(r, t) E_j(r, t) E_k(r, t) E_l(r, t) + \dots \quad (1-8-1)$$

$$H_i(r, t) \mu_{ij}^{-1} \nu_{ij} \varepsilon_{ij}(r, t) B_j(r, t) + \mu_{ijk}^{-1} \xi_{ijk}^{(r)}(r, t) B_j(r, t) B_k(r, t) + \mu_{ijkl}^{-1} \xi_{ijkl}^{(r)}(r, t) B_j(r, t) B_k(r, t) B_l(r, t) + \dots \quad (2-8-1)$$

که در اینجا $\chi(m)(\mathbf{r}, t)$ و $\xi(m)(\mathbf{r}, t)$ تانسورهای از رتبه m وابسته به مکان و زمان هستند که ویژگی های غیر خطی محیط را می رسانند. چنانچه در محدوده فرکانس مورد توجه از پاشندگی بتوان صرف نظر کرد برای تمامی بلورهای مکعبی مانند Si و GaAs ، InAs با توجه به گروه تقارن آنها و مقادیر عملی پارامترها خواهیم داشت :

$$\varepsilon_{ij}(r, t) \equiv \varepsilon_r(r, t) \delta_{ij} \quad (1-9-1)$$

$$\chi_{ijk}^{(r)}(r, t) \equiv 0 \quad (2-9-1)$$

$$\chi_{ijkl}^{(r)}(r, t) \equiv \chi^{(r)}(r, t) [\delta_{ij} \delta_{kl} \delta_{jk} + \delta_{ij} \delta_{kl} + \delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}], \text{ بدون جمع} \quad (3-9-1)$$

$$\chi^{(m)}(r, t) \equiv 0, , m > 3 \quad (4-9-1)$$

$$\xi_{ijk}^{(m)}(r, t) \equiv 0, , m > 1 \quad (5-9-1)$$

توجه شود که در رابطه (۳-۹-۱) δ_{ij} دلتای کرونکر است که در آن جمعی روی زیرنویسهای تکرار شده صورت نمی گیرد. پس معادلات (۸-۱) به فرم زیر ساده خواهند شد:

$$\vec{D}(r, t) = \epsilon_r \epsilon_r(r, t) \vec{E}(r, t) + \epsilon_r \chi^{(r)}(r, t) |\vec{E}(r, t)| \vec{E}(r, t) \quad (1-10-1)$$

$$\vec{B}(r, t) = \mu_r \vec{H}(r, t) \quad (2-10-1)$$

اگر بخواهیم فقط اثر خطی را در محیط غیر مغناطیسی همسانگرد در نظر بگیریم آن گاه در صورتی که پارامترهای محیط در زمان تغییر نکنند و یا با تقریب نرخ تغییرات آن خیلی نسبت به بسامد نوسانات میدانها کند باشد می توان نوشت:

$$\vec{D}(r, t) = \epsilon_r \epsilon_r(r, t) \vec{E}(r, t) \quad (1-11-1)$$

$$\vec{B}(r, t) = \mu_r \vec{H}(r, t) \quad (2-11-1)$$

برای سیستم هایی که این شرط صادق نباشد، معمولا مسأله باید به صورت عددی در حوزه زمان حل شود. در هر حال چون محیط هنوز دارای تابعیت مکانی است ناهمگن نامیده می شود. در غیر این حالت $\nabla \cdot \epsilon \equiv 0$ برقرار خواهد بود و محیط را همگن می نامیم. در بخش عمده این نوشتار روابط سازنده ی بلورهای فوتونی از معادلات (۱۱-۱) پیروی می کنند. به بیان دیگر بیشتر بحث بر روی محیطهای خطی، همسانگرد، غیر مغناطیسی، فاقد فعالیت اپتیکی، اثر پیزوالکتریک، مستقل از زمان، ولی ناهمگن و البته دارای برخی تقارنهای فضایی خاص متمرکز خواهد بود. برای سیستمی که در حالت پایایی سینوسی و تک بسامد قرار دارد مناسب است تحلیل میدانهای الکتریکی و مغناطیسی توسط فازورها انجام پذیرد:

$$\vec{E}(r, t) = \text{Re}[E(r)e^{i\omega t}] \quad (1-12-1)$$

$$\vec{D}(r, t) = \text{Re}[D(r)e^{i\omega t}] \quad (2-12-1)$$

$$\vec{B}(r, t) = \text{Re}[B(r)e^{i\omega t}] \quad (3-12-1)$$

$$\vec{H}(r, t) = \text{Re}[H(r)e^{i\omega t}] \quad (4-12-1)$$

بنابراین معادلات ماکسول در فضای مختلط فازورها به شکل زیر ظاهر می شوند که در آن ω بسامد منبع است:

$$\nabla \times E = -j\mu_r \omega H \quad (1-13-1)$$

$$\nabla \times H = -j\epsilon_r \omega E \quad (2-13-1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3-13-1)$$

$$\nabla \cdot D = 0 \quad (4-13-1)$$

با توجه به صفر بودن واگرایی \mathbf{B} داریم $\nabla \cdot \mathbf{H} = 0$ ولی برای میدان الکتریکی داریم:

$$\nabla \cdot D = \nabla \cdot (\epsilon E) = \epsilon \nabla \cdot E + \nabla \epsilon \cdot E = \cdot \quad (14-1)$$

پس به دست می آید:

$$\nabla \cdot E = -\frac{\nabla \epsilon}{\epsilon} \cdot E = -\nabla \ln \epsilon \cdot E \neq 0 \quad (15-1)$$

پس:

$$\nabla \times \nabla \times E = -j\mu \cdot \omega \nabla \times H = -j\mu \cdot \omega (j\epsilon \omega E) = \omega^2 \epsilon \mu \cdot E \quad (1-16-1)$$

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\epsilon_r} \nabla \times H \right) = -j\epsilon \cdot \omega \nabla \times E = j\epsilon \cdot \omega (-j\mu \cdot \omega H) = \omega^2 \epsilon \cdot \mu \cdot H \quad (2-16-1)$$

بنابراین با تعریف $c \triangleq \frac{1}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}}$ به عنوان سرعت فاز نور در خلأ خواهیم داشت :

$$\frac{1}{\epsilon_r} \nabla \times \nabla \times E = \frac{\omega^2}{c^2} E \quad (1-17-1)$$

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\epsilon_r} \nabla \times H \right) = \frac{\omega^2}{c^2} H \quad (2-17-1)$$

$$L_R \triangleq \frac{1}{\epsilon_r} \nabla \times \nabla \times (.) \quad (3-17-1)$$

$$L_N \triangleq \nabla \times \left(\frac{1}{\epsilon_r} \nabla \times (.) \right) \quad (4-17-1)$$

و در نتیجه معادله ویژه مقدار میدان الکتریکی و مغناطیسی در قیاس با (۳-۱) به شکل زیر ظاهر می شود:

$$L_R E = k^2 E \quad (1-18-1)$$

$$L_H H = k^2 H \quad (2-18-1)$$

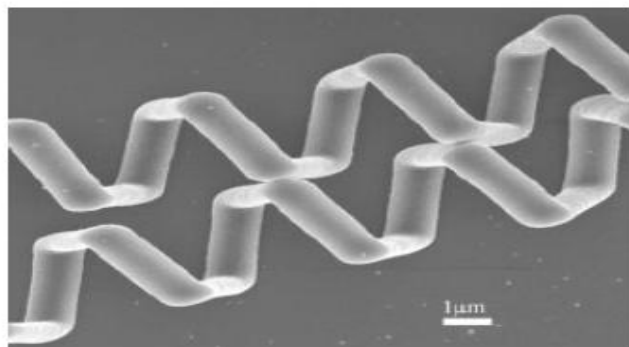
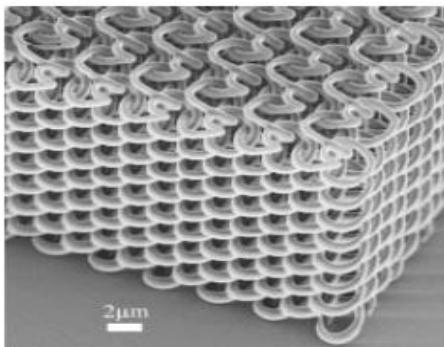
که در آن $k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$ متناظر با عدد موج در خلأ است. در واقع باید توجه شود که برای بدست آوردن میدان های الکتریکی و مغناطیسی لازم نیست هر دو معادله را حل کرد، بلکه کافی است یکی از آنها را حل کرد و برای بدست آوردن دیگری از معادلات ماکسول استفاده نمود. ولی در مسائل یک بعدی و دوبعدی معمولاً یکی از معادلات (۱۷-۱) به فرم نرده ای ساده میشود و حل آن بسیار آسانتر می گردد. در این حال بسته به کمیت نرده ای شده قطبش الکتریکی یا مغناطیسی مورد تحلیل قرارمیگیرد. نیز میتوان نشان داد که اصولاً L_H عملگری خودالحاق است در حالیکه لزوماً L_E اینچنین نیست.

۳-۱- نحوه ساخت بلور فوتونی و آرایه های مبتنی بر آن

پس از پیش بینی وجود شکاف فوتونی در سه بعد که در سال ۱۹۸۷ مستقلاً توسط جان [۱۰] و یابلونوویچ [۱۱] انجام پذیرفت اولین ساختاری که توانست عملاً آن را به نمایش بگذارد توسط هو و دیگران [۱۲] در ۱۹۹۰ گزارش شد که بر مبنای

هندسه ی بلور الماس طراحی شده و دارای نسبت شکاف برابر ۲۹ درصد بود. یکسال بعد یابلونوویچ ساختار معکوسی شبیه به بلور الماس ارائه کرد که به یابلونوویت مشهور شد [۱۳]. به دنبال آن ساختارهای بسیار گوناگونی ارائه شدند که عموماً از نظر وجود فن آوری ساخت و یا نسبت شکاف مطلوب نبودند. امروزه ساخت یابلونوویت با فرآیندهای تراش الکتروشیمیایی و باریکه ی متمرکز یونی، به همراه پرتونگاری باریکه ی الکترونی انجام می پذیرد. تراش باریکه ی متمرکز یونی امکان ایجاد سوراخهایی با عمق زیاد و نسبت منظر بسیار بزرگ را فراهم می کند، به گونه ای که سوراخهایی کاملاً استوانه ای و نه مخروطی بر جای می گذارد.

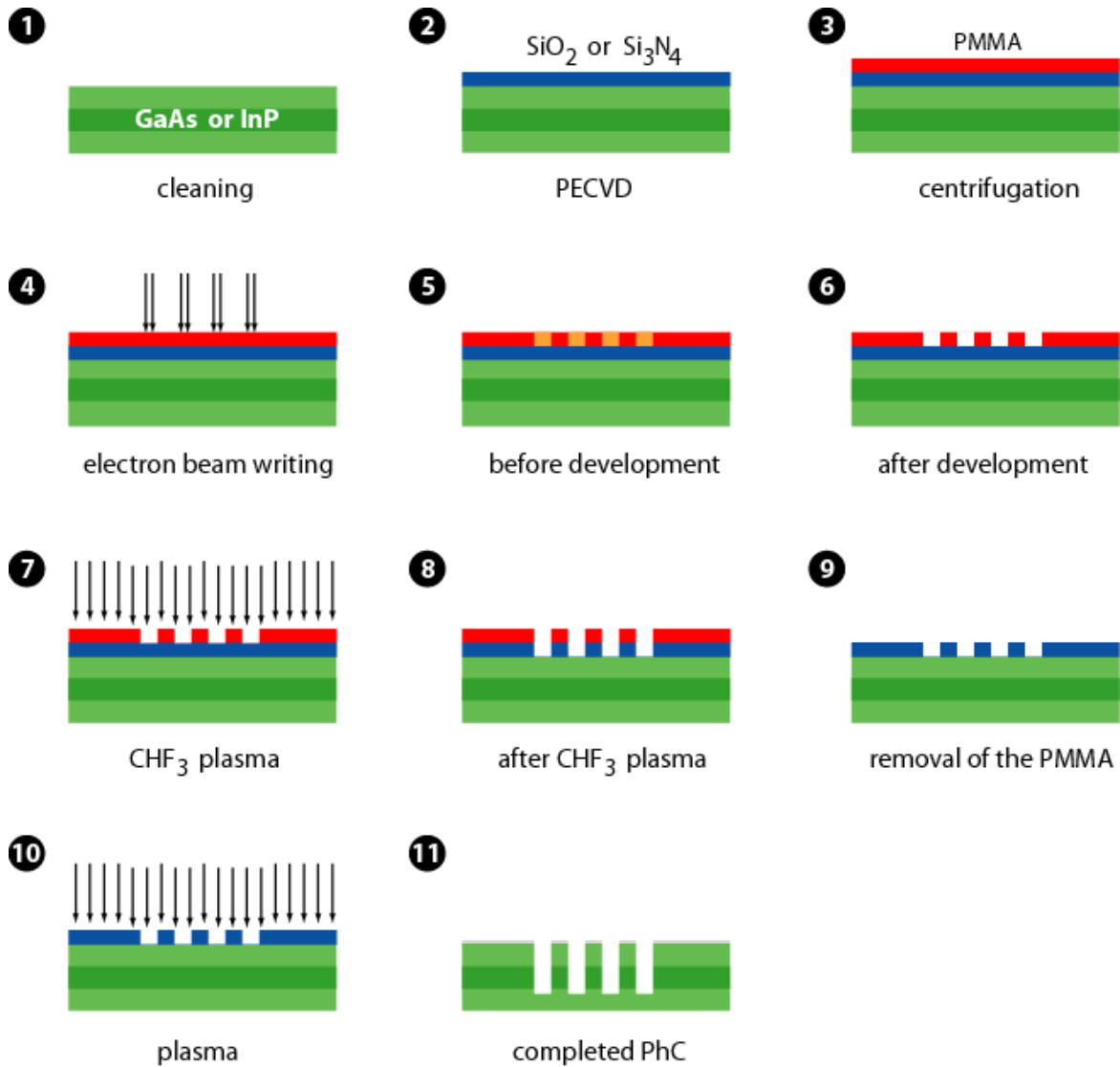
اما با ساختار افزازه ی چوبی [۱۴] در سال ۱۹۹۴ دسترسی به یک ساختار فوتونی سه بعدی با نسبت شکاف قابل قبول و عدم پیچیدگی در فنآوری ساخت حتی تا مقیاس مورد نیاز برای طول موجهای مخابراتی فیبر نوری میسر شد. در حقیقت سادگی ساخت این ساختار از فرم لایه لایه ی آن ناشی می شود فرآیند لایه لایه در رشد این ساختار امکان ایجاد نقص در شبکه را نیز نسبتاً به سهولت فراهم می کند، در حالی که این ویژگی در یابلونوویت به سادگی در دسترس نیست. در سال ۲۰۰۱ تودر و جان [۱۶] پس از محاسبات مفصل ساختار پیچیده ای به نام مارپیچ درهم بافته را ارائه کردند که دارای شکاف فوتونی کامل بود. ولی فن آوری ساخت چهار سال بعد، و با تکیه بر روش مدرن پرتونگاری دو فوتونی یا نوشتن مستقیم لیزری محقق شد [۱۷].



شکل (۱-۱۰): تصویر میکروسکوپ الکترونی از ساختار واقعی مارپیچ درهم بافته در طیف فرسوخ [۱۷]

امروزه روش ساخت آرایه های بلور فوتونی بسیار متنوع است و بسته به آنکه از بلور فوتونی در چه افزاره ای و به چه منظوری استفاده می کنیم روش ها فرق میکنند. مثلاً در ساخت یک موجبر بلور فوتونی یک سری فرایندهای خاص و در ساخت حفره تشدید در آرایه بلور فوتونی یک سری فرایندهای دیگری وجود دارد اما بطور مشترک از میان فرآیندهایی که در ساخت

بلورهای فوتونی استفاده می شوند میتوان به هولوگرافی ، نگاشت X، پرتونگاری لایه به لایه، پرتونگاری تداخلی موج آپالها، آپالهای وارون، کولوئیدی، اشاره نمود. بطور مثال در زیر مراحل ساخت یک تیغه بلور فوتونی آمده است.



شکل (۱۱-۱): مراحل ساخت یک آرایه بلور فوتونی [۵].

بعد از مراحل اولیه تمیز کردن سطح ویفر روی آن لایه ای از اکسید سیلیسیم یا نیتريد سیلیسیم نشانده میشود سپس لایه ای با ویژگی حساس به برخورد الکترون بنام PMMA در روی آنها قرار میگیرد تا بتوان طرح مربوطه را از طریق پرتونگاری

باریکه ی الکترونی روی آن ایجاد کرد. بعد از ایجاد طرح و لایه برداری در CHF_3 به مرحله (۹) در شکل بالا میرسیم که در آن لایه PMMA حذف شده است. در آخرین مرحله لایه اکسید با روش (ICP-RIE) و با گاز $\text{SiCl}_4 - \text{Ar}$ حذف میشود و آنچه باقی می ماند یک تیغه بلور فوتونی است.

۴-۱- کاربردهای بلور فوتونی

کاربردهای بلورهای فوتونی در طول دهه ی گذشته به سرعت در حال گسترش بوده است. از آن میان به برخی از جدیدترین و مهمترین ها اشاره می کنیم. کاربرد بلور فوتونی میتواند از ساختارهای چون موجبر، فیبر نوری، فیلتر نوری، کوپلرها، تشدید گر ها، مالتی پلکسردی مالتی پلکسر و تاخیر دهنده ها شروع شده و تا مباحثی چون طراحی گیت های اپتیکی، فلیپ فلاپ های نوری، ترانزیستور های نوری و مدارهای مجتمع اپتیکی پیش رود. این زمینه از کاربرد بلورهای فوتونی تا حدی جدی است که بلور فوتونی را نماینده ای برای ترانزیستورهای ماس در آینده می دانند بطوریکه کل سیستم نوری باشد و عده ای حتی بحث "photonic vlsi" را هم قابل طرح می دانند. گفتنی است امروزه ساختارهای بلور فوتونی برای پیاده سازی برخی عملگرهای کوانتومی مانند هادامارد استفاده شده است. در این گفتار سعی می شود به چند مورد از موارد ذکر شده پرداخته شود.

یکی از مهمترین کاربردهای بلورهای فوتونی در مخابرات فیبر نوری است. ویژگی منحصر به فرد بلورهای فوتونی در انعکاس کامل نور هنگامی که فرکانس آن در شکاف فوتونی قرار دارد امکان کاهش تلفات در غلاف فیبر را بطور چشم گیری افزایش می دهد. همچنین لزومی ندارد که نور در دی الکتریک انتشار یابد بلکه می توان در واقع نور را در داخل خلأ یا هوا با فشار کم هدایت نمود که در اینصورت اثرات غیر خطی و تلفات فیبر به حد بسیار ناچیزی می رسد. به این خانواده از فیبرهای بلور فوتونی فیبر سوراخدار گفته می شود. از آن جایی که امکان طراحی مناسب نمودار پاشندگی همزمان با طراحی فیبر بلور فوتونی وجود دارد، عملاً می توان اثرات اتلاف، تغییرات قطبش، و اثرات غیر خطی را به حدی کاهش داد که مخابرات فیبر نوری بین هر دو نقطه از سطح کره زمین بدون احتیاج به تقویت کننده یا تکرار ساز میسر گردد.

