دانشکده فیزیک

گروه حالت جامد و الکترونیک

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته فیزیک

عنوان

محاسبه ساختار باند بلورهای فوتونی دو بعدی با استفاده از روش Finite Difference Time Domain (FDTD)

استاد راهنما

دکتر منوچهر کلافی

استاد مشاور

مهندس بهروز رضائی

پژوهشگر

خلیل داداشی

مهر ۱۳۸۷

بسم الله الرحمن الرحيم

سپاسگزاری

حکیم هستی بخش را شاکرم که توفیق انجام این پژوهش را به من عطا فرمود.

از استاد راهنمای فرزانه و بزرگوارم جناب آقای پروفسور منوچهر کلافی به خاطر راهنمائیهای ارزنده و صبر و حوصله بی دریغشان صمیمانه سپاسگزارم.

دوست بسیار ارجمندم جناب آقای مهندس بهروز رضائی با شکیبائی تمام در انجام این پژوهش یاورم بوده و کمک ایشان بسیار بیشتر و ارزشمندتر از مشاوره بوده است. برای ایشان شادکامی و بهروزی آرزومندم.

از جناب آقای دکتر علی سلطانی والاکه مشوق بنده در تمام مراحل انجام پژوهش بوده اند و در نهایت نیز با دقت فراوان داوری پایان نامه را عهده دار شدند کمال امتنان را دارم.

از دوست عزیزم جناب آقای مهندس وحید سیاهپوش که در ابتدای کار از کمکهایشان بهره برده ام صمیمانه سپاسگزارم.

بر خود لازم می دانم که از ریاست، اساتید، دانشجویان و همکاران عزیزم در پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره شناسی و دانشکده فیزیک که در طول این دوره تحصیلی مرا یاری رسانده اند از صمیم قلب سپاسگزاری نمایم.

دعای خیر پدر و مادر در تمام دوران زندگی چراغ راهم و روشنی بخش زندگیم بوده است. دستان پر مهر و صورت زیبایشان را به خاطر تلاشهای بی دریغشان برای خانواده خاضعانه می بوسم.

و در پایان، سپاس بیشمار خود را به همسر قدرشناس، معلم زحمتکش، لیلای خوب زندگیم و همچنین فرشته زندگی مشترکمان، کتایون نازنینم نثار نموده و این مجموعه را تقدیمشان می دارم.

خلیل داداشی، مهر ۱۳۸۷

نام خانوادگی دانشجو: داداشی **نام** : خلیل

عنوان پایان نامه : محاسبه ساختار باند بلورهای فوتونی دو بعدی با استفاده از روش Finite Difference Time Domain (FDTD)

استاد راهنما: دکتر منوچهر کلافی

استاد مشاور: مهندس بهروز رضایی

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته :** فیزیک **گرایش :** حالت جامد

دانشگاه : تبریز **دانشکده :** فیزیک **تاریخ فارالتحصیلی:** مهر ۱۳۸۷

تعدادصفحات : ۹۱

کلید واژه ها (واژه هایی که بیانگر موضوع پایاننامه است):

بلور فوتونی ، ساختار باند ، الگوریتم Yee ، روش تفاضل متناهی ـ حوزه زمان .

چکیده:

بلورهای فوتونی ساختارهای دی الکتریک متناوب هستند که بطور مصنوعی ساخته می شوند و در تشابه با نیمه هادیها دارای یک ناحیه ممنوعه فرکانسی می باشند . انتشار امواج در این ناحیه که به گاف نواری فوتونی معروف است ممنوع می باشد. همانطوریکه در بلورهای معمولی تناوب پتانسیل شبکه باعث ایجاد باندهای مجاز و ممنوع انرژی برای الکترونهای سیستم می شود ، در بلورهای فوتونی نیز تناوب در مواد دی الکتریک باعث بوجود آمدن نواحی مجاز و ممنوع فرکانسی برای انتشار نور در این سیستمها می گردد. شکل هندسی بلور فوتونی و اختلاف ثابت دی الکتریک خواص اپتیکی آن را معین می کنند. با تغییر این دو پارامتر می توان نواحی مجاز و ممنوع فرکانسی برای انتشار نور را بدست آورد. خواص جالب بلورهای فوتونی از وجود گاف نواری فوتونی آنها ناشی می شود، محاسبه این گاف نواری نقطه شروع خوبی برای مطالعه چنین ساختارها می باشد. برای بدست آوردن گاف نواری فوتونی، لازم است رابطه پاشندگی، $\omega(k)$، یا ساختار باند فوتونی را محاسبه کنیم. روش متداول برای محاسبه ساختار باند فوتونی روش بسط موج تخت می باشد. اما اگر مواد تشکیل دهنده بلورهای فوتونی مثلاً فلز یا مواد غیر خطی باشند، این روش کار آیی نخواهد داشت. در مقابل روش دیگری مانند روش Finite Difference Time Domain (FDTD) وجود دارد که ضمن شبیه سازی انتشار امواج الکترومغناطیس در بلورهای فوتونی، قادر است انتشار در هر نوع محیط و شرایط را بررسی نماید. بدین ترتیب این روش قادر است علاوه بر محاسبه ساختار باند بلورهای فوتونی، امکان تاثیر ناخالصی های مختلف در ساختار باند را که کاربردهای فراوانی دارد نیز محاسبه نماید. استفاده از این روش مستلزم نوشتن برنامه های کامپیوتری بسیار پیچیده می باشد و معمولاً از نرم افزارهای آماده در این مورد استفاده می شود.

در این پایان نامه سعی شده است که برنامه های کامپیوتری جداگانه برای محاسبه ساختار باند بلورهای فوتونی یک و دو بعدی با استفاده از روش FDTD نوشته شود. نتایج بدست آمده با نتایج روش بسط موج تخت مقایسه گردیده که تطابق بسیار خوبی حاصل شده است که نشانگر صحت و دقت برنامه های ارائه شده می باشد.

در ابتدا با استفاده از روش FDTD و تابع دی الکتریک وابسته به مکان، انتشار امواج الکترومغناطیس در فضای آزاد، محیط آمیخته و بلور فوتونی یک و دو بعدی شبیه سازی گردیده است. برای محاسبه ساختار باند بلورهای فوتونی با استفاده از این روش، حوزه محاسباتی را سلول واحد اولیه در نظر می گیرند سپس از مقادیر میدانهای الکترومغناطیس در سلول اولیه نسبت به زمان تبدیل فوریه گرفته می شود تا مقادیر میدانها در حوزه فرکانس مشخص گردد. از روی این مقادیر جدید، تابع چگالی طیفی یا چگالی انرژی الکترومغناطیسی محاسبه می شود. با رسم تابع چگالی طیفی بر حسب فرکانس و تعیین فرکانسهای مربوط به پیکهای ظاهر شده، ساختار باند بلور فوتونی بدست می آید.

فهرست مطالب

فهرست مطالب

عنوان صفحه

مقدمه ۱

فصل اول : بررسی منابع ۳

مقدمه ٤

۱-۱- تاریخچه ٦

۱-۲- انواع بلورهای فوتونی ۷

۱-۳- اهمیت بلورهای فوتونی و کاربرد آنها ۹

۱-۳-۱- کاواکها ۱۰

۱-۳-۲- موجبرها ۱۲

۱-٤- ساخت بلورهای فوتونی ۱٦

۱-۵- مدلهای تئوری برای بررسی بلورهای فوتونی ۱۸

۱-٦- شبکه مستقیم و وارون ۱۹

۱-۷- معادله ویژه مقداری ۲۲

۱-۸- ساختار باند فوتونی ۲۷

۱-۸-۱- ساختار باند بلورهای دو بعدی ۲۹

۱-۸-۲- شبکه مربعی ۳۰

فصل دوم : مبانی و روشها (روش FDTD) ۳۵

مقدمه ۳۶

۲-۱- مزایای روش FDTD ۳۸

۲-۲- حل معادله موج اسکالر یک بعدی با استفاده از روش FDTD ۳۹

۲-۲-۱- حل تحلیلی معادله موج اسکالر یک بعدی ۳۹

۲-۲-۲- حل عددی معادله موج اسکالر یک بعدی ۴۰

۲-۳- معادلات ماکسول ۴۴

۲-۴- الگوریتم Yee ۴۶

۲-۵- معادلات ماکسول محیط همگن ۵۱

۲-۵-۱- حالت یک بعدی ۵۲

۲-۵-۲- حالت یک بعدی ۵۳

۲-۶- شرایط مرزی ۵۴

۲-۶-۱- شرط مرزی جذبی ۵۴

۲-۶-۲- شرط مرزی تناوبی ۵۶

فصل سوم : بحث و نتیجه گیری ۵۷

مقدمه ۵۹

۳-۱- انتشار امواج الکترو مغناطیسی در یک بعد ۵۹

۳-۱-۱- انتشار یک بعدی امواج الکترومغناطیسی در فضای آزاد بدون شرط مرزی ٦٢

۳-۱-۲- انتشار یک بعدی امواج الکترومغناطیسی در فضای آزاد با شرط مرزی جذبی ٦٤

۳-۱-۳- انتشار یک بعدی امواج الکترومغناطیسی در فضای غیر همگن با شرط مرزی جذبی ٦٨

۳-۲- محاسبه ساختار باند بلور فوتونی یک بعدی ۷۰

۳-۳- انتشار امواج الکترو مغناطیسی در دو بعد ۷۸

۳-۳-۱- انتشار دو بعدی امواج الکترومغناطیسی در فضای آزاد بدون شرط مرزی ۷۹

۳-۳-۲- انتشار دو بعدی امواج الکترومغناطیسی در فضای غیر همگن ۸۱

۳-٤- محاسبه ساختار باند بلور فوتونی دو بعدی ۸۲

۳-۵- نتیجه گیری و پیشنهادات ۸۷

فهرست منابع ۸۸

فهرست شکلها

عنوان صفحه

شکل ۱-۱ : مثالهای ساده از بلورهای فوتونی یک ، دو و سه بعدی ۷

شکل ۱-۲: کاواکهای ایجاد شده در بلور فوتونی در اثر نقص های نقطه ای ۱۱

شکل ۱-۳ : ساختار نوار یک بلور فوتونی دو بعدی که دارای یک تراز فرکانسی در داخل گاف فوتونی می باشد ۱۱

شکل۱-٤: موجبر معمولی ۱۲

شکل ۱-۵ : نحوه انتشار نور در داخل موجبر معمولی ۱۳

شکل ۱- ٦: اتلاف نور در انتهای خمیده موجبر..... ۱٤

شکل ۱-۷: موجبر بلور فوتونی ۱۵

شکل ۱-۸ : موجبر های خمیده ایجاد شده در داخل بلور فوتونی..... ۱۵

شکل ۱-۹ : بلور فوتونی دوبعدی با شبکه مربعی شامل میله های دی الکتریک ۱۷

شکل ۱-۱۰ : بلور فوتونی دوبعدی شامل ستونهای هوا در شبکه مثلثی در زمینه دی الکتریک ۱۷

شکل ۱-۱۱ : نقاط شبکه یک شبکه فضایی دوبعدی. ویاخته بسیط شبکه فضایی سه بعدی..... ۲۰

شکل ۱-۱۲ : بلورهای فوتونی یک ، دو و سه بعدی، مناطق اول بریلوئن و کاهش یافته بریلوئن مربوطه ۲۲

شکل ۱-۱۳ : ترکیبی از نواحی ماکروسکوپی با مواد دی الکتریک همگن ۲۳

شکل ۱-۱٤ : شبـکه مربعی در فضای حقیقی ۳۱

شکل ۱-۱۵ : ناحیه بریلوئن اول برای شبکه مربعی ۳۲

شکل۱-۱٦ : ساختار باند فوتونی شبکه مربعی متشکل از حفره های هوا ۳٤

شکل۲-۱ : موقعیت مولفه های برداری میدانهای الکتریکی و مغناطیسی شبکه فضایی Yee ٤٦

شکل ۲-۲: نمودار فضا-زمان الگوریتم Yee برای انتشار موج یک بعدی ٤۸

شکل ۲-۳: حوزه محاسباتی دوبعدی دکارتی Ω با مرز $\partial\Omega$ که شرط مرزی جذبی ABC روی آن اعمال می شود ۵۵

شکل ۳-۱:نحوه محاسبه میدانها در فرمولبندی FDTD یک بعدی ٦۰

شکل ۳-۲: ضعیت میدانهای الکتریکی و مغناطیسی یعد از گذشت صد قدم زمانی در حالت بدون شرط مرزی ٦۳

شکل ۳-۳: پالسها بعد از ۲۳۰ قدم زمانی به مرز می رسند. ٦۳

شکل ۳-٤: پالسها بعد از ۳۰۰ قدم زمانی با انعکاس از مرزها بطور کامل به داخل حوزه محاسباتی منعکس می شوند. ٦٤

شکل ۳-۵: نمایش نحوه اعمال شرط مرزی جذبی در سمت چپ حوزه محاسباتی ٦٦

شکل ۳-٦: وضعیت میدانهای الکتریکی و مغناطیسی یعد از گذشت صد قدم زمانی با شرط مرزی جذبی ٦٦

شکل ۳-۷: پالسها بعد از ۲۳۰ قدم زمانی در حال عبور از مرز هستند ٦۷

شکل ۳-۸: پالسها بعد از ۳۰۰ قدم زمانی بطور کامل از حوزه محاسباتی خارج شده اند ٦۷

شکل ۳-۹: وضعیت میدانهای الکتریکی و مغناطیسی در فضای غیر همگن با شرط مرزی جذبی. ٦۹

شکل ۳-۱۰: پالس در حال عبور از هوا به دی الکتریک است. ٦٩

شکل ۳-۱۱: وضعیت پالسهای عبوری و منعکس شده بعد از ۱۰۰ قدم زمانی ۷۰

شکل ۳-۱۲ : حوزه محاسباتی (سلول اولیه) برای محاسبه ساختار باند بلور فوتونی یک بعدی .. ۷۱

شکل ۳-۱۳ : منحنی چگالی طیفی برای بلور فوتونی یک بعدی به ازاء $k = 0.2$ برای گام زمانی $T = 1000$. ۷٤

شکل ۳-۱٤ : منحنی چگالی طیفی برای بلور فوتونی یک بعدی به ازاء $k = 0.2$ برای گام زمانی $T = 2000$ ۷٤

شکل ۳-۱۵ : منحنی چگالی طیفی برای بلور فوتونی یک بعدی به ازاء $k = 0.2$ برای گام زمانی $T = 3000$ ۷۵

شکل ۳-۱٦ : منحنی چگالی طیفی برای بلور فوتونی یک بعدی به ازاء $k = 0.2$ برای گام زمانی $T = 6000$. ۷۵

شکل ۳-۱۷ : منحنی چگالی طیفی برای بلور فوتونی یک بعدی به ازاء $k = 0.2$ برای گام زمانی $T = 12000$. ۷٦

شکل ۳-۱۸ : منحنی چگالی طیفی برای بلور فوتونی یک بعدی به ازاء $k = 0.2$ برای گام زمانی $T = 15000$ ۷٦

شکل ۳-۱۹ : منحنی چگالی طیفی برای بلور فوتونی یک بعدی به ازاء $k = 0.2$ برای گام زمانی $T = 18000$ ۷۷

شکل ۳-۲۰ : ساختار باند بلور فوتونی یک بعدی ۷۷

شکل ۳-۲۱ : انتشار موج الکترومغناطیسی در فضای آزاد دو بعدی بعد از ۱۰۰ قدم زمانی ۸۰

شکل ۳-۲۲ : انتشار موج الکترومغناطیسی در فضای آزاد دو بعدی بعد از ۳۰۰ قدم زمانی ۸۰

شکل ۳-۲۳ : انتشار موج الکترومغناطیسی بعد از ۱۰۰ قدم زمانی در حالتی که قسمتی از فضای دو بعدی را دی الکتریک پر کرده است. ۸۱

شکل ۳-۲٤ : نمایش شماتیک حوزه محاسباتی برای محاسبه ساختار باند بلور فوتونی دو بعدی. ۸۲

شکل ۳-۲۵ : حوزه محاسباتی برای محاسبه ساختار باند بلور فوتونی دو بعدی ۸۳

شکل ۳-۲٦ : منحنی چگالی طیفی برای نقطه ای از مسیر $\Gamma - X$ برای گام زمانی $T = 18000$ ۸٤

شکل ۳-۲۷ : منحنی چگالی طیفی برای نقطه ای از مسیر $X - M$ برای گام زمانی $T = 18000$ .. ۸٤

شکل ۳-۲۸ : منحنی چگالی طیفی برای نقطه ای از مسیر $M - \Gamma$ برای گام زمانی $T = 18000$ ... ۸۵

شکل ۳-۲۹ : ساختار باند بلور فوتونی دو بعدی برای مد TM با استفاده از روش FDTD..... ۸٦

شکل ۳-۳۰ : ساختار باند بلور فوتونی دو بعدی برای مد TM با استفاده از روش PWE..... ۸٦

مقدمه

بلورهای فوتونی به خاطر خواص فیزیکی جدید وکاربردهای بالقوه شان از دهه گذشته مورد توجه زیادی واقع شده اند و هر ساله هزاران مقاله با عنوان یا واژه کلیدی بلور فوتونی منتشر می شود. بررسی خواص فیزیکی و چگونگی کاربرد بلورهای فوتونی مستلزم شناخت ساختار باند آنها و بررسی نحوه انتشار امواج الکترومغناطیس در آنها می باشد.

برای بررسی عددی بلورهای فوتونی روشهای مختلفی بکار می رود. روش *FDTD* کامل ترین روش برای بررسی نحوه انتشار امواج الکترومغناطیس در بلورهای فوتونی است. این روش بر خلاف روشهای دیگر که صرفاً روشهای محاسباتی هستند ، یک روش شبیه سازی است که نیازمند محاسبات طولانی و زمان بر می باشد. شبیه سازی بلورهای فوتونی با روش *FDTD* مستلزم شناخت الگوریتم مربوط به آن (معروف به الگوریتم *Yee*) می باشد. روش *FDTD* در سال ۱۹٦٦ به وسیله *Yee* معرفی شد و از سال ۱۹۹۰ این مدل بندی و تکنیکهای مربوطه مورد استفاده قرار گرفته است.

روش مرسوم در محاسبه ساختار باند روش بسط موج تخت (*PWE*) بوده است. مدت زمان اجرا عامل اصلی در محاسبات عددی است. در روش موج تخت، زمان محاسبه متناسب با N^3 است که N نمایانگر اندازه سیستم است. بدلیل طولانی بودن محاسبات در این روش فیزیکدانان به دنبال روش جایگزین بوده اند که در آن، مدت زمان محاسبه در صورت امکان متناسب با N باشد که نهایتاً به روش *FDTD* روی آورده اند.

این پایان نامه در سه فصل تنظیم گردیده است. در فصل اول، ضمن معرفی بلورهای فوتونی، به خواص و بعضی از کاربردهای عمده آنها بطور خلاصه اشاره شده است. در ادامه این فصل ساختار باند بلورهای فوتونی و روشهای محاسبه آن معرفی شده است.

در فصل دوم، روش *FDTD* تا حدی که در این پایان نامه مورد استفاده بوده، معرفی شده است. روش مذکور یک روش محاسباتی و شبیه سازی می باشد که همه روزه گستره بکارگیری آن توسعه می یابد و غیر از فیزیک و مهندسی حوزه های دیگر علوم از قبیل پزشکی، هواشناسی و .... را در بر میگیرد. در حال حاضر از مشکلات پیش روی این روش پیچیدگی شرایط مرزی و زمانبر بودن محاسبات را می توان نام برد. در این پایان نامه از الگوریتم یک و دو بعدی *FDTD* استفاده شده است.

در فصل سوم، نتایج حاصل از محاسبات و شبیه سازیها با استفاده از نرم افزار ***MATLAB*** ارائه شده است. در هر دو مورد یک بعدی و دو بعدی، انتشار امواج الکترومغناطیس در فضای آزاد و محیط آمیخته (شامل فضای آزاد و دی الکتریک) شبیه سازی شده است. فضای محاسباتی برای محاسبه ساختار باند، سلول واحد از بلور بی نهایت می باشد. در ابتدا توزیع میدانها در این سلول محاسبه شده و با اعمال تبدیل فوریه نسبت به زمان مقادیر آنها از حوزه زمان به حوزه فرکانس منتقل گردیده است. از روی توزیع جدید، کمیت چگالی طیفی که همان تابع چگالی انرژی نسبت به فرکانس است، تعیین شده است. پیکهای موجود در نمودار چگالی طیفی بر حسب فرکانس برای مقدار معین بردار موج k ، نشانگر فرکانسهای ویژه بلور فوتونی در نقطه k می باشد. در این فصل نتایج بدست آمده برای نمودار ساختار باند با نتایج روش بسط موج تخت مقایسه گردیده و نتایج بسیار مطلوبی بدست آمده است.

فصل اول

بررسی منابع

بلورهای فوتونی

مقدمه

در قرن بیستم تلاش محققان بیشتر روی کنترل خواص الکتریکی مواد متمرکز بود. پیشرفتها در فیزیک نیم رساناها باعث شد که خواص رسانایی گروه مشخصی از مواد بهبود یافته و در نتیجه انقلاب ترانزیستور در الکترونیک آغاز گردد. تاثیر عمیقی که این پیشرفتها داشته اند قابل کتمان نیست. دانشمندان با استفاده از آلیاژهای جدید و سرامیکها، ابررساناهای گرم ودیگر مواد نا متعارف[1] را معرفی کرده اند که می توانند اساس تکنولوژی آینده را تشکیل دهند.

در چند دهه اخیر مرزهای جدیدی گشوده شده است . در اینجا هدف کنترل خواص اپتیکی مواد است. اگر ما بتوانیم مواد را طوری مهندسی کنیم که به امواج نور در محدوه معینی از فرکانسها پاسخ دهند، مثلاً آنها را کاملاً منعکس کنند، یا اجازه انتشار در مسیرهای معینی را بدهند و یا اینکه در حجم معینی محدود نمایند، در اینصورت پیشرفتهای تکنولوژیکی بزرگی می تواند اتفاق بیافتد. قبلاً کابلهای فیبر نوری که بسادگی نور را هدایت می کنند، صنعت مخابرات را متحول نموده اند. مهندسی لیزر ، پردازشهای خیلی سریع و طیف سنجی از حوزه هایی هستند که می توانند از پیشرفتها در مواد اپتیکی بهره مند شوند.

در واقع ، برای جواب به این پرسش که کدام رده از مواد می توانند ما را قادر به کنترل کامل انتشار نور نمایند به مقایسه با مواد الکترونیکی تکیه خواهیم کرد. یک بلور آرایه منظمی است از اتمها یا مولکولها . الگویی که بر طبق آن اتها یا مولکولها در فضا تکرار می شوند **شبکه** بلور می باشد. بلور

[1] -Exotic

یک پتانسیل متناوب را به الکترونی که در داخل آن حرکت می کند اعمال می کند . هم اجزاء سازنده بلور و هم ساختار شبکه هر دو خواص رسانایی بلور را تعیین می کنند.

حرکت الکترون که قبلاً به صورت یک معما در فیزیک مطرح بود توسط مکانیک کوانتمی حل گردید. در یک بلور رسانا الکترونها شبیه گاز پخشیده ای[1] از ذرات آزاد منتشر می شوند و توسط اجزاء سازنده بلور پراکنده نمی شوند. زیرا در مکانیک کوانتمی الکترونها مانند موج منتشر می شوند و امواج تحت شرایط معینی می توانند بدون پراکندگی منتشر شوند . البته ناخالصی ها و نقص شبکه باعث پراکندگی می گردند.

شبکه از انتشار امواج معینی نیز جلوگیری می کند. امکان دارد گافهایی در ساختار نواری انرژی بلور وجود داشته باشد به این معنی که الکترونها اجازه انتشار با انرژیهای معین و در جهات معین را ندارند. اگر پتانسیل شبکه به قدر کافی قوی باشد گاف می تواند تمام جهتهای ممکن انتشار را در بر گیرد، در نتیجه گاف نواری کامل بوجود می آید. برای مثال در یک نیم رسانا گاف نواری کامل بین باندهای انرژی ظرفیت و رسانش وجود دارد.

مشابه اپتیکی نیم رسانا **بلور فوتونی**[2] است که در آن اتمها و مولکولها توسط محیط ماکروسکوپیک با ثابت دی الکتریک متفاوت از محیط زمینه و همچنین پتانسیل متناوب با تابع دی الکتریک متناوب (یا بطور معادل ضریب شکست متناوب) جایگزین شده اند . اگر تفاوت ضریب دی الکتریک بین مواد بلور به قدر کافی بزرگ و جذب نور توسط آنها حداقل باشد، در نتیجه، شکست و بازتاب نور از تمام صفحات مشترک همان پدیده ای را برای فوتون (مدهای نور) تولید

[1] - Diffuse
[2] - Photonic Crystal

می کند که پتانسیل اتمی برای الکترون تولید می کند. در نتیجه بلورهای فوتونی نیز همانند نیم رساناها دارای گاف نواری فوتونیکی[1] می باشند.

۱-۱- تاریخچه

هر ساله هزاران مقاله با عنوان یا واژه کلیدی بلور فوتونی منتشر می شود. سوال این است که آیا بلور فوتونی صرفاً یک نام جدید برای یک حوزه قدیمی از تحقیقات است که به حدود ۱۲۰ سال قبل بر می گردد یا اینکه یک حوزه جدید است که با پدیدار شدن این نام شناخته شده است؟

ساده ترین شکل بلور فوتونی یک ساختار یک بعدی متناوب ، مانند یک فیلم چند لایه ای (آینه براگ) است . انتشار امواج الکترومغناطیس در چنین سیستمهایی ابتدا توسط لرد رایله[2] در سال ۱۸۸۷ مطالعه شد. وی نشان داد که این سیستمها دارای یک گاف نواری هستند. سیستمهای یک بعدی بطور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته و کاربردهایی یافتند که می توان بعنوان مثال اندود بازتابی[3] را نام برد. در این ساختارها نوار بازتاب متناسب با گاف نواری فوتونی است.

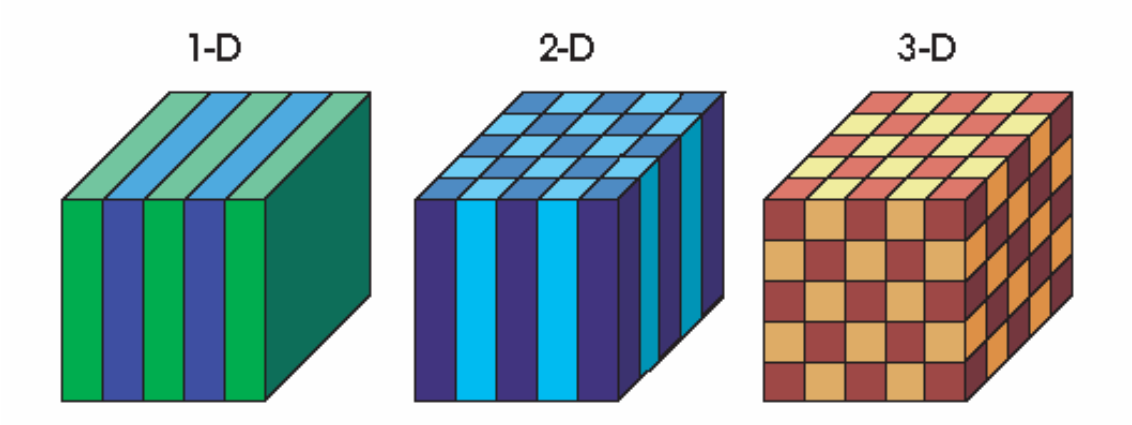
ساختارهای اپتیکی متناوب دو بعدی و سه بعدی ، بدون گاف نواری ، بصورت محدودی در دهه های هفتاد و هشتاد قرن بیستم مورد مطالعه قرار گرفتند. تا یکصد سال بعد از زمان لرد رایله امکان وجود بلورهای فوتونی دوبعدی و سه بعدی با گاف نواری مورد توجه قرار نگرفت تا اینکه در سال ۱۹۸۷ ایلی یابلونوویچ[4] و ساجیو جان[5] بطور مستقل این ساختارها را معرفی نمودند. واژه بلور

[1] - Photonic band gap
[2] - Lord Rayleigh
[3] - Reflecting coatings
[4] - Eli Yablonovitch
[5] - Sajeev John

فوتونی نیز در سال ۱۹۸۹ توسط یابلونوویچ و طی مقاله ای در شماره ٦٣ مجله PRL[1] نام گذاری شده و همچنین در این مقاله ساخت موفقیت آمیز یک گاف نوار فوتونی اعلام گردید[۲].

۱-۲- انواع بلورهای فوتونی

بلورهای فوتونی آرایش منظمی از مواد با ضرایب شکست متفاوت هستند و اساساً به سه گروه عمده **یک بعدی** ، **دو بعدی** و **سه بعدی** تقسیم می شوند (شکل ۱-۱). در واقع بلورهای فوتونی ساختارهای دی الکتریک متناوب هستند که بطور مصنوعی ساخته می شوند و در تشابه با نیمه هادیها دارای یک ناحیه ممنوع فرکانسی می باشند. بطوریکه انتشار امواج الکترومغناطیس در آن ناحیه خاص ممنوع می باشد.این ناحیه فرکانسی **گاف نواری فوتونی** نامیده می شود و متناظر با گاف نواری ویژه حالتهای الکترونی در نیمه هادیهاست.



شکل ۱-۱ : مثالهای ساده از بلورهای فوتونی یک ، دو و سه بعدی . رنگهای متفاوت نشان دهنده مواد با ثابت دی الکتریک متفاوت است. [۱].

در واقع هدف اصلی در مطالعه بلورهای فوتونی بررسی انتشار امواج الکترومغناطیس در این بلورها می باشد. همانطوریکه در بلورهای معمولی تناوب پتانسیل شبکه باعث ایجاد باندهای مجاز و

[1] - Physical Review Letters

ممنوع انرژی برای الکترونهای سیستم می شود ، در بلورهای فوتونی نیز تناوب در مواد دی الکتریک باعث بوجود آمدن نواحی مجاز و ممنوع فرکانسی برای انتشار نور در این سیستمها می گردد.

شکل هندسی بلور فوتونی و اختلاف **ثابت دی الکتریک** خواص اپتیکی آن را معین می کنند. با تغییر این دو پارامتر می توان نواحی مجاز و ممنوع فرکانسی برای انتشار نور را بدست آورد. این نواحی فرکانسی **وابسته به مقیاس** نیز هستند. کاهش اندازه سلول اولیه بلور متناوب باعث می شود کل ناحیه فرکانسی به فرکانسهای بالاتر منتقل گردد. نتیجه خاصیت اخیر در این است که امکان طراحی بلور فوتونی از ناحیه میکروویو به نواحی مرئی و مادون قرمز فراهم می شود.

اولین مواد گاف نوار فوتونی (بلورهای فوتونی) از مواد دی الکتریک ساخته شدند. البته گروههای تحقیقاتی مختلف ساختارهای پیچیده ای را معرفی کرده اند. به عنوان مثال در ناحیه میکرو ویو اغلب مواد دی الکتریک ـ فلز به کار برده می شود. در این مواد آرایه متناوبی از میله های فلزی در هوا و یا در زمینه دی الکتریک قرار میگیرند. این بلورهای فوتونی خواص کاملاً متفاوتی در مقایسه با بلورهای فوتونی خالص حاوی دی الکتریک دارند. بلورهای فوتونی قابل تنظیم در محدوده میکرو ویو و مرئی نیز پیشنهاد شده است.

از آنجائیکه خواص جالب بلورهای فوتونی از وجود گاف نواری فوتونی آنها ناشی می شود، محاسبه این گاف نواری نقطه شروع خوبی برای مطالعه چنین ساختارها می باشد. برای بدست آوردن گاف نواری فوتونی، لازم است رابطه پاشندگی، $\omega(k)$، یا ساختار باند فوتونی را محاسبه کنیم. روش متداول برای محاسبه ساختار باند فوتونی روش بسط موج تخت می باشد. اما اگر مواد تشکیل دهنده بلورهای فوتونی مثلاً فلز یا مواد غیر خطی باشند، این روش کار آیی نخواهد داشت. در مقابل روش