چکیده

خواص اپتیکی بلورهای فوتونی دوبعدی متشکل از نانو استوانه‌های دی‌الکتریک با پوشش‌های فراماده و دی‌الکتریک در یک شبکه مربعی

به کوشش

نیلوفر معمار نهاوندی

پژوهش حاضر با هدف بررسی تاثیر خاصیت شنل پنهان‌ساز پلاسمونیکی دولایه متحدالمرکز بر یک استوانه دی‌الکتریک بی‌نهایت است، زمانی‌که این استوانه به عنوان سلول پایه در یک بلور فوتونی دوبعدی جایگزین یک استوانه دی‌الکتریک بدون پوشش با طول بی‌نهایت میگردد. هدف، بررسی و مقایسه طیف عبوری دو بلور فوتونی ذکر شده در حالت‌های مختلف است. برای این منظور ابتدا به توضیح مختصری در خصوص ساختار فراماده و رفتار آن در برابر موج الکترومغناطیسی، ویژگی‌ها و تحقق عملی آن می‌پردازیم و سپس به تفصیل کاربرد آن در کاهش سطح مقطع پراکندگی که دستاورد آن شفافیت یا نامرئی شدن نسبی استوانه دی‌الکتریک است را بررسی میکنیم . در رویکرد نخست پس از ارائه روش کاهش سطح مقطع پراکندگی برای یک استوانه همگن فراماده، این روش را برای اجسام بزرگتر از ابعاد نانومتر، مانند یک بلور فوتونی دوبعدی متشکل از N لایه استوانه‌های دی‌الکتریک همگن با دو لایه پوشش از فرامواد و دی‌الکتریک مورد بحث قرار می‌دهیم. در نهایت پس از محاسبه طیف عبوری به روش بسط موج تخت و شبیه‌سازی نتایج با نرم‌افزار Mathematica مشاهده میکنیم چگونه این تغییر ساختار سبب افزایش توان عبوری و شفاف شدن ساختار بلور فوتونی متشکل از استوانه‌های با پوشش دولایه می‌شود به این ترتیب که با تغییر پارامترهای ساختاری بلور شاهد حذف نوار توقف در برخی محدوده‌های فرکانسی و اضافه شده به محدوده طیف عبور، هستیم.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه..... ۶

۱-۱- نانو فناوری و ساخت فراماده..... ۷

۱-۲- نامرئی سازی پلاسمونیکی..... ۹

۱-۳- بلورهای فوتونی..... ۱۱

۱-۳-۱-کاربردهای بلورهای فوتونی..... ۱۴

۱-۴- معرفی قسمت‌های مختلف پایان‌نامه..... ۱۵

فصل دوم: معرفی فراماده و کاربرد آن در نامرئی سازی..... ۱۸

۲-۱-مقدمه..... ۱۹

۲-۲- معرفی فراماده..... ۱۹

۲-۲-۱- دسته بندی مواد و حوزه فرکانس فراماده..... ۲۰

۲-۳- تحقق عملی و کاربردهای فراماده..... ۲۴

۲-۳-۱- استفاده از فراموا‌د در کاهش سطح مقطع پراکندگی و نامرئی‌سازی.... ۲۴

۲-۴- پراکندگی موج تخت از سطح یک استوانه رسانا با پوشش فراماده.....۲۶

۲-۴-۱- قطبش TM_z.....۲۷

۲-۴-۲- شرایط مرزی مؤلفه‌های میدان الکتریکی.....۲۸

۲-۴-۳- شرایط مرزی مؤلفه‌های میدان مغناطیسی.....۲۹

۲-۴-۴- پاسخ همزمان میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی.....۳۰

۲-۵- بررسی شرایط شفافیت ساختار استوانه رسانا با پوشش فراماده.....۳۳

فصل سوم: شفاف سازی استوانه با پوشش دولایه.....۳۷

۳-۱- مقدمه.....۳۸

۳-۲- تحلیل نظری ساختار استوانه با پوشش دو لایه.....۳۹

۳-۲-۱- معادلات میدان، قطبش TM_z.....۴۰

۳-۲-۲- پاسخ هم‌زمان شرایط مرزی برای میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی..۴۶

۳-۳- بررسی شرایط شفاف سازی استوانه با پوشش دولایه، شرایط حذف پراکندگی.....۵۳

۳-۳-۱- حالت اول: زمانی که $\gamma^2 = \eta^2 = \zeta^2 > 0$.....۵۸

۳-۳-۲-حالت دوم: زمانی‌که $\eta^2 > 1$, $\gamma^2 > 1$, $\gamma^2 \neq \eta^2$.....۶۰

۳-۳-۳-حالت سوم: زمانی‌که $(\eta^2 > 0$, $\gamma^2 < 0)$ یا $(\eta^2 < 0$, $\gamma^2 > 0)$.....۶۲

۳-۴- جمع‌بندی روابط و نتایج ۶۶

۳-۵- نتایج شبیه‌سازی عددی..... ۶۶

فصل چهارم: بلور فوتونی دو بعدی متشکل از استوانه با دو لایه پوشش از فراماده و دی‌الکتریک..... ۷۳

۴-۱-مقدمه..... ۷۴

۴-۲- مفاهیم کاربردی بلور فوتونی..... ۷۵

۴-۲-۱-ثابت شبکه..... ۷۶

۴-۲-۲-منشاء و مفهوم نوار گاف فوتونی(PBG)..... ۷۶

۴-۳-بلور فوتونی دوبعدی..... ۷۸

۴-۴- طیف عبور در بلور فوتونی..... ۷۹

۴-۵- اساس روش بسط موج تخت در محاسبه طیف عبور..... ۸۰

۴-۵-۱- روابط ویژه مقداری در بلور فوتونی دو بعدی..... ۸۱

۴-۶- روش تئوری محاسبه طیف عبور و بازتاب براگ از یک بلور فوتونی دو بعدی..... ۸۷

۴-۶-۱- معادلات میدان- قطبش E..... ۹۰

۴-۶-۲- تبدیل فوریه تابع دی‌الکتریک در یک شبکه مربعی..... ۹۵

فصل پنجم: شبیه سازی ساختارهای بلور فوتونی با استوانه‌های پوشیده شده از فراماده و دی‌الکتریک..... ۱۰۱

۵-۱- مقدمه..... ۱۰۲

۵-۲- چگونگی شبیه سازی بلورهای فوتونی..... ۱۰۳

۵-۳- ثبت نتایج شبیه‌سازی..... ۱۰۵

۵-۴-نمودارهای توزیع میدان الکتریکی در بلور فوتونی ۱۵ لایه..... ۱۱۴

۵-۵- نتایج و پیشنهادات..... ۱۱۷

فهرست منابع..... ۱۱۹

پیوست‌ها..... ۱۲۵

چکیده به زبان انگلیسی..... ۱۴۹

فصل اول

مقدمه

۱-۱ نانو فناوری و ساخت فراماده

مروری بر روند جهت‌گیری نوع پروژه های پژوهشی، به خصوص در زمینه علوم مواد در طول دهه‌های اخیر نشان می‌دهد که از سال‌های پایانی دهه نهم قرن بیستم میلادی دانشمندان توجه خود را بر روی فناوری جدیدی معطوف کرده‌اند که به عقیده آن‌ها باعث بروز تحول جهشی جدیدی در مسیر تکامل زندگی بشر شده است. این فناوری جدید، فناوری نانو یا نانو تکنولوژی نام دارد که اگرچه دارای قدمتی بیش از ۲-۳ دهه نیست با این حال به دلیل تاثیرات مهمی که در طول یک دهه گذشته بر فعالیت‌های پژوهشی و ارتقای تولید گذاشته، جای خود را در میان کلیه شاخه‌های علوم اعم از صنایع الکترونیک، پزشکی و دارویی، انرژی، مواد، محیط زیست و غیره باز کرده است . در حقیقت کاربرد فناوری نانو از کاربرد عناصر پایه نشأت می‌گیرد.

نانو تکنولوژی در حوزه نور و نانو اپتیک دریچه‌ای را به مباحث جدید نظری وکاربردهای نو باز می‌کند. در نانو اپتیک و نانو فوتونیک امکان ساخت مواد مصنوعی پیشرفته با دست‌کاری قوانین حاکم بر برهمکنش نور با مواد و تقویت خواص اپتیکی آن‌ها فراهم می‌شود که حاصل تغییر در ساختار اتم‌ها و مولکول‌های مصنوعی است که اندازه‌ای در حد چند نانومتر دارند[۲-۱] و [۱۷] .از جمله این مواد پیشرفته صنعتی می‌توان به فرامواد نوری[۱] اشاره کرد که با بکارگیری تکنولوژی نانو به‌صورت مصنوعی ساخته می‌شوند و امکان مهندسی امواج الکترومغناطیس و ایجاد قابلیت جدید برای آن را به وجود آورده‌اند.

با توجه به ویژگی منحصر به فرد این ساختارها می‌توان از آن‌ها در کاهش سطح مقطع پراکندگی [۲]

[۱] Metamaterial

[۲] Scattering Cross Section

و پنهان سازی اشیا[۳] استفاده کرد، در نتیجه این مواد آرزوی دیرینه بشر برای نامرئی شدن را یک گام به واقعیت نزدیک‌تر کرده است[۷-۳].

در طی سال‌های اخیر پدیده نامرئی سازی یا استفاده از پوشش‌های نامرئی کننده به روش‌های مختلف از جمله تشدید جایگزیده غیر عادی [۴][۸]، تبدیل مختصات[۵] [۳]و [۱۱-۹]، حذف پراکندگی دوقطبی [۶][۱۶-۱۲]و غیره مورد بررسی قرار گرفته است. در این پایان نامه در دو بخش نخست تمرکز ما بر روی مدل‌هایی از نامرئی سازی است که بر روش کاهش سطح مقطع پراکندگی یا به‌طور کلی حذف پراکندگی است. در این روش هدف ممانعت از رسیدن اطلاعات شیء به ناظر است، روش نهایی پنهان‌سازی نسبی یا شفافیت[۷] عبارت است از عدم انعکاس نور یا جذب انرژی توسط جسمی که نور به آن تابیده شده است. در این روش هدف اصلی ساخت پوشش یا شنل‌های نامرئی سازی[۸] است که از مواد مصنوعی یا همان فراماد الکترومغناطیسی ساخته می‌شوند. در اینجا به اختصار چند ویژگی فراماده را بیان می‌کنیم[۱۷و۵].

۱. فراماد در طبیعت وجود ندارند و به‌صورت مصنوعی با به کار گیری تکنولوژی نانو ساخته می‌شوند.
۲. موادی همگن هستند که خصوصیات میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی مانند بزرگی و جهت میدان‌ها در تمام نقاط داخل ماده یکسان است.
۳. اگر ناهمگنی داشته باشند در حد میکروسکوپی و در ابعاد بسیار کوچک‌تر از طول موج است، ناهمگنی در مقیاس زیر طول موج در یک فراماده باعث می‌شود که کل ماده در ابعاد ماکروسکوپی یکنواخت یا همگن باشد.

---

[۳] Invisibility
[۴] Anomalous Localized Resonance
[۵] Coordinate Transformation
[۶] Dipolar Scattering Cancellation
[۷] Transparency Condition
[۸] Cloaking

۴. سلول واحد یک فراماده که به آن فرا-اتم[۹] یا فرا-مولکول[۱۰] می‌گویند باید کوچک‌تر از طول موج مورد استفاده باشد.

پیشینه استفاده از فراموا‌د نوری به قرن‌ها پیش بازمی‌گردد. برای مثال مواد تشکیل دهنده جام لیکارگوس[۱۱] که تاریخ آن مربوط به قرن چهارم پس از میلاد است اولین فراماده شناخته شده توسط بشر است. در این مواد که شیشه‌های یاقوتی هستند نانوذرات طلا وجود دارد زمانی‌که این جام توسط نور بازتابیده از آن دیده می‌شود سبز رنگ ولی زمانی‌که نور به آن بتابد و از آن عبور کند قرمز رنگ دیده می‌شود، شکل(۱-۱).

شکل(۱-۱) اگر به نور بازتابیده نگاه شود جام سبز رنگ و اگر به نور عبوری نگاه شود جام قرمز دیده می‌شود

۱-۲ نامرئی سازی پلاسمونیکی

پوشش‌های پلاسمونیکی یا همان شنل پلاسمونیک[۱۲]نوعی از نامرئی سازی است که بر مبنای کاهش سطح مقطع پراکندگی کل برای یک جسم و رساندن این مقدار به صفر می‌باشد که امروزه این روش در بین محققان بسیار رونق دارد. برای مثال اگر یک پراکننده استوانه‌ای به شعاع a و ثابت دی‌الکتریک ε_1, μ_1 داشته باشیم با قرار دادن پوششی از فراموا‌د به شعاع b و ضخامت $(b-a)$ روی آن و با

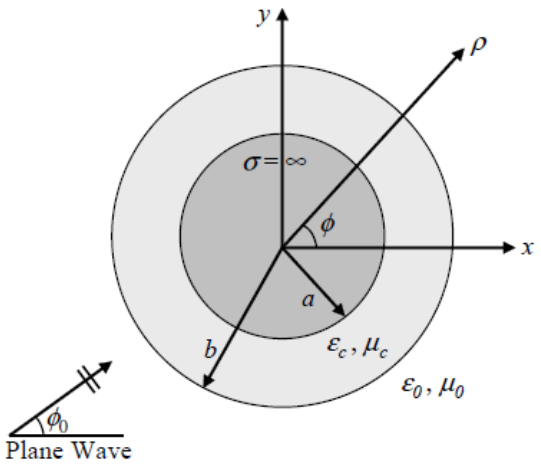
[۹] Meta-Atom

[۱۰] Meta-Molecule

[۱۱] Lycargus Cup

[۱۲] Plasmonic Cloaking

استفاده از نظریه پراکندگی مای[۱۳] به محاسبه سطح مقطع پراکندگی کل در این ساختار می‌پردازیم و با کمینه کردن این کمیت ویژگی‌های ساختاری و ضخامت لازم برای تحقق این پدیده را محاسبه می‌کنیم. شکل (۱-۲) ساختار هندسی این ابزار را بیشتر نمایان میکند[۱۸ و ۱۲] .



شکل(۱-۲) ساختاری از یک شی استوانه‌ای که پوششی از فراماده روی آن قرار گرفته است با تنظیم نسبت شعاع پوشش به شعاع هسته و انتخاب صحیح ضرایب دی‌الکتریک، سطح مقطع پراکندگی کل ساختار به صفر نزدیک می‌شود[۱۸].

پوشش مورد نظر معمولا از موادی با ضریب شکست منفی است یا ضریب شکست مثبت با پارامترهای ساختاری (ε, μ) بسیار کوچک، این روش برای ذرات با اشکال هندسی مختلف و ذرات با تعداد لایه‌های بیش از یک لایه توسط محققان بررسی شده است که در مراجع[۱۸ - ۱۲] و[۲۴-۱۹]و [۳۰-۲۵] قابل دسترسی هستند.

همان‌گونه که پیشتر بیان شد در این پایان‌نامه نخست به تعریف فراماده و محیط‌های چپ‌گرد می‌پردازیم سپس به بررسی و شناخت روش پوشش‌های پلاسمونی به منظور کاهش پراکندگی کل از نانو ذرات استوانه‌ای در حالت پوشش تک‌لایه فراماده برای استوانه PEC[۱۴] و پوشش دولایه از فراماده و دی‌الکتریک برای استوانه دی‌الکتریک میپردازیم و سپس با دست‌یابی به مشخصات هندسی

[۱۳] Mie Scattering

[۱۴] Perfect Electric Conductor

و فیزیکی لایه‌ها از آن‌ها در شبیه‌سازی خاصیت کاهش پراکندگی یا به اصطلاح نامرئی سازی استفاده می‌شود که با تغییر پارامترهای مختلف ساختاری از جمله ضخامت لایه‌ها و تعداد لایه‌ها به بهینه‌سازی عملکرد این روش خواهیم پرداخت، در مرحله نهایی کاربرد این نانوذرات استوانه‌ای کاور شده با پوشش‌های فراماده را به عنوان سلول پایه در یک بلور فوتونی دوبعدی با آرایه مربعی متشکل از N لایه بررسی خواهیم نمود که در نهایت با تغییر پارامترهای ساختاری بلور از جمله شعاع استوانه‌ها، سایز سلول واحد و تعداد لایه‌ها طیف عبوری از بلور را در حالت‌های استفاده ازشنل نامرئی ساز و بدون شنل با هم مقایسه میکنیم تا به یک روند کلی در طیف عبور دست پیدا کنیم. برای این منظور پس از تعریف مختصری که در خصوص پنهان سازی پلاسمونیکی داشتیم، به یک تعریف کلی از بلورهای فوتونی می‌پردازیم که یک دید کلی در خصوص روند انجام پایان‌نامه به خواننده بدهیم و سپس در بخش‌های پایان‌نامه به تفصیل به بررسی شرایط ذکر شده می‌پردازیم.

۱-۳ بلور فوتونی

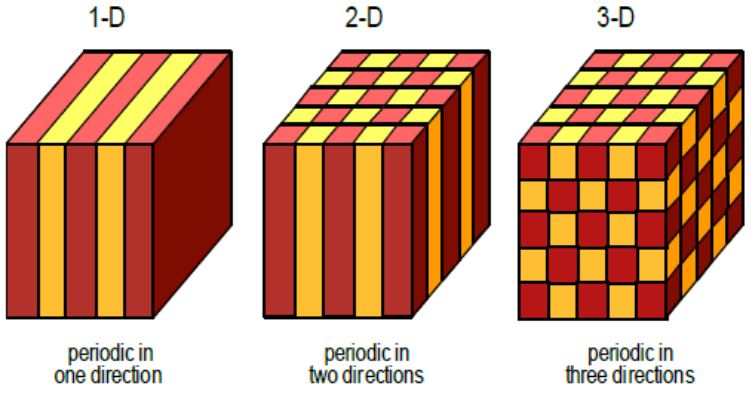
در اواخر دهه هشتاد میلادی گروه جدیدی از مواد مصنوعی به نام بلورهای فوتونی [۱۵]شناخته شدند که موضوع تحقیقات گسترده‌ای قرار گرفتند[۳۱] . امروزه توجه به قطعات نوری رو به فزونی نهاده که این امر مدیون خواص فوق‌العاده فوتون‌هاست که از جمله مزایای فوتون به الکترون می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱. سرعت حرکت فوتون‌ها برابر با سرعت نور است بنابراین سرعت انتقال اطلاعات بسیار افزایش می‌یابد، اگر ماده‌ای از جنس دی‌الکتریک داشته باشیم که دارای یک باند ممنوع برای فوتون‌ها باشد، در محدوده خاصی از فرکانس هیچ نوری قادر به حرکت درون ساختار بلوری ماده نمی‌گردد.
۲. تاثیر فوتون‌ها بر یکدیگر بسیار کمتر از تاثیر متقابل الکترون‌هاست که این امر موجب کاهش تلفات در دی‌الکتریک‌ها می‌گردد.

[۱۵] Photonic Crystals

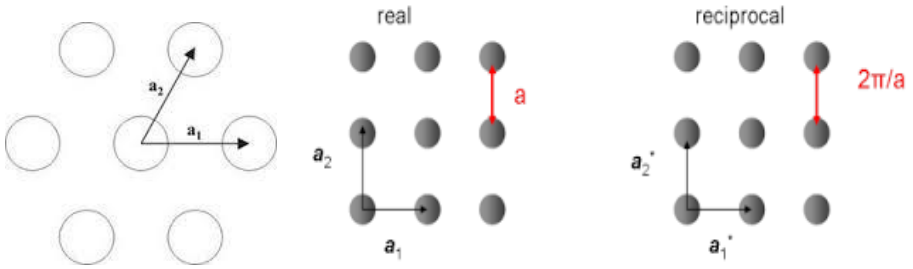
با وجود تمام این مزایا هنوز مدارهای تمام-نوری آن‌طور که باید جای خود را باز نکرده‌اند. علت این امر را می‌توان در دسترس نبودن موادی که قادر به هدایت مناسب فوتون‌ها باشند، وجود تلفات در قسمت‌های خم شده موجبرهای نوری و لیزر با استانه بالا ذکر نمود که تمام این مشکلات با استفاده از بلورهای فوتونی به علت توانایی بالقوه‌شان برای کنترل انتشار نور قابل حل است.

در تعریف کلی از بلورهای فوتونی می‌توان گفت موادی هستند که در آن‌ها ضریب شکست به طور متناوب در محدوده‌ای از مرتبه طول موج کاری تغییر می‌کند [۳۴-۳۲] ، که متناسب با تغییر ضریب شکست در راستاهای مختلف ابعاد بلور تعریف می‌شود که میتواند تک بعدی، دوبعدی یا سه بعدی باشد به عبارتی بُعد بلور فوتونی بیانگر آن است که ساختار در چند جهت متناوب است شکل(۱-۳).



شکل (۱-۳) نمای شماتیک برای بلورهای فوتونی مختلف که نشان‌دهنده متناوب بودن ساختارها در راستاهای مختلف است [۳۴]

در این میان مدل‌های دوبعدی این بلورها به دلیل سادگی ساخت و محاسبات تحلیلی و عددی بیش از نوع سه بعدی آن مورد توجه اند. در دو بعد بلور فوتونی را می‌توان مانند یک آرایه متناوب از دو دی‌الکتریک فرض نمود . دو گروه بلوری در دو بعد از اهمیت برخوردارند که در شکل (۱-۴) نمایش داده شده‌اند و عبارتند از ساختار بلوری مربعی و ساختار بلوری مثلثی.



شکل(۱-۴) نمایش دو هندسه پایه بلور فوتونی دو بعدی . دو شکل راست: ساختار مربعی در فضای حقیقی و معکوس ; شکل چپ ساختار مثلثی

مبحث بلورهای فوتونی ناشی از پیوند فیزیک حالت جامد و الکترومغناطیس است، ساختارهای بلور تابع فیزیک حالت جامدند که در بلور فوتونی امواج الکترومغناطیس جایگزین الکترون‌ها شده‌اند. اگرچه بلورهای فوتونی در واقع از سال ۱۸۸۷ مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، ولی عبارت بلورهای فوتونی برای اولین بار ۱۰۰ سال بعد، زمانی‌که الی یابلانوویچ [۱۶] مقاله مشهور خود در خصوص بلورهای فوتونی را در سال ۱۹۸۷ منتشر کرد، مورد استفاده قرار گرفت[۳۱]. پیش از آن بلورهای فوتونی یک بعدی به‌صورت فیلم‌های چند لایه متناوب از مواد دی‌الکتریک مورد مطالعه قرار گرفته بود هرچند به آن نام بلورهای فوتونی اطلاق نمی‌شد. ظهور مفهوم یک ماده با گاف فوتونی از مقایسه قراردادی بین معادلات انتشار شرودینگر و هلمهولتز و ارائه ایده‌ای برای تولید ساختارهای متناوب مصنوعی که به جای کنترل کامل انتشار نور بر روی نفوذپذیری تمرکز داشت در سال ۱۹۸۷ آغاز شد.

دو ویژگی مهم که خواص یک بلور فوتونی را مشخص می‌کند هندسه آن و اختلاف گذردهی موادی است که بلور را تشکیل داده‌اند. در صورتی‌که پراکننده‌های موجود در بلور فوتونی شکل هندسی مناسبی داشته باشند این احتمال وجود دارد که نورهای منعکس شده و شکسته شده در اثر برخورد با این پراکننده‌ها نه تنها نور پراکنده شده، بلکه نوری که در راستای ساختار در حال حرکت به جلو است را نیز از بین ببرند، در این وضعیت چون نور نمیتواند در راستای ساختار منتشر شود راهی به جز بازگشت و انتشار از بلور فوتونی ندارد به‌عبارتی ورود چنین نوری به بلور فوتونی ممنوع می‌باشد.

[۱۶] Eli Yablanovitch

این حالت بدون توجه به جهت تابش نور به بلور تنها در صورتیکه نور در محدوده خاصی از طول موج قرار داشته باشد، یعنی در محدوده باند ممنوع فوتونی، رخ می‌دهد، در صورت داشتن چنین محیط نفوذ ناپذیری در برابر نور می‌توان موج الکترومغناطیسی را به انواع مختلف هدایت کرد[۳۵-۳۳].

۱-۳-۱- کاربردهای بلورهای فوتونی

چنین ساختارهای دی‌الکتریکی با باند گاف کامل کاربردهای بسیاری از جمله:

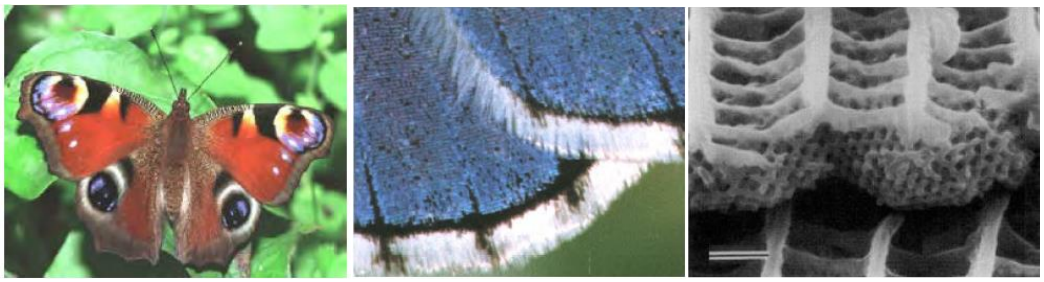
- ساخت آینه‌های دی‌الکتریک بدون اتلاف به عنوان قطبنده [۱۷]و کاواک‌های تشدیدی[۳۲].
- کاربرد موجبری در ساخت موجبرهای نوری با اتلاف کم[۳۷-۳۶].
- کاربرد در زمینه فیبر نوری و فیبرهای بلور فوتونی[۳۸].
- کاربرد فیلتری در زمینه مخابرات نوری و رزوناتورهای نوری
- لنزها و منشورهای بلور فوتونی[۴۰-۳۹]
- بلورهای فوتونی فعال در ساخت لیزر و نیمه‌هادی‌ها
- .....

بلورهای فوتونی در الکترونیک نوری عمدتاً به دو دلیل از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند: انعکاس کامل و مؤثر از بلور فوتونی در گاف فوتونی، که انعکاس کامل در گاف فوتونی موجب بازیافت مؤثر فوتون در کاواک‌ها می‌گردد در حالیکه به کمک چگالی حالات فوتونی صفر می‌توان اطمینان کسب کرد که آهنگ گسیل خود به خودی در گاف فوتونی دقیقاً برابر صفر است، لذا لیزرهای با جریان آستانه بسیار کوچک‌تر از جریان آستانه لیزرهای نیمه‌هادی معمول امکان‌پذیر می‌گردند.

با توسعه ابزارهای مشاهده و اندازه‌گیری ساختارهای کوچک، بویژه انواع میکروسکوپ های الکترونی مشخص شده که در ساختار بسیاری از مواد طبیعی، بلور های فوتونی به چشم می‌خورد از آن میان

[۱۷] Polarizer

می توان به بال پروانه، فلس نوعی ماهی به نام رنگین کمان دریاچه Kutubo[۱۸]، بسیاری از سنگ های معدنی بویژه گروه خاصی از آنها موسوم به Opal و غیره اشاره کرد.



شکل(۱-۵) کریستال فوتونی طبیعی موجود در بال پروانه- شکل وسط تصویر میکروسکوپ نوری از بال پروانه و شکل سمت راست تصویر میکروسکوپ الکترونی آن که تناوب ساختار بلور را نشان می دهند.

۱-۴-معرفی قسمت‌های مختلف پایان‌نامه

تمرکز اصلی این پایان نامه بر روی دو مبحث اصلی شنل‌های نامرئی ساز پلاسمونیکی و محاسبه طیف عبور یک بلور فوتونی دوبعدی متشکل از نانو استوانه‌های نامرئی شده به روش فوق در محدوده فرکانسی نور مرئی می‌باشد که به دلیل سادگی بیشتر در تمام پایان‌نامه محاسبات وشبیه‌سازی‌ها در دو بعد انجام شده است. فصول پایان‌نامه به شرح زیر است:

در فصل ۲ پایان‌نامه ابتدا به تشریح کامل فرامواد و محیط‌های چپ‌گرد پرداخته‌ایم و به عنوان مثالی از کاربرد این مواد سنتز شده ، شنل نامرئی ساز پلاسمونیکی تک لایه را با هندسه استوانه‌ای دو بعدی (استوانه نامحدود) مورد بررسی قرار میدهیم تا در نهایت شرایط شفاف سازی را بر حسب پارامترهای سیستم مانند ضخامت لایه‌ها و ضرایب دی‌الکتریک پوسته و هسته مرکزی به‌دست

[۱۸] Melanotaenia Lacustris

بیاوریم. درک مطالب کامل این فصل به دلیل اینکه در این فصل مبانی نظریه شفاف سازی با روش کاهش سطح مقطع پراکندگی کل به تفصیل بیان شده و همچنین تمام جزئیات محاسبات آورده شده است در درک بهتر مطالب فصول بعدی بسیار مؤثر خواهد بود.

فصل ۳ را به طور کامل به اولین مبحث پایان‌نامه یعنی کاربرد شنل نامرئی ساز پلاسمونی در دستیابی به شرایط شفافیت[۱۹] کامل برای یک استوانه دی‌الکتریک با طول بی‌نهایت و دو لایه پوشش که پوسته اول از جنس فراماده و پوسته دوم از جنس استوانه مرکزی است، اختصاص داده‌ایم. شرایط کمینه کردن سطح مقطع پراکندگی کل را با توجه به شرایط مختلف ضخامت لایه‌ها بررسی نموده‌ایم. آخرین بخش از این فصل نیز به شبیه سازی توزیع میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی و توزیع فاز میدان‌ها در حالت بدون شنل و با پوشش چند لایه از فراماده و دی‌الکتریک به صورت متناوب، اختصاص داده شده است روابط اثبات شده در فصل ۲ در درک بهتر روابط این فصل بسیار مؤثر است.

فصل ۴ که به دومین مبحث و بعبارتی کار اصلی پایان نامه اختصاص یافته است استفاده از استوانه دی‌الکتریک پوشیده شده از دو لایه پوسته، که در فصل ۳ به تفصیل مورد بررسی قرار گرفت، به عنوان سلول پایه در یک بلور فوتونی دو بعدی با آرایه مربعی است برای محاسبه طیف عبوری از این بلور و مقایسه با یک بلور معمول متشکل از استوانه‌های دی‌الکتریک با طول بی‌نهایت. در این فصل با بهره‌گیری از روش بسط موج تخت، موج فرودی و بازتابیده در سمت چپ بلور و موج تخت عبور یافته در سمت راست بلور را بسط می‌دهیم و با در نظر گرفتن شرایط مرزی مناسب برای حل مساله به سه معادله اصلی می‌رسیم که در نهایت صحت محاسبات خود را با انجام شبیه سازی‌هایی بوسیله نرم‌افزار Mathematica بررسی کرده‌ایم [۴۳]. بدین صورت میتوان طیف عبوری و بازتابی براگ را شبیه سازی نمود، که نتایج ارائه شده در این فصل در کنفرانس نانوفناوری ایران- اصفهان ۱۳۹۳ به صورت مقاله ارائه شده است. در نهایت نتایج استخراج شده از این فعالیت پژوهشی و همچنین پیشنهاداتی جهت پژوهش‌های آتی را در فصل ۵ جمع‌آوری کرده‌ایم .

[۱۹] Transparency Condition

همان‌گونه که پیشتر ذکر شد برای انجام محاسبات در فصل ۴ پایان‌نامه از نرم‌افزار Mathematica نسخه ۲۰۱۰ استفاده کرده‌ایم و برای شبیه سازی‌های این فصل کد نویسی لازم در این نرم‌افزار صورت گرفته است[۴۳] .

[۲۰] Mathematica 10.0

فصل دوم

معرفی فراماده و کاربرد آن در نامرئی سازی

۲-۱ مقدمه

قابلیت‌های ویژه و گاهی غیر معمول نانو ساختارها آن‌ها را به عنوان موادی که پایه در ساخت قطعه‌های نو مانند نانو نوسان کننده‌ها، نانو موجبرها، نانولنزها، نانوفیلترها و غیره دارند به‌طور قابل توجهی مطرح کرده است [۳]. از جمله این مواد پیشرفته صنعتی می‌توان به فرا مواد [۲۱]نوری اشاره کرد که بصورت طبیعی وجود ندارند و بصورت مصنوعی وبا بکارگیری تکنولوژی نانو ساخته می شوند. از آنجائیکه اتم های فراماده قابل دستکاری و چیده شدن هستند می توان خواص نوری آنها و در نتیجه پاسخ الکترومغناطیسی آنها را کنترل کرد [۴-۳].

از جمله کاربردهای پیشنهاد شده برای فرامادهها با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد این مواد، استفاده از آن‌ها برای کنترل و شکل‌دهی انتشار امواج الکترومغناطیسی است به این معنی که می‌توان از آن‌ها در کاهش سطح مقطع پراکندگی[۲۲] و پنهان‌سازی اشیاء یا همان نامرئی سازی[۲۳] استفاده کرد. در این بخش ابتدا به معرفی فراماده و خواص آن می‌پردازیم و سپس کاربردها وچگونگی تحقق عملی آن را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۲-۲ معرفی فراماده

در دهه‌های اخیر یکی از داغ‌ترین موضوعات علمی و تکنولوژیکی فرامادهها بوده‌اند که شامل زمینه‌های الکترومغناطیسی، فوتونیک، علم مواد و مهندسی هستند. پیشوند " متا " دارای ریشه

[21] . Metamaterial
[22]. Scattering Cross Section
[23] . Invisibility

یونانی بوده و در لغت به معنای " فرا" است و عنوان فرا ماده به طور کلی به محیط‌هایی اطلاق می‌شود که دو مشخصه گذردهی الکتریکی[۲۴] (ε) ونفوذپذیری (تراوائی) مغناطیسی (μ)[۲۵] آن خارج از محدوده مواد موجود در طبیعت است. مواد طبیعی گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی نسبی مثبت و بزرگ‌تر از واحد دارند، اگرچه در همین مواد طبیعی نیز تحت فرکانس‌های خاص این دو پارامتر می‌تواند از محدوده مجاز خارج شود. اولین بار بررسی جامع نظریه فراماده، محیطی با گذردهی الکتریکی و نفوذ پذیری مغناطیسی منفی، توسط وسلاگو[۲۶] انجام شد[۵] .

وسلاگو نشان داد پدیده‌ای که در انتشار امواج در محیط‌های با ε و μ منفی اتفاق می‌افتد متفاوت با انتشار امواج در محیط‌های معمول است و در عین این‌که پدیده‌هایی مانند شکست منفی و دست چپی بودن محیط در مورد فراماده‌ها صادق است اما وجود چنین محیطی هیچ‌گونه تعارضی با معادلات مکسول[۲۷] ندارد.

۲-۲-۱ دسته بندی مواد و حوزه فرکانس فراماده

هر ماده‌ای در طبیعت دارای خواص انتشاری مختص به خود است که بستگی به ساختار اتمی، آرایش مولکولی و مشخصات ذاتی ماده دارد. دو پارامتر اولیه هر ماده که می‌توانند به ما کمک کنند تا خواص انتشاری هر ماده‌ای را بشناسیم گذردهی الکتریکی(ε) و نفوذ پذیری مغناطیسی (μ) هستند که تابعیت فرکانس دارند و به‌طور معمول در مواد موجود در طبیعت هر دو پارامتر فوق مثبت هستند و ما می‌توانیم سایر پارامترهای انتشاری هر محیط مانند ثابت انتشار، امپدانس مشخصه و... را از روی

این دو پارامتر به دست بیاوریم. حالت غیرعادی هنگامی رخ می‌دهد که هر کدام از دو پارامتر ε وμ منفی باشد، موج تخت منتشر شده در چنین محیطی را می‌توان با بردار شدت میدان الکتریکی(E)،

---

[۲۴] . Permittivity

[۲۵] . Permeability

[۲۶] .V. G. Veselago

[۲۷] . Maxwell Equation