بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه یزد

دانشکده فیزیک

گروه اتمی و مولکولی

پایان‌نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

فیزیک اتمی و مولکولی

انتشار موج در فرامواد پلاسمونیک غیرخطی نانوساختار

استادان راهنما:

دکتر مهدی شریفیان

دکتر محسن حاتمی

استاد مشاور:

دکتر محمدکاظم توسلی

پژوهش و نگارش:

سجاد جنتی

اسفند ماه۱۳۹۲

کلیه ی حقوق مـادی و معنـوی مترتـب بـر نتـایج مطالعـات، ابتکـارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه یزد اسـت و هرگونه استفاده از نتایج علمی و عملی از این پایان‌نامه بـرای تولیـد دانـش فنی، ثبت اختراع، ثبت اثر بدیع هنری، همچنین چاپ و تکثیر، نسخه‌بـرداری، ترجمه و اقتباس و ارائه مقالـه در درس گروهـی‌هـا و مجـلات علمـی از ایـن پایان‌نامه منوط به موافقت کتبی دانشگاه یزد است

تقدیم به پدر و مادرم

سپاسگزاری

به نام پروردگار یکتا

سپاس آن بی‌همتا که چون همیشه با الطاف بی‌پایانش در انجام و پایان رساندن این رساله مرا یاری نمود. او را سپاس میگویم که مرا لایق آموختن گردانید.

رهنمودهای ارزنده و بی‌دریغ اساتید بزرگوارم جناب آقای دکتر مهدی شریفیان و دکتر محسن حاتمی که هدایت این رساله را به عهده داشتند مرا بر آن می‌دارد که با این جملات کوتاه و ناکافی سپاسگزاری خود را از این بزرگواران بیان کنم. مراتب امتنان خویش را تقدیم استاد گران‌قدر جناب آقای دکتر محمدکاظم توسلی می‌دارم که با قبول زحمت مشاوره این رساله مرا قرین لطف خویش فرمودند.

چکیده

ظهور فراماده گستره جدیدی از برهم‌کنش‌های نور با ماده را گشوده است و باعث ایجاد موقعیت‌های منحصر به فردی در کنترل نور شده است. ساختارهای فلز-دی‌الکتریک ازجمله محیط‌هایی هستند که متفاوت بودن ثابت‌های گذردهی باعث ایجاد امواج سطحی پیشرو و پسرو در آن‌ها می‌شود. یکی از قابلیت‌های این ساختارها کنترل امواج الکترومغناطیس با تغییرات ضخامت لایه‌های فلز و یا دی‌الکتریک است. از آنجا که رفتار یک محیط پلاسمایی در شرایطی خاص شبیه به رفتار فلزی است، در قسمت‌هایی از این تحقیق با جایگزین کردن محیط پلاسما با فلز امکان انتشار امواج سطحی را بررسی کرده‌ایم؛ این کار باعث می‌شود که با سود جستن از تغییر پارامترهای پلاسما ازجمله میدان مغناطیسی نحوه انتشار موج را کنترل کرد؛ اما با توجه به اهمیت انتشار امواج سطحی در موجبرهای متناوب فلز-دی‌الکتریک و شرایط خاصی که از نتیجه جفت-شدن این موجبرها ایجاد می‌شود با توضیح معادلات حاکم بر انتشار موج، به روش ماتریس انتقال و همچنین انتشار پالس‌های سالیتونی پایه، نحوه تولید و انتشار امواج سطحی غیرخطی را مورد بررسی قرار داده‌ایم.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: فراماد پلاسمونیک ۱

۱-۱. مقدمه ۲

۱-۲. فراماده ۶

۱-۲-۱. عوامل موثر ماکروسکوپی ۶

۱-۲-۲. طراحی فراماد با گذردهی الکتریکی منفی ۹

۱-۳. پلاسمونیک ۱۱

۱-۳-۱. معادلات موج ۱۱

۱-۴. پلاریتون‌های سطحی در یک فصل مشترک ۱۵

۱-۵. SPP در فصل مشترک سیلیکون-پلاسما و هوا-پلاسما در محیط مغناطیده ۱۸

۱-۶. اثر میدان مغناطیسی بر انتشار پلاریتون‌های سطحی در دو فصل مشترک ۲۲

فصل دوم: ساختارهای فلز-دی‌الکتریک متناوب ۲۷

۲-۱. مقدمه ۲۸

۲-۲. نظریه‌ی ماتریس انتقال ۲۸

۲-۳. امواج بلوخ ۳۲

۲-۴. الکترومغناطیس امواج سطحی ۳۴

۲-۴-۱. ساختار نیمه‌بینهایت ۳۵

۲-۴-۲. شار انرژی ۳۸

۲-۴-۳. ساختار بینهایت فلز دی‌الکتریک ۳۹

فصل سوم: اپتیک غیرخطی ۴۳

۳-۱. مقدمه ۴۴

۳-۲. قطبش غیرخطی ۴۵

۳-۳. محیط‌های غیرخطی ۴۶

۳-۴. ضریب شکست غیرخطی و اثر کر ۴۷

۳-۵. معادله شرودینگر و تشکیل سالیتون‌های فضایی ۵۰

۳-۵-۱. معادله غیرخطی شرودینگر ۵۱

۳-۵-۲. سالیتون‌های فضایی روشن و تاریک ۵۲

فصل چهارم: امواج سطحی غیرخطی در فراماده پلاسمونیک نانو ساختار ۵۵

۴-۱. مقدمه ۵۶

۴-۲. ساختار نیمه‌بینهایت ۵۶

۴-۲-۱. امواج سطحی با قطبش TE ۵۷

۴-۲-۲. قطبش TM ۶۱

۴-۲-۳. تولید مدهای سطحی ۶۵

۴-۳. ساختار بینهایت ۶۸

۴-۳-۱. قطبش TE ۶۹

۴-۳-۲. قطبش TM ۷۱

۴-۳-۳. تولید مدهای سطحی در ساختار نیمه‌بینهایت ۷۲

نتیجه‌گیری ۷۵
پیشنهادها ۷۶
مراجع ۷۷

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱: فضای مشخصه‌های ε و μ، دو محور مربوط به گذردهی و تراوایی هستند. خط ضخیم نشان‌دهنده مواد غیرمغناطیسی با $\mu = ۱$ است [۴۹]. ۹

شکل ۱-۲: تصویری از یک موجبر تخت با راستای انتشار در جهت محور z [۵۱]. ۱۳

شکل ۱-۳: تصویری نمادین از جفت‌شدن دو محیط پلاسما و دی‌الکتریک در یک محیط مغناطیده. ۱۹

شکل ۱-۴: تغییرات فرکانس نسبت به ثابت انتشار، منحنی کم رنگ مربوط به محیط پلاسما-هوا و منحنی پررنگ مربوط به محیط پلاسما-سیلیکون است. ۱۹

شکل ۱-۵: تغییرات فرکانس پلاسمون سطحی نسبت به میدان مغناطیسی خارجی. ۲۱

شکل ۱-۶: نمودار پاشندگی در $B = ۱T$، تنها مقادیر مجاز مقادیری هستند که به‌صورت ناحیه خاکستری در شکل نشان داده شده. ۲۱

شکل ۱-۷: تصویری نمادین از یک محیط، پلاسما-دی‌الکتریک- پلاسما. ۲۲

شکل ۱-۸: تغییرات دامنه میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی (الف) مدهای زوج (ب) مدهای فرد [۴۷]. ۲۴

شکل ۱-۹: رابطه پاشندگی انتشار پلاسمون سطحی در ساختار پلاسما –دی‌الکتریک-پلاسما در حضور میدان مغناطیسی، الف: $B_{ext} = ۰$ ب: $B_{ext} = ۰.۷T$ ۲۵

شکل ۲-۱: تصویری نمادین از یک ساختار متناوب یک بعدی. ۲۸

شکل ۲-۲: تصویری نمادین یک بعدی از ساختار متناوب فلز دی‌الکتریک نیمه‌بینهایت. ۳۴

شکل ۲-۳: نمودار پاشندگی ساختار نیمه‌بینهایت. (الف) $\eta = ۲$، (ب) $\eta = ۱$، (ج) $\eta = ۱/۴$، (د) $\eta = ۴$ ۳۷

شکل ۲-۴: نمودار تغییرات میدان مغناطیسی مربوط به نقاط A و B و C در شکل ۲-۳. ..... ۳۸

شکل ۲-۵: تصویری نمادین از یک ساختار یک‌بعدی بینهایت ۴۰

شکل ۲-۶: نمودار پاشندگی برای ساختار بینهایت با عامل‌های پرشدگی متفاوت. ۴۱
شکل ۲-۷: نمودار تغییرات میدان مغناطیسی H_y مربوط به نقاط A و B در شکل ۲-۶. .... ۴۱
شکل ۴-۱: تصویری از یک ساختار نیمه‌بینهایت که با یک لایه غیرخطی نازک جفت شده است. (الف) در حالتی است که شروع ساختار نیمه‌بینهایت با فلز است. (ب) در حالتی است که شروع با دی‌الکتریک است. ۵۷
شکل ۴-۲: نمودار پاشندگی در ساختار نیمه‌بینهایت با یک لایه غیرخطی، نمودار کم‌رنگ در حالتی است که شروع ساختار با فلز است و نمودار پررنگ در حالتی است که شروع ساختار با دی-الکتریک. شکل (الف) در فرکانس $\omega = ۲eV$ و شکل (ب) $\omega = ۲eV$ [۷۸]. ۶۰
شکل ۴-۳: نمودار تغییرات میدان مربوط به نقاط A و B در شکل ۵-۲ [۷۸]. ۶۱
شکل ۴-۴: نمودار پاشندگی در حالت غیرخطی نامتمرکز ($\chi = -۱$) در فرکانس $\omega = ۴eV$ [۷۶]. ۶۱
شکل ۴-۵: نمودار پاشندگی در قطبش TM در حالتی که شروع ساختار با فلز است در فرکانس $\omega = ۲eV$ همراه با نمودار تغییرات میدان در نقطه A. ۶۴
شکل ۴-۶: نمودار پاشندگی در قطبش TM در حالتی که شروع ساختار با دی‌الکتریک است در فرکانس $\omega = ۲eV$ همراه با نمودار تغییرات میدان در نقطه A ۶۴
شکل ۴-۷: نمودار پاشندگی در قطبش TM در حالتی که شروع ساختار با فلز است در فرکانس $\omega = ۴eV$، همراه با نمودار تغییرات میدان در نقطه A ۶۵
شکل ۴-۸: انتشار پالس سالیتونی پایه مربوط به نقطه B شکل ۴-۲ در فرکانس $\omega = ۴eV$. .. ۶۶
شکل ۴-۹: مقایسه نمودار تغییرات میدان به‌دست‌آمده از روش ماتریس انتقال و نمودار تغییرات میدان به‌دست‌آمده با روش انتشار بیم در طول انتشار $\bar{z} = ۳$ ۶۶
شکل ۴-۱۰: انتشار پالس سالیتونی پایه در شدت آستانه مربوط به نقطه A شکل ۴-۲ در فرکانس $\omega = ۲eV$. ۶۷

شکل ۴-۱۱: مقایسه نمودار تغییرات میدان به‌دست‌آمده از روش ماتریس انتقال و نمودار تغییرات میدان به‌دست‌آمده با روش انتشار بیم در طول انتشار $\bar{z} = ۲$. ۶۸
شکل ۴-۱۲: انتشار پالس ورودی در ۰٫۶ شدت آستانه و ۱٫۵ برابر شدت آستانه. ۶۸
شکل ۴-۱۳: تصویری نمادین از یک ساختار بینهایت فلز-دی‌الکتریک با یک لایه غیرخطی. ۶۹
شکل ۴-۱۴: نمودار پاشندگی در ساختار بینهایت با یک لایه غیرخطی (الف) $\omega = ۳eV$ و (ب) $\omega = ۴eV$. ۷۰
شکل ۴-۱۵: نمودار تغییرات میدان الکتریکی در یک ساختار بینهایت با یک لایه غیرخطی مربوط به نقاط A و B در شکل ۴-۱۳. ..... ۷۰
شکل ۴-۱۶: نمودار پاشندگی در ساختار بینهایت با یک لایه غیرخطی (الف) $\omega = ۳eV$ و (ب) $\omega = ۴eV$. ۷۱
شکل ۴-۱۷: نمودار تغییرات میدان مغناطیسی در یک ساختار بینهایت با یک لایه غیرخطی مربوط به نقاط A و B در شکل ۴-۱۳. ..... ۷۲
شکل ۴-۱۸: انتشار پالس سالیتونی پایه در شدت آستانه مربوط به نقطه B شکل ۴-۲ در فرکانس $\omega = ۴eV$. ۷۳
شکل ۴-۱۹: مقایسه نمودار تغییرات میدان به‌دست‌آمده از روش ماتریس انتقال و نمودار تغییرات میدان به‌دست‌آمده با روش انتشار بیم در طول انتشار $\bar{z} = ۳$ ۷۳
شکل ۴-۲۰: پالس ورودی در ۰٫۶. شدت آستانه و ۱٫۵برابر شدت آستانه. ۷۳

پیشگفتار

یکی از دست‌آوردهایی که خواص الکترومغناطیسی جدید را تحقق بخشید فراماده است. این مواد با ساختارهای مصنوعی منظم و ابعاد کوچک‌تر از طول‌موج مورد بررسی در ساختار، برای ایجاد خواص الکترومغناطیسی مشخصی ساخته می‌شوند. اگرچه اندازه‌ی واحد ترکیبات این ساختارها معمولا چندین برابر بیشتر از ابعاد مولکول‌ها و اتم‌ها در مواد معمولی است، ولی اندازه‌ی واحدهای تشکیل‌دهنده‌ی آن‌ها از طول‌موج ناحیه‌ی موردنظر خیلی کوچک‌تر است و می‌توان خصوصیات ماده را به‌صورت کمیت‌های مؤثر در نظر گرفت. تحقیقات روی فراماده مربوط به استفاده‌ی نوآورانه از دست‌آوردهای الکترومغناطیسی جدید در زمینه‌ی طراحی و ساخت فرامواد است. برای کنترل بهتر امواج الکترومغناطیسی مطالعات زیادی در این فضا صورت گرفته است. تمرکز اصلی روی فراماده، ساخت مواد مصنوعی‌ای است که گذردهی و نفوذپذیری الکترومغناطیسی مربوط به آن منطبق با معادلات ماکسول می‌شود؛ اما در عین حال خواص مواد مربوط به این ناحیه جدید الکترومغناطیسی در مواد معمولی دیده نمی‌شود.

پلاسمونیک قسمتی عمده و بسیار مهیج از نانوفوتونیک است که به چگونگی محدود شدن میدان‌های الکترومغناطیسی در ابعاد هم‌مرتبه یا کوچک‌تر از طول‌موج می‌پردازد. پلاسمونیک بر پایه برهم‌کنش بین تابش الکترومغناطیس و الکترون‌های آزاد رسانا در فصل مشترک نانوساختار-های فلز-دی‌الکتریک استوار است؛ که بر این اساس موج الکترومغناطیس در فصل مشترک دو ماده متفاوت منتشر می‌شود و با فاصله گرفتن از فصل مشترک، دامنه میدان‌ها به‌صورت نمایی به سمت صفر میل می‌کند این امواج تحت عنوان امواج سطحی مورد بررسی قرار می‌گیرند که پلاریتون پلاسمون سطحی[1] (SPP) نامیده می‌شوند.

یک ساختار فلز-دی‌الکتریک متناوب در ابعاد نانو به‌عنوان یک فراماده پلاسمونیک شناخته شده است و موجبرهای مختلفی از این دست مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با توجه به روابط پاشندگی در موجبرهای پلاسمونیک، خصوصیات منحصر به فردی در مورد آن‌ها بیان‌شده است.

[1] surface plasmon polariton

این موجبرها می‌توانند مدهای متمرکز در هر فصل مشترک را منتشر کنند. اگر فرکانس کوچک‌تر از فرکانس پلاسمای فلز باشد این امواج در شرایط بردار انتشار و فرکانس‌های مشخص می‌توانند با سرعت گروه‌های متفاوتی منتشر شوند و نکته جالب در مورد آن‌ها وجود سرعت گروه منفی در برخی از فرکانس‌ها است که باعث ایجاد امواج پسرو می‌شود.

با توجه به اهمیت موجبرهای پلاسمونیک، بررسی انتشار موج در این ساختارها ار اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پایان‌نامه با استفاده از نظریه ماتریس انتقال و نحوه انتشار پلاسمون سطحی معادلات حاکم بر انتشار امواج در فرامواد پلاسمونیک مورد بررسی قرار گرفته است و با شبیه‌سازی عددی انتشار امواج غیرخطی در این ساختارها بررسی شده‌اند. برای نیل به این هدف ابتدا در فصل اول چگونگی ایجاد ثابت دی‌الکتریک منفی و روند انتشار پلاسمون سطحی مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجا که در پلاسما نیز ثابت دی‌الکتریک می‌تواند در برخی شرایط منفی باشد به علت خواص جالبی که پلاسمای مغناطیده ایجاد می‌کند ما با جایگزین کردن فلز به‌جای پلاسما نحوه انتشار پلاسمون سطحی در این‌گونه ساختارها را مورد بررسی قرار داده‌ایم. در فصل دوم به نحوه انتشار امواج سطحی در ساختارهای متناوب فلز-دی‌الکتریک پرداخته و دو ساختار نیمه بینهایت و بینهایت را بررسی کرده‌ایم. خلاصه‌ای از اپتیک غیرخطی و چگونگی به دست آمدن ثابت دی‌الکتریک یک محیط کر غیرخطی، و نیز چگونگی به دست آمدن معادله شرودینگر و در نهایت به‌دست آمدن پالس سالیتونی را در فصل سوم تو ضیح داده‌ایم، و در نهایت در فصل چهارم نحوه انتشار موج در دو ساختار نیمه‌بینهایت و بینهایت را در حالت جفت‌شدن با یک لایه غیرخطی بررسی کرده‌ایم.

فصل اول

فرامواد پلاسمونیک[1]

[1] plasmonic metamaterials

۱-۱. مقدمه

تقریبا همه‌ی پدیده‌ها و دستگاه‌های الکترومغناطیسی در نتیجه‌ی برهم‌کنش‌های بین امواج و مواد هستند. در این راستا کنترل مطلوب امواج الکترومغناطیسی با طراحی ساختارهای مناسب و با مواد موجود محقق می‌شود. ساختارهایی که به‌وسیله‌ی دانشمندان و مهندسان در سراسر دنیا پیشنهاد و ساخته‌شده‌اند، بیشتر با مواد دردسترس بوده است. به این سبب قابلیت موجود و تنوع ابزارهای الکترومغناطیسی محدود شده‌اند. مواد الکترومغناطیسی جدید در ابعاد مولکولی ساخته می‌شوند. یکی از دست‌آوردهایی که خواص الکترومغناطیسی جدید را تحقق بخشید فراماده است. این مواد با ساختارهای مصنوعی منظم و ابعاد کوچک‌تر از طول‌موج، برای ایجاد خواص الکترومغناطیسی مشخصی ساخته می‌شوند. اگرچه اندازه‌ی واحد ترکیبات این ساختارها معمولا چندین برابر بیشتر از ابعاد مولکول‌ها و اتم‌ها در مواد معمولی است، ولی اندازه‌ی واحدهای تشکیل‌دهنده‌ی آن‌ها از طول‌موج ناحیه‌ی موردنظر خیلی کوچک‌تر است و می‌توان خصوصیات ماده را به‌صورت کمیت‌های مؤثر در نظر گرفت.

پیشوند متا[1] در زبان یونانی به معنای ماوراء است، از این رو فراماده مشخص‌کننده سیستم-هایی هستند که فراتر از مواد معمولی هستند. واژه فراماده اولین بار در مقاله‌ای توسط اسمیت و همکارانش[2] در سال ۲۰۰۰ به کار رفت [۱]. این مقاله در مورد ساخت ماده‌ای بود که به‌طور همزمان دارای گذردهی و پذیرفتاری منفی در ناحیه‌ی فرکانسی ماکروویو است. در سال‌های اخیر، در زمینه‌ی فراماده پیشرفت‌های زیادی صورت گرفته است که شامل تحقیقات گوناگونی در رشته-هایی چون فیزیک، اپتیک، مواد، مکانیک و الکترونیک بوده است. فراماده ساختارهایی هستند که به دست بشر ساخته می‌شوند. واحدهای سازنده‌ی فراماده، فرااتم‌ها یا مولکول‌ها هستند که باید اساسا کوچک‌تر از طول‌موج موردنظر باشند. فاصله‌ی متوسط بین فرااتم‌های همسایه نیز باید از مرتبه‌ی کمتر از طول‌موج باشد. داشتن مقیاس زیر طول‌موج برای ساختارهای فراماده که ناهمسانگرد هستند باعث می‌شود کل ماده در مقیاس ماکروسکوپی یکنواخت و همسانگرد باشد.

[1] meta
[2] Smith et al

این واقعیت سبب می‌شود یک فراماده به‌جای این‌که به‌صورت یک دستگاه در نظر گرفته شود به یک ماده تبدیل شود. سه مقاله‌ی برجسته در زمینه‌ی معرفی فراموادموثر بوده‌اند. اولین مقاله مربوط به وسلاگو[1] در مورد مواد چپگرد است[۲]. در این مقاله پدیده‌ی غیرمعمول چپگرد بودن میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی و بردار موج برای فراموادمورد بررسی قرارگرفته است و عوامل مورد نیاز برای رسیدن همزمان به پذیرفتاری و گذردهی منفی به‌طور صریح بیان‌شده است. دومین مقاله مربوط به اولین نمایش تجربی محیطی است که وسلاگو معرفی کرد. این مقاله توسط اسمیت و همکاران ارائه شده است [۱] که جهش بزرگی از پیش‌بینی نظری به نمود عملی است. سومین مقاله کار پندری[2] روی عدسی‌های کامل است [۳]، که اولین تلاش برای پیداکردن کاربردهای موثر و جالب‌توجه فراموادبوده است. این سه مقاله به‌صورت جالب‌توجهی روی مواد با ضریب شکست منفی متمرکزشده بودند. به همین علت طی سال‌های اولیه واژه‌ی فراماده تقریباً با مواد چپگرد مترادف بوده است.

تحقیقات نظری و تجربی صورت گرفته روی فراموااد، کاربردهای زیادی را برای این مواد مشخص کرده است، این کاربردها شامل لیتوگرافی در ابعاد نانو [۴]، تصویربرداری زیستی [۵]، هدایت پرتوها [۶]، حافظه‌های‌نوری [۷]، کاربردهای حسگری [۸]، جمع‌کردن نور در سلول‌های خورشیدی [۹] و مولفه‌های نانویی نوری است. یکی از کاربردهای مهم فراموااد امکان کنترل میزان نامرئی بودن اجسام است. سه دستاورد برای به دست آوردن یک استتار نسبتاً کامل یا همان لباس‌های نامرئی مطرح‌شده است: دستاورد اول بر پایه پلاسمونیک‌ها یا پوشش‌های فراموااد پیشنهادشده است [۱۰]، دومی بر پایه ابرعدسی‌ها بیان‌شده [۱۱] و سومی بر اساس یک مختصات تبدیلی یا سمت‌گیری مجدد امواج مطرح‌شده است [۱۳،۱۲].

آغاز تحقیقات فراموااد اپتیکی درنتیجه‌ی به‌کارگیری توانمندی‌هایی است که در زمینه‌ی روش‌های ساخت در ابعاد نانومتری همراه با شبیه‌سازی‌های کامپیوتری صورت گرفته است. با رشد سریع و همه‌جانبه شاخه‌ی فراموااد اپتیکی، گرایش‌های اصلی تحقیقاتی به وجود آمده است که

[1] Veselago
[2] pendry

شامل مغناطش اپتیکی [۱۴-۱۶]، فراماده اپتیکی با ضریب شکست منفی [۱۶-۲۰]،کایرالیتی مصنوعی[1] [۲۱،۲۲]، اپتیک غیرخطی در فراماده [۲۳-۲۶]، تفکیک‌پذیری بالا با فراماده [۲۷-۳۱] و لباس‌های نامرئی الکترومغناطیسی در ناحیه‌ی اپتیکی است [۳۲-۳۴]. فراماده اپتیکی و فوتونیکی به‌صورت مترادف به کار می‌روند و تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای باهم ندارند. فراماده امروزی هنوز خیلی کامل نیستند. این ساختارها معمولاً خیلی پاشنده، دارای پراش و ناهمسانگرد هستند، با این وجود واقعی و قابل ساخت می‌باشند. با تایید قابلیت تولید فراماده اپتیکی، محققین در حال ارتقا بخشیدن طراحی‌هایشان، کشف فیزیک جدید این مواد و طراحی دستگاه‌های کاربردی جالب هستند.

موجبرهای پلاسمونی سطحی یکی از موضوعات مهم در انتقال سریع اطلاعات در ابعاد زیر طول‌موج هستند. پلاریتون‌های سطحی، امواج الکترومغناطیسی هستند که در امتداد مرز بین دو محیط انتشار می‌یابند به‌طوری‌که دامنه‌شان دور از فصل مشترک دو محیط به‌صورت نمایی میرا می‌شود[۳۵]. ساختارهای نوری پلاسمونی سرعت گروه کوچکی دارند و کاربردهای زیادی ازجمله افزایش برهم‌کنش نور با ماده، به دام‌اندازی نوری [۳۶] و افزایش آثار غیرخطی را دارند [۳۷]. یکی از کاربردهای موجبری فراماده استفاده از آن‌ها در انتقال پلاریتون‌های سطحی است. در یک موجبر فراماده که به آرامی باریک شده باشد، امواج منتشرشده در ناحیه‌ی وسیعی می‌توانند در جهت‌های مختلفی حرکت کرده و سرعتشان کاهش یابد. به این پدیده رنگین‌کمان‌های به‌دام‌افتاده[2] گفته می‌شود و از نظر کاربرد جهت ایجاد امواج آهسته ارزشمند هستند [۳۷]. امواج آهسته در موجبرهای استوانه‌ای دی‌الکتریک که با فراماده‌ی ناهمسانگرد احاطه‌شده باشد نیز با انتخاب مناسب پارامترهای مواد می‌تواند به‌وجود آید [۳۸].

بررسی دقیق خصوصیات موجبری فراماده از اهمیت زیادی برخوردار است و تاکنون تعدادی از پدیده‌های مربوط ساختارهای فراماده در انتشار امواج معمولی و امواج سطحی پیش‌بینی شده است. برای مثال امواج سطحی (پلاسمون‌های سطحی) سبب بهبود قدرت تفکیک‌پذیری ابرعدسی-

[1] artificial chirality
[2] trapped rainbow

هایی می‌شود که از لایه‌های متناوب مواد با ضریب شکست مثبت و منفی ساخته شده‌اند [۳۹]. کنترل و به‌دام‌اندازی نور با توجه به باند فرکانسی ممنوعه از دیگر کاربردها در این ساختارها است [۴۰،۴۱].

برای اینکه پلاریتون‌های سطحی TM در مرز دو ماده‌ی معمولی وجود داشته باشد، باید گذردهی دی‌الکتریک یکی از محیط‌های نیمه‌نامتناهی منفی باشد. پلاریتون‌های سطحی TE در مرز دو ماده غیرمغناطیسی و یا خطی نمی‌توانند منتشر شوند و نیاز به منفی‌بودن تراوایی مغناطیسی یکی از محیط‌ها دارد و یا مستلزم وجود یک لایه غیرخطی است. یکی از خصوصیات قرارگرفتن دو محیط با گذردهی دی‌الکتریک مثبت و منفی در کنار هم این است که پلاریتون‌های سطحی TM و TE می‌توانند در شرایط خاص به‌وسیله مرز دو محیط خطی همسانگرد منتشر شوند [۴۲]. البته انتشار این دو پلاریتون به‌طور هم‌زمان و با عوامل یکسان صورت نمی‌گیرد. اگرچه با توجه به وابستگی خصوصیات محیطی فرامواد پلاسمونیک به فرکانس، پلاریتون‌ها در فرکانس-های مختلف می‌توانند وجود داشته باشند. تعدادی از خصوصیات پلاریتون‌های غیرخطی سطحی در مرز بین دو ماده‌ی معمولی که یک یا هر دو ماده غیرخطی باشند بررسی شده است [۴۳]. پلاریتون‌ها در مرز دو ماده معمولی که یکی غیرخطی باشد همیشه دارای یک بیشینه هستند ولی همیشه بیشینه‌ی میدان‌الکتریکی به سمت محیط غیرخطی جابه‌جا می‌شود [۴۴].

یک ساختار فلز-دی‌الکتریک متناوب در ابعاد نانو به‌عنوان یک فراماده پلاسمونیک شناخته شده است و موجبرهای مختلفی از این دست مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۴۶،۴۵]. با توجه به روابط پاشندگی در موجبرهای پلاسمونیک، خصوصیات منحصر به فردی در مورد آن‌ها بیان‌شده است. این موجبرها می‌توانند مدهای متمرکز در هر فصل مشترک را منتشر کنند. اگر فرکانس کوچک‌تر از فرکانس پلاسمای فلز باشد، این امواج در شرایط بردار انتشار و فرکانس‌های مشخص می‌توانند با سرعت گروه‌های متفاوتی منتشر شوند و نکته جالب در مورد آن‌ها وجود سرعت گروه منفی در برخی از فرکانس‌ها است که باعث ایجاد امواج پسرو می‌شود. ازجمله خواص موجبرهای پلاسمونیک انتشار مدها به‌صورت متقارن، پادمتقارن و نامتقارن است [۴۷].

همان‌طور که در بالا مقدمه‌ای از موجبرهای پلاسمونیک گفته شد این ساختارها از اهمیت زیادی برخوردار هستند؛ و بررسی انتشار امواج موضوع مطالعه مهم در این ساختارها است. در این فصل ابتدا چگونگی ایجاد ثابت دی‌الکتریک منفی و روند انتشار پلاسمون سطحی مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجا که در پلاسما نیز ثابت دی‌الکتریک می‌تواند در برخی شرایط منفی باشد به علت خواص جالبی که پلاسمای مغناطیده ایجاد می‌کند ما با جایگزین کردن فلز به‌جای پلاسما نحوه انتشار پلاسمون سطحی در این‌گونه ساختارها را مورد بررسی قرار داده‌ایم.

۱-۲. فراماده

تحقیقات روی فراماده مربوط به استفاده‌ی نوآورانه از دست‌آوردهای الکترومغناطیسی جدید در زمینه‌ی طراحی و ساخت فراموا‌د است. برای کنترل بهتر امواج الکترومغناطیسی مطالعات زیادی در این فضا صورت گرفته است. تمرکز اصلی روی فراماده ساخت مواد مصنوعی است که گذردهی و نفوذپذیری الکترومغناطیسی مربوط به آن منطبق با معادلات ماکسول می‌شود که خواص مواد مربوط به این ناحیه جدید الکترومغناطیسی در مواد معمولی دیده نمی‌شود.

۱-۲-۱. عوامل موثر ماکروسکوپی

بیشتر پدیده‌های الکترومغناطیسی با معادلات ماکسول مشخص می‌شوند، این دسته از معادلات ارتباط بین میدان‌ها، منابع و خصوصیات مواد را توصیف می‌کنند. اعمال کردن میدان‌ها در یک سیستم می‌تواند روی نظم و ترتیب قرار گرفتن بارهای الکتریکی و دوقطبی‌های مغناطیسی در محیط اثر بگذارد و بسته به ماده، میدان‌ها می‌توانند تا حدی قطبش را القا کنند. خصوصیات الکترومغناطیسی مواد با دو ویژگی ماده مشخص می‌شود: گذردهی ε و تراوایی μ که توصیف‌کننده جفت‌شدگی یک ماده به ترتیب با مولفه‌های میدان الکتریکی و مغناطیسی یک موج الکترومغناطیسی است. این دو ویژگی همراه با ضریب شکست $n=\sqrt{\varepsilon\mu}$ و مقاومت ظاهری $Z=\sqrt{\mu/\varepsilon}$، به‌طور اساسی عوامل موثر ماکروسکوپیکی هستند و به‌طورکلی برای توصیف پاسخ