

## چکیده

امروزه به دلیل نیاز به سرعت‌های بالا و گذر حد پراش، علم پلاسمونیک و ادوات نوری بسیار مورد توجه دانشمندان قرار گرفته‌است. یکی از ساختارهای بسیار مهم در طراحی ادوات نوری، حلقه‌های تشدید است که در طراحی و ساخت فیلترهای مخابراتی، سودهی نوری و مهندسی طیفی بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در این پایان‌نامه پلاسمون‌های سطحی، پلاسمون‌های سطحی پلاریتون، پلاسمون‌های محلی شده و برخی از کاربردهای آن‌ها معرفی شده‌است. سپس حلقه‌های پلاسمونیک معمولی، حلقه‌های پلاسمونیک پنجره‌ای و حلقه‌های پلاسمونیک با طول افزایش یافته به روش‌های تحلیلی و شبیه‌سازی با روش تفاضل محدود در حوزه‌ی زمان بررسی با هم مقایسه شده‌است.

نشان داده خواهد شد که به دلیل تلفات زیاد و کوپلاژ کم بین حلقه‌های پلاسمونیک و موجبرهای ساختارهای تمام گذر پلاسمونیک در کاربردهای محدودی قابل استفاده هستند. برای افزایش بازده از روش‌های گوناگونی استفاده می‌شود که دو روش در این پایان‌نامه بررسی شده‌است. روش اول استفاده از یک پنجره کوچک بین موجبر و حلقه پلاسمونیک است که کوپلاژ را به مقدار قابل توجهی افزایش می‌دهد و روش دوم استفاده از حلقه‌هایی با طول افزایش یافته است که باعث افزایش کوپلاژ و بازده ساختار می‌شود.

در نهایت یک دی‌مالتی پلکسر سه کاناله که بازده بیشتری نسبت به ساختارهای مشابه دارد، طراحی و شبیه‌سازی شده‌است.

## فهرست مطالب

۱	دیباچه
۳	فصل اول
۵	۱-۱- تاریخچه
۶	۲-۱- پلاسمون‌های سطحی و پلاسمون‌های پلاریتون
۹	۳-۱- پلاسمون‌های سطحی محلی شده
۱۱	۴-۱- کاربردهای پلاسمون‌های سطحی
۱۳	۱-۴-۱- موجبرها
۱۴	۲-۴-۱- نانو آنتن‌های نوری
۱۹	فصل دوم: مروری بر ویژگی‌های الکترومغناطیسی فلزات
۱۹	۱-۲- معادله‌های ماکسول و انتشار امواج الکترومغناطیسی در فلزات
۲۹	۲-۲- پلاسمون‌های پلاریتون صفحه‌ای در فصل مشترک عایق و فلز
۳۶	۳-۲- ساختارهای لایه نازک چند لایه
۳۹	۴-۲- روش عددی تفاضل محدود در حوزه‌ی زمان (FDTD)
۴۷	۵-۲- پاشندگی
۵۰	۶-۲- اعمال شرایط مرزی جذبی
۵۷	فصل سوم: حلقه‌های تشدید پلاسمونیک

- ۵۷ ۱-۳-تئوری حلقه‌ها
- ۶۵ ۲-۳-پاشندگی
- ۶۶ ۳-۳-پهنای باند، ناحیه طیفی آزاد و ظرافت
- ۶۸ ۴-۳-بررسی تحلیلی و شبیه‌سازی یک حلقه‌ی تشدید معمولی تمام‌گذر
- ۷۰ ۵-۳-حلقه‌ی تشدید پلاسمونیک فلز-عایق-فلز با پنجره کوپل شده به موجبر
- ۷۱ ۱-۵-۳-مدل تئوری
- ۷۹ ۲-۵-۳-نتایج شبیه‌سازی به روش FDTD
- ۸۴ ۳-۵-۳-دی‌مالتی پلکسر ۳ کاناله
- ۸۶ ۶-۳-حلقه تشدید پلاسمونیک با طول کوپلاژ افزایش یافته
- ۹۳ فصل چهارم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها
- ۹۴ ۱-۴-نتیجه‌گیری
- ۹۴ ۲-۴-پیشنهاد برای کارهای بعدی
- ۹۷ مرجع‌ها

## فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱: جام لیکرگوس. رنگ جام به صورت معمولی سبز است (الف) و اگر جام از داخل روشن شود قرمز رنگ دیده می‌شود (ب) [۱]

۴

شکل ۲-۱: تعداد مقالاتی که در زمینه‌ی پلاسمونیک بین سال‌های ۱۹۶۰ تا ۲۰۰۸ منتشر شده‌است [۱۴]

۶

شکل ۳-۱: جابه‌جایی ابر الکترونی اتم فلزات در اثر اعمال میدان الکتریکی [۲۳]

۷

شکل ۴-۱: نحوه‌ی انتشار و نوسان پلاسمای الکترونی در سطح مشترک عایق و فلز [۲۴]

۸

شکل ۵-۱: میدان الکتریکی که به پلاسمای الکترون‌های آزاد سطح مشترک فلز و عایق کوپل شده‌است [۲۵]

۸

شکل ۶-۱: نمونه‌ای از هنر شیشه منقوش. رنگ‌های بسیار خالص آن از جمله قرمز نتیجه‌ی حضور نانو ذرات فلزی و تحریک پلاسمون‌های سطحی محلی است [۲۶]

۱۰

شکل ۷-۱: شیشه‌ی منقوش مربوط به کلیسایی در پاریس که رنگ‌های متنوع آن توسط کلویدهای نانو ذرات طلا و شکل‌های متفاوت سطوح بوجود آمده‌است [۲۷]

۱۱

شکل ۸-۱: نانو سیم فلزی. نحوه‌ی تحریک (الف)، نحوه‌ی انتشار امواج در نانو سیم فلزی (ب) [۲۸]

۱۳

شکل ۹-۱: سلول خورشیدی: (الف) صفحه‌ی قابل انعطاف که با امواج فرو سرخ تولید انرژی می‌کند و در شب هم قابل استفاده است، (ب) آرایه‌ی نانو آنتن‌های نوری [۱۷]

۱۵

شکل ۱۰-۱: میکروسکوپ نوری بسیار دقیق با استفاده از آنتن‌های نانو ذره‌ای [۱۸]

۱۵

شکل ۱۱-۱: آشکارساز فرورسرخ. (الف) تصویر گرفته شده از ساختار ساخته شده، (ب) شکل آشکارساز

۱۶

فرورسرخ به همراه یک نانو لوله\_ی کربنی و یک آنتن پاپیونی [۱۹]

۱۶

شکل ۱-۱۲: یک سوده‌ی پلاسمونیک که به کمک یک نانو آنتن نوری ساخته شده‌است. (الف) سوده در

حالت خاموش، (ب) سوده در حالت روشن [۲۰] ۱۶

شکل ۱-۱۳: (الف) یک لیزر بسیار باریک، (ب) کاربرد لیزر نانو آنتنی برای تشخیص پوسیدگی دندان در

حد پوسیدگی مینای دندان [۲۱] ۱۶

شکل ۱-۱۴: درمان سرطان با تابش لیزر با نور ملایم بر روی نانو آنتن‌های نصب شده بر روی سلول‌های

سرطانی [۲۹] ۱۶

شکل ۱-۱۵: استفاده از آرایه‌های نانو آنتنی در تعیین مکان سه بعدی برای فعل و انفعالات زیست

مولکولی [۳۰] ۱۸

شکل ۲-۱: تابع دی‌الکتریک برای گاز الکترون‌های آزاد (نمودار مشکی) در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری

شده (نمودار قرمز) برای طلا. انتقال بین سطحی در فلز باعث اختلاف زیاد این دو نمودار است [۳۱] ۲۸

شکل ۲-۲: مقدارهای حقیقی و موهومی برای گاز الکترون‌های آزاد (نمودار مشکی) در مقایسه با

مقدارهای اندازه‌گیری شده برای فلز نقره (نمودار قرمز) [۳۱] ۲۸

شکل ۲-۳: دو محیط عایق و فلز با تابع‌های دی‌الکتریک  $\epsilon_1(\omega)$  و  $\epsilon_2$ ، فصل مشترک در  $z=0$  است

[۳۱] ۳۲

شکل ۲-۴: نمودار پاشندگی spp در فصل مشترک فلز بدون تلف و هوا یا دی‌الکتریک سیلیکا [۳۱]

۳۵

شکل ۲-۵: نمودار پاشندگی sppها در، فصل مشترک نقره با هوا و نیز فصل مشترک نقره با سیلیس. در

شکل می‌بینیم که مقدار ثابت انتشار در بسامد پلاسمون سطحی محدود شده‌است [۳۱]

۳۶

شکل ۲-۶: محیط سه لایه. فصل مشترک محیط‌های ۱ و ۲ و محیط‌های ۲ و ۳ قابلیت هدایت پلاسمون‌های

سطحی را دارند. فاصله‌ی بین محیط‌های ۲ و ۳ میزان تزویج پلاسمون‌های سطحی را مشخص می‌کنند  
[۳۱] ۳۷

شکل ۲-۷: نمودار پاشندگی پلاسمون‌های سطحی پلاریتون تزویج شده در ساختار نقره-هوا-نقره. ۱ خط نور، ۲ پاشندگی برای حالتی که تزویج وجود ندارد، ۳ فاصله‌ی هوایی ۱۰۰ نانومتر، ۴ فاصله‌ی هوایی ۵۰ نانومتر، ۵ فاصله‌ی هوایی ۲۵ نانومتر [۳۱] ۳۹

شکل ۲-۸: (الف) تقریب گسسته برای اپراتور کرل، (ب) تقریب گسسته برای اپراتور دیورژانس [۳۳] ۴۲

شکل ۲-۹: چیدمان فضایی و تبدیل ساختار به شبکه‌ای از نقاط [۳۳] ۴۲

شکل ۲-۱۰: نحوه‌ی به‌روز رسانی میدان‌ها بر اساس چینش میدان‌ها [۳۳] ۴۳

شکل ۲-۱۱: چیدمان و جهت‌های فضای میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در سلول یی، (ب) میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در سلول یی به همراه اندیس‌های زمانی و مکانی استفاده شده در کد برنامه [۳۳] ۴۳

شکل ۳-۱: ساختار یک حلقه که به صورت میرا به یک موجبر کوپل شده است [۳۴] ۵۸

شکل ۳-۲: ناحیه کوپلینگ موجبر و یک تشدیدگر حلقوی [۳۴] ۵۸

شکل ۳-۳: میدان‌های کوپلینگ در یک موجبر و تشدیدگر حلقوی [۳۴] ۶۱

شکل ۳-۴: ساختار یک حلقه تشدید در نزدیکی یک موجبر و پارامترهای کوپلینگ [۳۵] ۶۳

شکل ۳-۵: یک حلقه‌ی تشدید کوپل شده به یک موجبر پلاسمونیک با امواج میرا ۶۹

شکل ۳-۶: فرکانس تشدید و طیف انتقال توان در این تمام‌گذر شکل ۳-۵ ۷۰

شکل ۳-۷: حلقه‌ی تشدید پلاسمونیک که از طریق یک پنجره کوچک به موجبر فلزی کوپل شده‌است [۳۷]

۷۱

شکل ۳-۸: ساختار حلقه تشدید که از طریق یک حفره به موجبر کوپل شده‌است

۷۶

شکل ۳-۹: تغییرات ضریب کوپلاژ از موجبر به حلقه‌ی تشدید از طریق حفره‌ی بتی. نسبت به عرض حفره ۷۷

شکل ۳-۱۰. فرکانس تشدید (نمودار مشکی)، طیف‌های انتقال توان (نمودار قرمز) و بازتاب توان (نمودار آبی)

۷۸

شکل ۳-۱۱: فرکانس‌های تشدید یک حلقه‌ی تشدید پلاسمونیک با شعاع ۵۰۰ نانومتر با روش عددی

۸۰

FDTD

شکل ۳-۱۲: طیف انتقال توان در داخل موجبر

۸۱

شکل ۳-۱۳: فرکانس تشدید (نمودار قرمز) و طیف انتقال توان (نمودار آبی) در داخل موجبر در فیلتر میان-

۸۱

نگذر پلاسمونیک

شکل ۳-۱۴: نمودار انتقال توان (رنگ قرمز) و بازتاب توان (رنگ آبی) در موجبر اصلی ساختار شکل ۳-۸

۸۳

شکل ۳-۱۵: فیلتر تمام‌گذر با دو حفره

شکل ۳-۱۶: طیف فرکانس انتقال توان (نمودار صورتی) و افزایش دامنه در داخل حلقه (نمودار قرمز)

۸۳

۸۵

شکل ۳-۱۷: دی‌مالتی‌پلکسر ۳ کاناله

۸۵

شکل ۳-۱۸: طیف انتقال خروجی حلقه  $R_1$  ( $\lambda_1$ )، حلقه  $R_2$  ( $\lambda_2$ ) شکل ۳-۱۷

۸۷

شکل ۳-۱۹: شبیه‌سازی ناحیه‌ی کوپلینگ برای بدست آوردن پارامترهای کوپلاژ

- ۸۸ شکل ۳-۲۰: تغییرات نسبت خاموشی با نسبت به طول کوپلینگ
- ۸۹ شکل ۳-۲۱: میدان مغناطیسی یک حلقه با طول افزایش یافته شکل (۳-۲۱)
- ۸۹ شکل ۳-۲۲: طیف انتقال و فرکانس تشدید یک حلقه با طول افزایش یافته شکل (۳-۲۱)
- ۹۰ شکل ۳-۲۳: فیلتر تمام‌گذر با استفاده از حلقه‌ی تشدید با طول افزایش یافته شکل (۳-۲۱)
- ۹۱ شکل ۳-۲۴: طیف انتقال توان در فیلتر تمام‌گذر با حلقه‌ی تشدید با طول افزایش یافته شکل (۳-۲۱)



جدول ۱-۳: ثابت‌های انتشار موج به ازای دو مقدار ضریب شکست دی‌الکتریک و دو پهنای موجبر ۷۱

# فصل اول

## مقدمه‌ای بر علم پلاسمونیک و کاربردهای آن

اندازه‌ی المان‌های مجتمع نوری در قرن ۲۱ به ابعاد نانومتری و طول موج‌های فرسرخ رسیده‌است. در حوزه‌ی الکترونیک این مطلب بیانگر آن است که ساختارهای آینده با استفاده از اثرات مبنایی کوانتوم همچون کوانتایی سازی بار و هدایت در ابعاد کمتر از ۱۰ nm طراحی می‌شوند. ابتدا ساختارهای مجتمع نوری، چون موجبرها و میکرو تشدیدگرها با یک مانع جدی که همان حد پراش است، مواجه شدند که برای طول موج‌های فرسرخ نزدیک و مرئی در حدود چند صد نانومتر است. به منظور کاهش این فاصله‌ی ابعادی

بین ساختارهای مجتمع میکروالکترونیک و فوتونیک باید به گونه‌ای بر این محدودیت غلبه کرد. این محدودیت‌ها استفاده از هندسه‌هایی با زاویه‌های تند و شعاع‌های خمش کمتر از طول موج نور، و مجتمع کردن ساختارهای نوری را بسیار مشکل ساخته‌بود. با ظهور تحقیقات بر روی حوزه‌ی پلاسمونیک، پلاسمون-های سطحی و پلاسمون‌های پلاریتون، امیدهایی برای حل این محدودیت‌ها توسط این پدیده به وجود آمد.

پلاسمون واحد کوانتومی موج‌های الکترومغناطیس سطحی است که در مرز فلز و دی‌الکتریک ظاهر می‌شود و در راستای عمود بر فصل مشترک میرا است. این موج‌های الکترومغناطیسی سطحی در اثر انتقال میدان-های الکترومغناطیسی به نوسان‌های پلاسمای الکترونی فلزات است. برخورد امواج به نحوی خاص به فلز منجر به تحریک پلاسمون‌ها می‌شود و در نتیجه نوری که از سطح فلز بازتاب می‌کند در فرکانس‌های خاص، کاهش قابل ملاحظه‌ای را خواهد داشت. پلاسمون‌ها می‌توانند با فوتون‌ها کوپل شده و ذرات مشابه به نام پلاسمون‌های پلاریتون را ایجاد کنند. این پدیده را در ظروف شیشه‌ای روم باستان، مانند جام لیکرگوس<sup>۱</sup> می‌توان مشاهده کرد [۱].

این جام سبز رنگ که در شکل ۱ نمایش داده شده و در موزه‌ی انگلیس نگهداری می‌شود، هنگامی که با تابش نور از داخل روشن می‌شود، به رنگ قرمز رنگ دیده می‌شود و دلیل این پدیده این است که شیشه این جام محتوی ذراتی به اندازه‌ی ۷۰ nm از طلا و نقره است. البته این احتمال هم وجود دارد که در هنگام ساخت این جام ناخالصی‌های فلزی و یا سرباره‌هایی که محتوی طلا و نقره بوده‌اند به صورت تصادفی به ماده اولیه جام اضافه شده باشد و این اثر غیرمعمول تصادفاً به وجود آمده باشد.

---

<sup>1</sup> The Lycurgus Cup



(الف)

(ب)

شکل ۱-۱: جام لیکرگوس. رنگ جام به صورت معمولی سبز است (الف) و اگر جام از داخل روشن شود قرمز رنگ دیده می‌شود (ب) [۱].

ابتدا به تاریخچه‌ی کوتاهی در مورد پلاسمونیک و سیر پژوهش‌ها در باره‌ی این پدیده می‌پردازیم و سپس در ادامه توضیح‌های جامع‌تری در مورد پلاسمون‌ها ارائه می‌نماییم.

## ۱-۱ تاریخچه:

اولین مشاهدات پلاسمون‌های سطحی در آزمایش وود در سال ۱۹۰۲ بود که برای بررسی برخورد نور به پراشه انجام شد [۲]. در طیف بازتاب این آزمایش‌ها، باندهای باریکی مشاهده شد که او آن‌ها را ناهنجاری نامید. در سال ۱۹۰۷ با استفاده از اصل پراکندگی امواج الکترومغناطیسی برای این پدیده توجیحی پیدا شد [۳]. اما طبق این توجیحات، ناهنجاری‌های وود باید تنها در یک قطبش خاص (s) رخ می‌داد [۴]. ولی نتایج آزمایش‌های بعدی نشان داد که این اثرات در قطبش مخالف (p) هم دیده می‌شود [۵ و ۶]. در سال ۱۹۴۱،

فانو<sup>۱</sup>، این اثرات را با تحریک موج‌های سطحی الکترومغناطیس روی سطح فلزات توجیه کرد [۷]. در سال ۱۹۵۷ پیش‌بینی در زمینه‌ی وجود نوسان‌های جمعی الکترون‌های سطح فلزات انجام شد که نقطه‌ی عطف نظریات پلاسمون‌های سطحی بود [۸]. در سال ۱۹۵۹ در پاره‌ای از آزمایشات وجود چنین تحریک‌هایی مشاهده شد [۹]. در سال ۱۹۶۰ واحد کوانتومی این نوسان‌های الکترونی به پلاسمون‌های سطحی معروف شد [۱۰]. در سال ۱۹۶۸ با استفاده از یکسری ساختارهای خاص برای بازتاب‌های کامل تضعیف شده، پلاسمون‌های سطحی تحریک شدند [۱۱]. در اثر تلاش‌های رایزر<sup>۲</sup>، کرشمان<sup>۳</sup> و اوتو روش‌های مناسب تحریک پلاسمون‌های سطحی کاملاً مشخص شد و عملاً پلاسمون‌های سطحی وارد دنیای ساختارهای نوری پر سرعت شدند [۱۲]. در اواخر دهه‌ی ۱۹۶۰، علاوه بر فیزیکدانان، محققان رشته‌های دیگر به این پدیده علاقه‌مند شدند و آن را وارد علوم دیگری چون حسگرهای زیستی مولکولی کردند [۳۰]. با دستیابی به فناوری تولید در ابعاد نانو جهش دیگری در اواسط دهه‌ی ۱۹۹۰ در این زمینه رخ داد. با توانایی برش در ابعاد نانو و کنترل این پدیده توسط شکل ظاهری ساختارها توجه گروه‌های زیادی به سمت این علم جلب شد. آخرین مورد مشاهدات مربوط به پلاسمون‌ها که نقطه‌ی عطفی در این زمینه را پدید آورد، مشاهده عبور قابل توجه نور از ورقه بسیار نازک طلا که حفره‌هایی با قطر ۱۵۰ نانومتر بود. با توجه به قطر حفره‌ها مقدار عبور نور از حفره‌ها باید در حدود یک درصد می‌شد که در سال ۱۹۹۸ این پدیده با تونل‌زنی پلاسمون‌های سطحی از داخل حفره‌ها توجیه شد [۱۳]. در شکل ۱-۲ می‌توان روند رشد مقالات در زمینه‌ی علم پلاسمونیک را بین سال‌های ۱۹۶۰ تا ۲۰۰۸ مشاهده نمود [۱۴].

ایده‌های نوین از جمله استفاده از فرامواد<sup>۴</sup> در حوزه‌ی پلاسمونیک [۱۵ و ۱۶] و یا طراحی و تولید نانو آنتن-های نوری [۱۷-۲۰] و لیزرهای بسیار باریک [۲۱ و ۲۲]، توجه بسیاری از پژوهش‌گران را به این زمینه جلب نموده‌است که می‌تواند دلیل گسترش در حوزه‌ی کاربردهای احتمالی در ساختارهای پر سرعت آینده باشد.

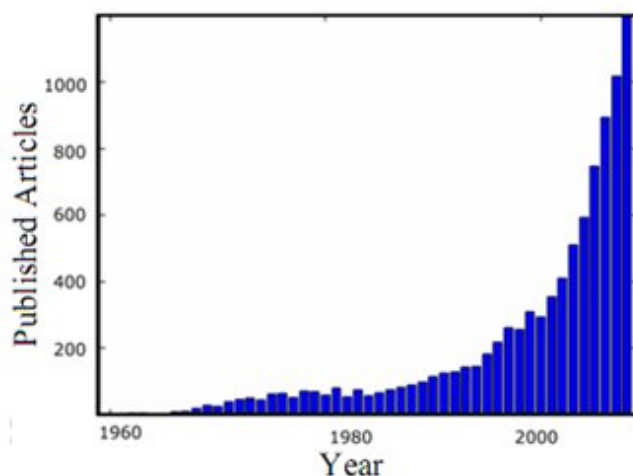
---

<sup>1</sup> U. Fano

<sup>2</sup> H. Raether

<sup>3</sup> E. Keretschmann

<sup>4</sup> Metamaterials

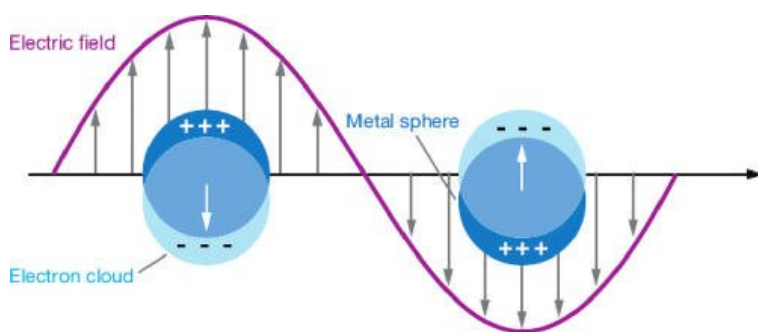


شکل ۱-۲: تعداد مقالاتی که در زمینه‌ی پلاسمونیک بین سال‌های ۱۹۶۰ تا ۲۰۰۸ منتشر شده‌است [۱۴].

## ۱-۲ پلاسمون‌های سطحی و پلاسمون‌های سطحی پلاریتون

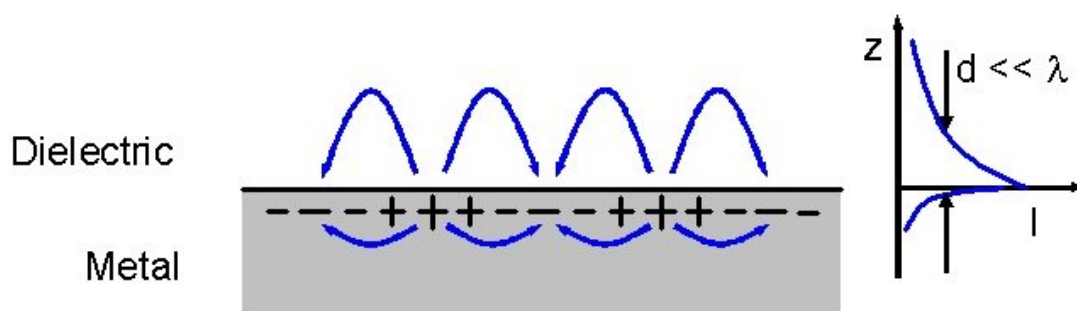
همانطور که قبلاً اشاره شد، پلاسمون‌ها نوسانات پلاسمای الکترون‌های آزاد در جهت خلاف یون‌های ثابت فلز هستند. برای تصور نوسان پلاسمای یک مکعب فلزی را در یک میدان الکتریکی قرار دهید. این میدان الکتریکی باعث می‌شود الکترون‌ها، مطابق شکل (۱-۳)، به سمت تابش میدان جذب شده و یون‌ها در جهت دیگر مکعب باقی بمانند. این جدایی الکترون‌ها و یون‌های مثبت تا فاصله‌ای ادامه می‌یابد که میدان الکتریکی در داخل مکعب به طور کامل صفر شود. حال اگر میدان الکتریکی قطع شود، الکترون‌ها به سمت مخالف حرکت حرکت کرده، توسط همدیگر دفع و به سمت یون‌های مثبت جذب می‌شوند. این حرکت نوسانی تا زمانی که انرژی ذرات توسط عوامل میراکننده‌ی انرژی یا مقاومت از بین برود، ادامه می‌یابد.

پلاسمون‌های سطحی آن نوع پلاسمون‌هایی هستند که محدود به سطح شده، به صورت قوی با نور بر هم-کنش کرده و باعث تولید پلاریتون می‌شوند. این نوع پلاسمون‌ها در سطح مشترک موادی با ثابت دی-الکتریک با قسمت حقیقی مثبت و یک ماده با ثابت دی‌الکتریک منفی ایجاد می‌شوند. نحوه‌ی انتشار و نوسان پلاسمای الکترونی در فصل مشترک فلز و دی‌الکتریک را می‌توان در شکل ۱-۴ مشاهده کرد.



شکل ۱-۳: جابه‌جایی ابر الکترونی اتم فلزات در اثر اعمال میدان الکتریکی [۲۳].

پلاسمون‌های سطحی پلاریتون<sup>۱</sup> شکل‌های متفاوتی به خود می‌گیرند. این شکل‌ها شامل امواج پلاسمای الکترون‌های آزاد که در طول فلز منتشر می‌شوند تا نوسان‌های محلی الکترون‌ها در نانو ذرات فلزی هستند.



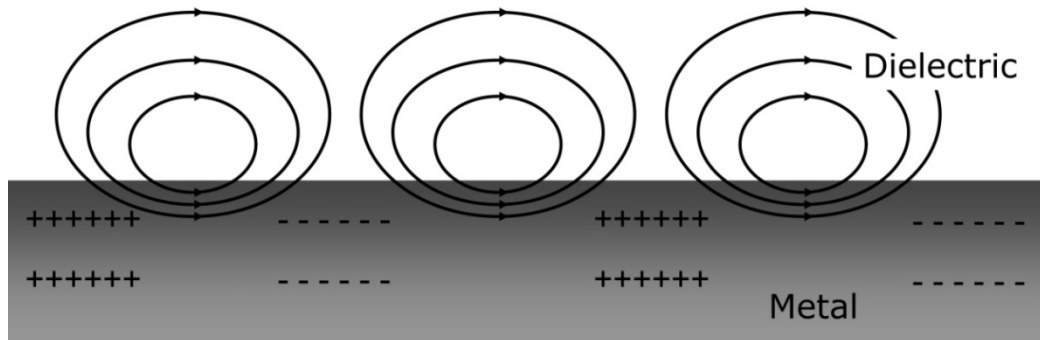
شکل ۱-۴: نحوه‌ی انتشار و نوسان پلاسمای الکترونی در سطح مشترک عایق و فلز [۲۴].

خواص یکتای پلاسمون‌ها ما را قادر به استفاده‌ی آن‌ها در کاربردهای عملی زیادی چون هدایت نور در ابعاد نانو، آشکارسازی زیستی در حد یک تک ملکول، انتقال پیشرفته‌ی نور در ابعاد زیر طول موجی و عکس برداری نوری با دقت زیاد در ابعاد زیر حد پراش، می‌سازد.

بر هم‌کنش تشعشع الکترومغناطیسی با سطح مشترک می‌تواند مدهای مختلفی را در سطح برانگیزاند. در سطح مشترک فلز و عایق، مدهای سطحی به دام افتاده در هر دو محیط به صورت نزولی کاهش می‌یابند؛ همزمان به چگالی بارهای سطحی نوسان کننده گره خورده‌اند و در امتداد سطح مشترک منتشر می‌شوند (شکل ۱-۵). این مدهای سطحی به دام افتاده همان پلاسمون‌های سطحی هستند. تحریک این نوع از

<sup>۱</sup> Surface Plasmon Polariton

پلاسمون‌ها به ابزار و روش‌های پیچیده‌ای نیاز دارد. دلیل این پیچیدگی و نحوه‌ی تحریک این نوع از پلاسمون‌ها در بخش‌های بعدی توضیح داده خواهد شد.



شکل ۱-۵: میدان الکتریکی که به پلاسمای الکترون‌های آزاد مشترک فلز و عایق کوپل شده‌است [۲۵].

### ۳-۱ پلاسمون‌های سطحی محلی شده

یکی دیگر از شاخه‌های پلاسمون‌های سطحی، پلاسمون‌های سطحی محلی شده هستند که برخلاف نوع توصیف شده در بخش قبل توانایی انتشار ندارند. در واقع فرکانس نور تابیده شده به ساختار باعث می‌شود الکترون‌های فلز شروع به نوسان کنند و تولید پلاسمون‌های سطحی می‌کنند. طول موج این نوسانات خیلی کمتر از طول موج تابیده به ساختار است. کوپل شدن این پلاسمون‌های سطحی با امواج نوری آن‌ها را به صورت نقطه‌ای متمرکز می‌کند. در واقع این فرآیند تشدید در نزدیکی این نانوساختارهای فلزی، میدان‌های محلی را به طور ناگهانی افزایش می‌دهد. پهنای باند تشدید ناشی از مدهای پلاسمونیک محلی به حدی زیاد است که طیف نوری کامل را در خود جای می‌دهد. این کوپلاژ به حدی قوی است که می‌تواند تشعشع و جهت انتشار نور را کنترل کند. شکل ۱-۶ یک نمونه از شیشه‌های منقوش است که رنگ بسیار خالص آن به دلیل وجود نانو ذرات فلزات است که به صورت پلاسمون‌های محلی تحریک شده‌اند.



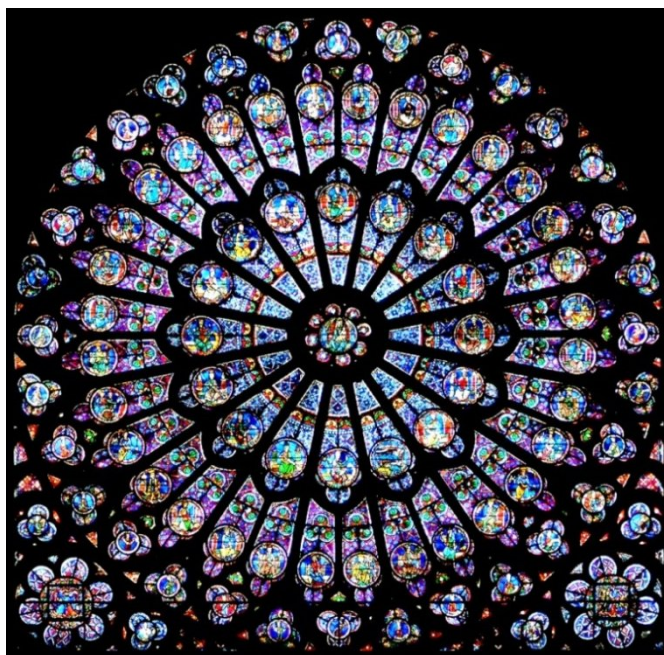


شکل ۱-۶: نمونه‌ای از هنر شیشه منقوش. رنگ‌های بسیار خالص آن از جمله قرمز نتیجه‌ی حضور نانو ذرات فلزی و تحریک پلاسمون‌های سطحی محلی است [۲۶].

توصیف ریاضی این نوع از پلاسمون‌ها خارج از حوصله‌ی این پایان‌نامه است. این نوع از پلاسمون‌ها قابلیت انتشار ندارند و در اثر برهم‌کنش امواج الکترومغناطیس با نانوذرات فلزی یا سطوح خمیده‌ی تیز بوجود می‌آید. این نوع از پلاسمون‌ها برخلاف انواع منتشرشونده نیازی به تحریک به روش‌های خاص ندارند و با تابش مستقیم نور به این ذرات، نوسان‌های محلی یاد شده تحریک می‌شوند.

می‌توان از پلاسمون‌های سطحی برای کنترل رنگ مواد استفاده کرد. این عمل با کنترل شکل سطح مواد که باعث کنترل برانگیخته شدن و انتشار انواع پلاسمون‌های در سطح مشترک فلز و عایق می‌شوند. این پدیده را می‌توان در اثرهای تاریخی شیشه‌کاری‌های منقوش که در کلیساهای قرون وسطی برای زینت دادن از آن‌ها استفاده می‌شده، مشاهده کرد. شکل (۱-۷) یک نمونه از این شیشه‌کاری‌های منقوش در پنجره‌ی رز<sup>۱</sup> است که مربوط به کلیسایی در پاریس را که رنگ‌های آن توسط کلوییدهای نانو ذرات طلا بوجود آمده، نمایش می‌دهد [۲۷].

<sup>1</sup> [Gothic stained glass](#) rose window



شکل ۱-۷: شیشه‌ی منقوش مربوط به کلیسایی در پاریس که رنگ‌های متنوع آن توسط کلویدهای نانو ذرات طلا و شکل‌های متفاوت سطوح بوجود آمده‌است [۲۷].

در این اثر میدان الکتریکی نور با نانو ذرات طلا با اندازه‌های یکسان که با میدان‌های الکتریکی برهم‌کنش می‌کنند و شیشه‌هایی با رنگ‌های متنوع پدید می‌آورند.

در علوم نوین، این اثرها در فرکانس‌های نور مرئی و مایکروویو کاربرد دارند. بیشتر تحقیقات ابتدا در بازه‌ی مایکروویو انجام شد، چون در این طول موج‌ها ابعاد در حدود سانتی‌متر است و این ساختارها به سادگی به صورت مکانیکی قابل ساخت هستند. برای تولید ساختارهایی که در بازه‌ی نور مرئی یا فروسرخ کار می‌کنند، باید ابعاد کوچکتر از  $400 \text{ nm}$  باشند، که ساخت آن‌ها را در گذشته با چالش‌هایی روبرو می‌ساخت.

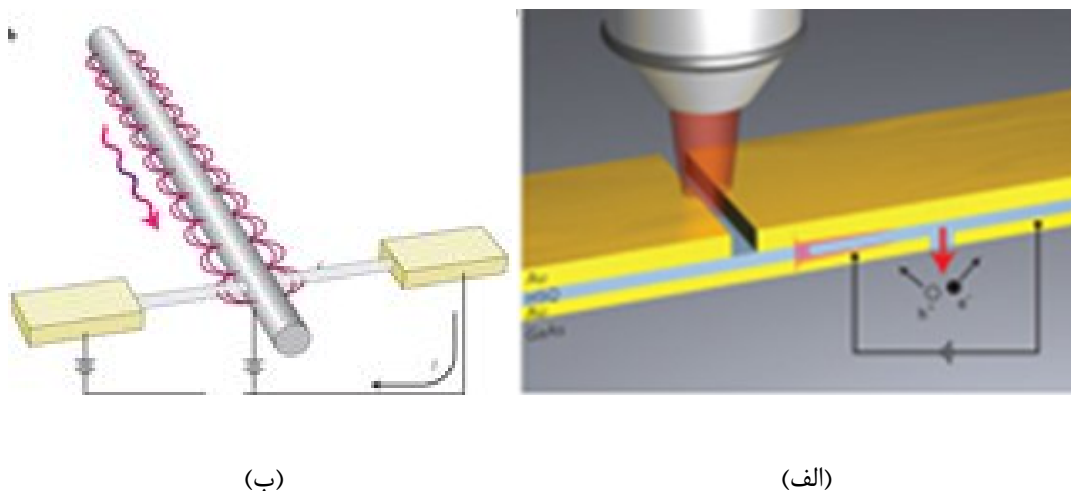
## ۴-۱ کاربردهای پلاسمون‌های سطحی

پلاسمون‌های سطحی کاربردهای گوناگونی در علوم مختلف دارند که چند کاربرد رایج آن را در این قسمت معرفی می‌کنیم.

### ۱-۴-۱ موجبرها

موجبرهای متداول نمی‌توانند در ابعاد زیر طول موجی در خم‌های تند هدایت خوبی داشته باشند. برای رفع این مشکل و هدایت نور در ابعاد کوچکتر از حد پراش اپتیکی می‌توان از موجبرهای پلاسمونیک استفاده کرد. برای افزایش سرعت کامپیوترها، نیاز به انتقال داده‌های اپتیکی در روی تراشه افزایش می‌یابد. با این وجود برای آن که انتقال نور در تراشه امکان پذیر باشد (به دلیل محدودیت ناشی از پراش)، نور باید در یک مسیر به ابعاد در حدود یک طول موج محدود شود (در کاربردهای مخابراتی کمینه طول موج ۸۰۰ نانومتر است). موجبرهای پلاسمونی، اجازه انتقال نور در ابعاد کوچکتر از طول موج را می‌دهند. ابعاد موجبرهای پلاسمونیک با تزویج کننده‌های ورودی و خروجی و اندازه محیط انتقال محدود می‌شود. بنابراین این نوع از موجبرها کاندیدای مناسبی برای ارتباطات روی تراشه نسل بعدی هستند.

در این نوع موجبرها همواره باید مصالحه‌ای میان طول انتشار پلاسمون و میزان تمرکز آن برقرار ساخت. می‌توان از یک ورقه‌ی بسیار نازک فلزی میان محیط همگن یک عایق استفاده کرد. در این نوع موجبرها طول انتشار پلاسمون‌های سطحی پلاریتون تا چندین سانتی‌متر می‌رسد. اما در این حالت امواج تمرکز زیادی در ناحیه‌ی فصل مشترک ندارند [۲۸].



شکل ۱-۸: (الف). نحوه‌ی تحریک و (ب) نحوه‌ی انتشار امواج در نانو سیم فلزی [۲۸]

نانو سیم‌های فلزی تمرکز فوق العاده‌ای دارند، ولی تلفات به قدری در آن‌ها زیاد است که طول انتشار آن‌ها از چند میکرون تجاوز نمی‌کند. در شکل ۱-۸ می‌توان تحریک و انتشار نور را در یک نانو سیم فلزی مشاهده کرد.

در موجبرهای پلاسمونی، امواج در مرز فلز-عایق منتشر می‌شوند. هنگامی که چند مرز فلز-عایق وجود داشته باشد و فاصله بین این مرزها کم باشد، امکان تزویج بین امواج منتشر شونده در مرزها وجود دارد. ساختارهای عایق-فلز-عایق<sup>۱</sup> و فلز-عایق-فلز<sup>۲</sup> از جمله این ساختارهای چندلایه هستند.

تحلیل ریاضی تمام موج ساختارهای MIM که در بخش بعدی بیشتر به آن می‌پردازیم، نشان می‌دهد که در این ساختارها امواج منتشر شونده را می‌توان به دو مد فرد و زوج تقسیم کرد. در مد فرد میدان الکتریکی طولی تابعی فرد از ارتفاع و میدان‌های عرضی تابعی زوج هستند. برای مد زوج نیز میدان الکتریکی طولی، تابعی زوج از ارتفاع است. با کاهش ضخامت فلز در مد فرد میزان میدان در فلز کاهش می‌یابد. بنابراین تلفات توان ناشی از تصادم الکترون‌های فلز اثر کمتری بر میدان خواهد داشت. بنابراین برای مد فرد امکان دستیابی به موجبر با طول انتشار بیشتر وجود دارد که در آن یک آرایه متناوب از نانو ساختارهای فلزی حک شده در یک دی الکتریک می‌تواند نور را هدایت و مدوله کند. این موجبر پلاسمونیک شامل یک آرایه از نانو ذرات، نانومیلها و نانو سیم‌های فلزی با تشدید پلاسمون در ناحیه موجبر اپتیکی است.

## ۱-۴-۲ نانو آنتن‌های نوری

در حال حاضر آنتن‌ها بیشتر برای انتقال سیگنال‌های رادیویی استفاده می‌شوند. به دلیل افزایش تقاضا برای افزایش پهنای باند، قابلیت انعطاف پذیری مکانیکی و کاهش ابعاد و وزن برای داشتن آنتن‌های کوچکتر به سمت فرکانس‌های بالاتر حرکت کردند. با رشد تکنیک‌های ساخت آنتن‌های پچ ماکرواستریپ در فرکانس‌های بالاتر و پس از آن آنتن‌هایی در فرکانس‌های نوری با ابعاد حدود ۱۰۰ nm پدید آمد. البته نانو آنتن‌های

<sup>۱</sup> Insulator-Metal-Insulator (IMI)

<sup>۲</sup> Metal-Insulator-Metal (MIM)