

تاسیس ۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر

گروه مخابرات-موج

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

تحلیل و شبیه‌سازی فیلتر پلاسمونی تشدیدگر با روش تفاضل

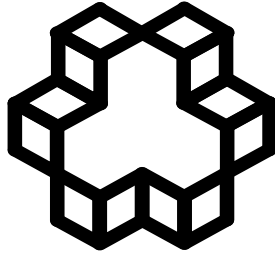
محدود در حوزه زمان

استاد راهنما: دکتر نصرت‌ا... گرانیپایه

دانشجو: مریم فراهانی

بهمن ۱۳۹۰





تاسیس ۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر

### تأییدیه هیات داوران

هیئت داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان‌نامه تهیه شده باعنوان «تحلیل و شبیه‌سازی فیلتر پلاسمونی تشدیدگر با روش تفاضل محدود در حوزه زمان» توسط خانم مریم فراهانی صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق گرایش مخابرات موج با رتبه مورد تأیید قرار می‌دهند.

استاد راهنما: دکتر نصرت ا... گرانیپایه امضا

ممتحن داخلی: دکتر محمدصادق ابریشمیان امضا

ممتحن خارجی: دکتر محمدکاظم مروج قرشی امضا

نماینده تحصیلات تکمیلی: دکتر محمدصادق ابریشمیان امضا

## اظهار نامه دانشجو

موضوع پایان نامه: تحلیل و شبیه سازی فیلتر پلاسمونی تشدیدگر با روش تفاضل محدود  
در حوزه زمان

استاد راهنما: دکتر نصرت ا... گرانپایه

نام دانشجو: مریم فراهانی

شماره دانشجوئی: ۸۸۲۰۲۳۴

اینجانب مریم فراهانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق گرایش مخابرات میدان دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می نمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان نامه توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده مورد تأیید است، و در موارد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. بعلاوه گواهی می نمایم که مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان نامه چارچوب مصوب دانشگاه را بطور کامل رعایت کرده ام.

امضاء دانشجو:

تاریخ:

## فرم حق طبع ونشر و مالکیت نتایج

- ۱- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده آن است. هرگونه کپی برداری بصورت کل پایان نامه یا بخشی از آن تنها باموافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز است.
- ۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی است و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست. همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نیست.

# چکیده

در این پایان‌نامه، خواص نوری پلاسمون‌های سطحی و نیز موج‌برهای پلاسمونی مورد بررسی قرار گرفته است. عبور نور از ساختاری شامل کاواک تزویج شده به موج‌بر دی‌الکتریک به طور کامل ارائه و اثر پارامترهای مختلف بر روی میزان عبور بیان شده است. کاربردهای مختلف ساختارهای شامل کاواک ارائه شده است. انتقال بهینه توان از یک اتصال موج‌بری با بهره‌گیری از موجبر به عنوان تطبیق دهنده امپدانس مورد توجه قرار گرفته و با انتخاب ابعاد و ساختار مناسب موج‌بری در طول موج مخابراتی  $\lambda = 1550\text{nm}$ ، بازدهی ۲۵٪ بدست آمده است. این راندمان با به‌کارگیری ساختار بهینه کوپلاژ به ۳۰٪ افزایش یافت و پهنای باند فرکانسی بسیار وسیع‌تری بدست آمد. برای این منظور از مدل خط انتقال برای بررسی تحلیلی ساختارهای موج‌بری MIM استفاده شده است. مدارهای معادل ادوات پلاسمونی با استفاده از تقریب شبه‌ایستا بدست آمده اند و با به‌کارگیری آن طراحی ساختار بهینه تزویج توان صورت پذیرفته است. برای بدست آوردن منحنی عبور ساختار به صورت تحلیلی از روش ماتریس انتقال بهره گرفته ایم. برای دستیابی به ساختار بهینه از مبدل امپدانس برای تطبیق امپدانس دو موج‌بر استفاده شده است. این مبدل به صورت موجبرهای یک یا چند قسمتی بین دو موج‌بر قرار می‌گیرد و بازتاب موج گسیل شده به ساختار را از مرز موج‌برها در طول موج مورد نظر به صفر می‌رساند. تکنیک‌های مختلفی برای طراحی و تعیین طول و پهنای این موجبرها در این رساله بررسی شده است که از جمله آن‌ها می‌توان روش استفاده از چندجمله‌ای‌های باینومیال و چبی‌چف، و خط انتقال تدریجی را نام برد. صحت روش‌های محاسبه تحلیلی و نیز روش‌های تطبیق امپدانس با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی مورد تایید قرار گرفته است و نتایج این دو با تقریب بسیار خوبی بر هم منطبق هستند. شبیه‌سازی‌های عددی بر اساس الگوریتم تفاضل محدود در حوزه زمان در نرم افزار MATLAB و محیط برنامه نویسی C++ انجام شده است و نتایج تحلیلی با استفاده از نرم افزار Mathematica حاصل شده است.

## فهرست مطالب:

## فصل اول: مقدمه

۱

- ۱-۱ اهمیت و اهداف پروژه..... ۱
- ۲-۱ معرفی پلاسمون‌های سطحی و تاریخچه آن..... ۲
- ۳-۱ مفاد پایان‌نامه..... ۴

## فصل دوم: پلاسمونیک

۵

- ۱-۲ مقدمه..... ۵
- ۲-۲ معادله‌های انتشار امواج الکترومغناطیسی در فلزها..... ۶
- ۱-۲-۲ ثابت دی‌الکتریک نسبی فلزات و رابطه پاشندگی..... ۱۰
- ۲-۲-۲ سرعت فاز و گروه..... ۱۴
- ۳-۲ پلاسمون-پلاریتون‌های سطحی در مرز مشترک فلز و عایق..... ۱۶
- ۱-۳-۲ رابطه‌ی پاشندگی مد TM..... ۱۶
- ۲-۳-۲ سرعت فاز و گروه پلاسمون-پلاریتون‌های سطحی در مرز عایق و فلز..... ۱۹
- ۳-۳-۲ رابطه پاشندگی مد TE..... ۲۰
- ۴-۲ تحریک پلاسمون‌های سطحی..... ۲۱
- ۵-۲ پلاسمون-پلاریتون‌های تزویج شده در مرز مشترک ساختار سه‌لایه..... ۲۲
- ۱-۵-۲ مقدمه..... ۲۲
- ۲-۵-۲ روش مودال..... ۲۲
- ۳-۵-۲ اندازه مد..... ۲۵

## فصل سوم: مقدمه‌ای بر روش تفاضل محدود در حوزه زمان (FDTD)

۲۷

۱-۳	مقدمه.....	۲۷
۲-۳	روش تفاضل محدود در حوزه‌ی زمان.....	۲۸
۳-۳	روش تفاضل محدود یی.....	۲۸
۴-۳	رابطه‌های انتشار موج در روش FDTD.....	۲۹
۵-۳	پایداری در روش FDTD.....	۳۱
۶-۳	مرز جاذب CPML.....	۳۳

#### ۴۱ فصل چهارم: بررسی تحلیلی ساختارهای MIM با استفاده از تقریب شبه‌ساکن و استفاده از تئوری خط انتقال

۱-۴	مقدمه.....	۴۱
۲-۴	استفاده از مدل خط انتقال برای تحلیل ساختارهای MIM.....	۴۲
۳-۴	مدارهای معادل ادوات پلاسمونیک.....	۴۴

#### ۴۷ فصل پنجم: طراحی ساختارهای تزیین‌شده بین دو موج-بر MIM، نتایج تئوری، و شبیه‌سازی عددی

۱-۵	مقدمه.....	۴۷
۲-۵	بررسی ساختار کاواک تشدید تزیین شده به موج-بر MIM.....	۴۸
۱-۲-۵	رابطه طول موج تشدید کاواک و عوامل موثر در مشخصات عبور.....	۴۹
۲-۲-۵	اثر تغییر ضریب شکست ماده پرکننده کاواک در طول موج تشدید.....	۵۱
۳-۲-۵	اثر تغییر طول کاواک در منحنی عبور ساختار.....	۵۲
۴-۲-۵	اثر تغییر عرض کاواک در منحنی عبور ساختار.....	۵۲
۵-۲-۵	اثر تغییر پهنای شکاف فلزی بین موج-بر و کاواک.....	۵۳
۶-۲-۵	ضریب کیفیت ساختار.....	۵۴
۳-۵	کاربردهای ساختارهای شامل کاواک تشدید.....	۵۵



۵۵	۱-۳-۵ فیلتر.....
۵۷	۲-۳-۵ حسگر.....
۵۷	۳-۳-۵ مقسم توان و طول موج.....
۵۹	۴-۵ تطبیق دو موج <sup>-</sup> بر پلاسمونی.....
۵۹	۱-۴-۵ تابع انتقال ساختار پلاسمونی با استفاده از ماتریس انتقال.....
۶۲	۲-۴-۵ تطبیق امپدانس به وسیله مبدل امپدانسی.....
۶۳	۳-۴-۵ تطبیق دو موج <sup>-</sup> بر پلاسمونی با استفاده از یک مبدل یک چهارم طول موج.....
۶۶	۴-۴-۵ اتصال دو موج <sup>-</sup> بر پلاسمونی با استفاده از چند موج <sup>-</sup> بر واسط.....
۷۱	۵-۴-۵ تطبیق امپدانس به وسیله خط انتقال تدریجی.....
۷۵	۶-۵ تطبیق دو موج <sup>-</sup> بر پلاسمونی با استفاده از استاب.....

## فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهاد

۷۷

مراج

۷۹

## فهرست شکل‌ها:

- شکل ۱-۲: تابع دی الکتریک الکترون آزاد (منحنی پر) که منطبق بر مقادیر منتشر شده دی الکتریک در مقالات [۲۲] برای طلا است (منحنی نقطه‌چین). ..... ۱۲
- شکل ۲-۲: ساختار مورد نظر در بررسی مد TM در فصل مشترک ..... ۱۶
- شکل ۳-۲: نمودار عمومی پاشندگی. (۱) خط نور در فضای آزاد. (۲) خط نور در سیلیکا. (۳) پاشندگی SPP در مرز مشترک نقره-خلاء. (۴) پاشندگی SPP در مرز مشترک نقره-سیلیکا. .... ۲۰
- شکل ۴-۲: ساختار سه لایه پلاسمونی ..... ۲۲
- شکل ۵-۲: نمودار پاشندگی مدهای زوج و فرد را برای پهنای دی الکتریک ۵۰ و ۱۰۰ نانومتر [۲۳]. ..... ۲۵
- شکل ۶-۲: اندازه مد SPP در حد فاصل نقره و دی الکتریکهای متفاوت [۲۳]. ..... ۲۶
- شکل ۱-۳: محل قرارگیری میدان‌ها در یک سلول از شبکه‌ی بی ..... ۲۹
- شکل ۲-۳: میزان جذب جاذب CPML با تغییر فرکانس ..... ۴۰
- شکل ۱-۴: شمای موج بر MIM و جهت میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی ..... ۴۳
- شکل ۲-۴: میدان الکتریکی نرمالیزه در عرض موج بر MIM (الف) برای پهنای مختلف موج بر در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر، و (ب) برای طول موج‌های مختلف در موج بر با عرض ۱۰۰ نانومتر ..... ۴۴
- شکل ۳-۴: (الف) شمای اتصال پلاسمونی موج برهایی با پهنای  $d_1$  و  $d_2$  و (ب) مدار معادل خط انتقال آن ..... ۴۵
- شکل ۱-۵: نمای کاواک تشدید تزویج شده به موج بر MIM ..... ۴۸
- شکل ۲-۵: نمودار قسمت حقیقی ضریب شکست موثر بر حسب ضریب شکست ماده پرکننده موج بر و کاواک ..... ۵۰

شکل ۵-۳: نمودار ضریب عبور و بازتاب از ساختار شکل ۵-۱. طول و عرض کاواک، به ترتیب ۵۵۰ و ۵۰ نانومتر است. .... ۵۰

شکل ۵-۴: اثر تغییر ضریب شکست کاواک در دومین طول موج تشدید. .... ۵۱

شکل ۵-۵: (الف) نمای موج<sup>-</sup>بر با دو کاواک تزویج شده یکسان. (ب) نمودار ضریب عبور برای طول‌های مختلف کاواک  $w = 100nm$  و  $g = 17nm$  است. .... ۵۲

شکل ۵-۶: نمودار ضریب عبور برای عرض‌های مختلف کاواک. ساختار شکل (۵-۵-الف)، به ازای  $g = 17nm$  و  $l = 240nm$ . .... ۵۳

شکل ۵-۷: (الف) نمودار طول موج تشدید مد اول و دوم بر حسب عرض کاواک. (ب) توزیع میدان مغناطیسی مد اول و دوم، به ترتیب در طول موج‌های تشدید اول و دوم. .... ۵۳

شکل ۵-۸: طیف توان عبوری برای پهناهای مختلف شکاف بین موج<sup>-</sup>بر و کاواک. .... ۵۴

شکل ۵-۹: نمودار ضریب کیفیت برای پارامترهای مختلف کاواک. .... ۵۵

شکل ۵-۱۰: (الف) شمای فیلتر میان‌نگذر شامل دو کاواک یکسان که در یک سمت موج<sup>-</sup>بر تزویج شده-اند. (ب) شمای فیلتر میان‌نگذر با کاواک تزویج شده سر راه موج<sup>-</sup>بر. .... ۵۶

شکل ۵-۱۱: فیلتر طول موجی (الف) بالاگذر و (ب) پایین‌گذر [۶۱]. .... ۵۶

شکل ۵-۱۲: حسگر ضریب شکست مایع و گاز یا استفاده از ساختار کاواک. .... ۵۷

شکل ۵-۱۳: جداساز طول موج یا استفاده از ساختار کاواک. .... ۵۸

شکل ۵-۱۴: مقسم توان با استفاده از ساختار کاواک. .... ۵۸

شکل ۵-۱۵: (الف) شمای اتصال پلاسمونی موج<sup>-</sup>برهایی با پهناهای  $d_1$  و  $d_2$  و (ب) مدار معادل خط انتقال آن. .... ۶۰

شکل ۵-۱۶: پارامترها و ولتاژهای ورودی و خروجی برای (الف) ماتریس پراکندگی، و (ب) ماتریس انتقال. .... ۶۰

شکل ۵-۱۷: شمای اتصال دو موج<sup>-</sup>بر پلاسمونی با واسطه  $N-1$  موج<sup>-</sup>بر با عرض‌های .....  
.....  $d_2, d_{(N-1)}, \dots, d_1$  ..... ۶۱

شکل ۵-۱۸: شمای اتصال دو موج<sup>-</sup>بر پلاسمونی با واسطه یک مبدل ربع طول موج. .... ۶۳

شکل ۵-۱۹: نتایج شبیه‌سازی FDTD برای توان عبوری از یک اتصال پلاسمونی با یک موج<sup>-</sup>بر واسط با طول  $l_s$  و عرض  $d_s$ ..... ۶۴

شکل ۵-۲۰: طیف عبور توان از یک موج<sup>-</sup>بر مستقیم (منحنی خط‌چین)، اتصال مستقیم پلاسمونی (منحنی نقطه‌چین)، و اتصال با یک واسطه مبدل یک‌چهارم طول موج با شبیه‌سازی FDTD (منحنی پر) و تحلیلی (دایره)..... ۶۵

شکل ۵-۲۱: طیف بازتاب از اتصال پلاسمونی با یک مبدل یک‌چهارم طول موج..... ۶۶

شکل ۵-۲۲: (الف) طیف بازتاب از اتصال پلاسمونی با مبدل یک‌چهارم طول موج ۲ و ۳ قسمتی باینومیال. (ب) پهنای باند نسبی بر حسب تعداد قسمت‌های مبدل باینومیال..... ۶۷

شکل ۵-۲۳: طیف بازتاب از اتصال موج<sup>-</sup>بر پلاسمونی با مبدل یک‌چهارم طول موج ۲ و ۳ قسمتی چپی<sup>-</sup>شف..... ۶۹

شکل ۵-۲۴: شکل ۵-۲۴ (الف) طیف عبور توان از یک موج<sup>-</sup>بر مستقیم (منحنی سیاه رنگ)، اتصال مستقیم پلاسمونی (منحنی آبی رنگ)، اتصال با واسطه مبدل یک‌چهارم طول موج یک قسمتی (منحنی بنفش)، و اتصال با واسطه مبدل‌های چند قسمتی باینومیال به صورت شبیه‌سازی FDTD (منحنی پر) و تحلیلی (دایره). (ب) اتصال با واسطه مبدل یک‌چهارم طول موج چند قسمتی چپی<sup>-</sup>شف به صورت شبیه‌سازی FDTD (منحنی پر) و تحلیلی (دایره)..... ۷۰

شکل ۵-۲۵: منحنی عبور توان از یک موج<sup>-</sup>بر مستقیم (منحنی سیاه رنگ)، اتصال مستقیم پلاسمونی (منحنی آبی رنگ)، و اتصال با واسطه مبدل طول موج چند قسمتی چپی<sup>-</sup>شف با  $\rho_m$  های مختلف..... ۷۱

شکل ۵-۲۶: مدار معادل خط انتقال مبدل تدریجی..... ۷۲

شکل ۵-۲۷: طیف بازتاب از اتصال پلاسمونی با مبدل تدریجی ۶ قسمتی نمایی و مثلثی..... ۷۳

شکل ۵-۲۸: طیف عبور توان از یک موج<sup>-</sup>بر مستقیم (منحنی خط‌چین)، اتصال مستقیم پلاسمونی (منحنی نقطه‌چین)، اتصال با واسطه مبدل یک‌چهارم طول موج یک قسمتی (منحنی خط‌نقطه)، و اتصال با واسطه مبدل تدریجی به صورت شبیه‌سازی برای تابع نمایی (منحنی خاکستری) و تابع مثلثی (منحنی سیاه رنگ)..... ۷۴

شکل ۵-۲۹: شمای ساختار شامل استاب برای تطبیق دو موج<sup>-</sup>بر پلاسمونی با عرض‌های  $h_1$  و  $h_2$ ..... ۷۵

شکل ۵-۳۰: نتایج طراحی و شبیه‌سازی برای تطبیق دو موج<sup>-</sup>بر با عرض‌های ۱۲۵ و ۲۵ نانومتر، در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر..... ۷۵

**فهرست جدول‌ها**

۱۴	جدول ۱-۲ مقادیر ثابت‌های مدل درود-لورنس [۲۵]
۶۹	جدول ۱-۵ پارامترهای مبدل باینومیال شکل ۵-۱۷
۶۹	جدول ۲-۵ پارامترهای مبدل چبی‌چف شکل ۵-۱۷

# فصل اول: مقدمه

## ۱-۱ اهمیت و اهداف پروژه

در سال‌های اخیر تمرکز شدید نور با تلفات انتشاری قابل قبول، به منظور دستیابی به مدارهای مجتمع نانوفوتونیک، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. نور تزویج شده به نوسانات الکترون-های آزاد در سطح مشترک فلز-دی‌الکتریک، که با عنوان پلاسمون-پلاریتون‌های سطحی شناخته می‌شود، به دلیل تمرکز نور در ابعاد نانومتر، موضوع تحقیقات فراوانی شده‌اند که نانوسیم‌های فلزی، آرایه نانوذرات فلزی و گوه‌های V شکل از آن جمله‌اند. برخی از این ساختارها با تمرکز نور در هسته دی‌الکتریک محدود شده بین دو لایه فلزی، عبور نور در ابعاد نانومتر را فراهم می‌کنند. این ساختار نه تنها طول انتشار مناسبی دارند، بلکه تمرکز مکانی خوبی نیز ایجاد می‌کنند. در نتیجه می‌توان از آن برای طراحی سیستم‌های تمام نوری استفاده کرد.

در این پروژه، به اختصار به معرفی پلاسمونیک می‌پردازیم. با بررسی ساختارهای شامل موجبر تشدید در ساختار فلز-دی‌الکتریک-فلز، و با استفاده از طراحی تحلیلی مناسب، اتصال بدون بازتابی را پیشنهاد و صحت طراحی را به روش عددی تفاضل محدود در حوزه زمان، تایید می‌کنیم.

## ۲-۱ معرفی پلاسمون‌های سطحی و تاریخچه آن

اولین مشاهده ثبت شده از پلاسمون‌های سطحی<sup>۱</sup> به سال ۱۹۰۲ مربوط می‌شود. وود<sup>۲</sup> در بررسی طیف نور شکست یافته از سطح ناهموار یک فلز به وجود باندهای باریک تاریک، که مسئله غیرمعمول تا آن زمان بود، پی برد. این دسته از امواج از اواخر قرن بیستم در مفهوم امواج رادیویی به عنوان امواج رونده در راستای سطح زمین مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در سال ۱۹۴۰ این مدها به منظور توجیه اثر غیر معمول وود، در باند فرکانس نوری بررسی شد [۱-۳]. او در طی تحقیقات خود، علت مشاهده این پدیده را تحریک امواج الکترومغناطیسی سطحی در سطح ناهموار دانست. در سال ۱۹۵۸، توربادار<sup>۳</sup> یک ورقه فلزی نازک را که روی یک زیرآیند قرار گرفته بود، در معرض تابش نور قرار داد. او یک افت بسیار زیادی در نور بازتابیده شده مشاهده نمود اما این موضوع را مرتبط با SP ندانست [۴-۵]. در سال ۱۹۶۸، اتو<sup>۴</sup> نتیجه مشاهدات توربادار را تشریح کرد و نشان داد که کاهش در نور بازگشتی در روش بازتاب کامل تضعیف شده<sup>۵</sup> ناشی از تحریک SP هاست [۶].

در اواخر سال ۱۹۷۰، برای اولین بار SPها به منظور شناسایی مشخصات لایه‌های نازک<sup>۶</sup> و بررسی نقاط مرزی در فلزات مورد استفاده قرار گرفتند [۷].

به طور اجمال، SP به مدهای موج<sup>-</sup>بری که تنها به یک مرز مشترک نیاز دارند، اطلاق می‌شود. تجربه نشان داده است فناوری‌نانو می‌تواند برای کاهش طول موج و سرعت گروه SP مورد استفاده قرار گیرد که در نتیجه باعث افزایش شدت میدان و تمرکز نور در ابعادی کمتر از طول موج خواهد شد.

<sup>1</sup> Surface Plasmon (SP)

<sup>2</sup> Wood

<sup>3</sup> Thurbadar

<sup>4</sup> Otto

<sup>5</sup> Attenuated Total Refraction (ATR)

<sup>6</sup> Thin Film

پلاسمون‌های سطحی محلی<sup>۱</sup> مربوط به ذرات فلزی که برای تقویت میدان‌های الکترومغناطیسی به کار برده می‌شوند، با استفاده از تقریب شبه-ایستا تحلیل می‌شوند.

کاربردهای پلاسمون‌های سطحی نانوفتونیک شامل حسگرهای تشدید SP، طیف‌نگاری تقویت شده رامان، فلورسانس تقویت شده، نور غیرخطی، تصویر برداری میدان نزدیک، لیتوگرافی در ابعاد کوچک و... حائز اهمیت هستند.

کارهای اولیه در زمینه دی‌پل‌های تشعشی در سطح زمین منجر به حل معادله‌های موج‌های سطحی شد. بعدها کشف شد که این امواج سطحی نقش بسیار مهمی در تلف انرژی الکترون در سطوح فلزات دارند. تمام تزویج‌های نوری با این امواج به روش ATR قابل بیان بوده و این روش نقش بسزایی را در حسگرهای مدرن امروزی ایفا می‌کند [۸-۱۰].

پلاسمون‌های سطحی باعث تقویت زیاد میدان‌های نوری در مرز فلز شده و می‌توانند برای تقویت پروسه‌های نوری ضعیف نظیر ایجاد هارمونیک دوم مورد استفاده قرار گیرند [۱۱]. تقویت میدان در نانو ساختارهای فلزی که در آن‌ها نور می‌تواند در ابعادی کوچک‌تر از طول موج تمرکز یابد، بسیار بیشتر خواهد بود. چنین تقویتی این امکان را می‌دهد که پراکندگی رامان تقویت شده در سطح یک ملکول مشاهده شود. در حالی که پراکندگی رامان معمولی حتی بسیار ضعیف‌تر از روش فلورسانس است [۱۲].

امروزه با بهبود روش‌های ساخت نانوساختارها، جامعه علمی در تلاش است تا با کنترل قابلیت‌های SP، نور را در ابعاد نانومتری متمرکز کرده و از کاربردهای آن بهره‌مند شوند [۱۳-۱۷].

در سال‌های اخیر تلاش‌های فراوانی به منظور ارتقاء ساختارهای پلاسمونی در جهت هدایت سیگنال‌های سطحی صورت گرفته است. یکی از اصلی‌ترین مباحث یافتن راهی برای تمرکز SPها در یک

<sup>1</sup> Localized Surface Plasmon (LSP)



پروسه با تلفات پایین و در یک پیکربندی مناسب و هماهنگ با دیگر ساختارهای فوتونیک است. در میان ساختارهای متنوع موج-برهای پلاسمونی موج-برهای فلز-عایق-فلز<sup>۱</sup> توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. یکی از ویژگی‌های کلیدی این ساختارها این است که حد تفرق<sup>۲</sup> نمی‌تواند محدودیتی برای ابعاد آن ایجاد کند. به این معنی که ابعاد کل ساختار پلاسمونی ممکن است از طول موج طراحی نیز کمتر یا با آن قابل مقایسه باشد. هدف از این مجموعه بررسی موجبر پلاسمونی، استفاده از طول و پهنای مناسبی از آن به عنوان واسط برای تطبیق اتصال دو موج-بر پلاسمونی با پهنای متفاوت، و ارائه نتایج مربوط به شبیه‌سازی است.

### ۳-۱ مفاد پایان‌نامه

در فصل دوم، تئوری الکترومغناطیسی مربوط به SPها، انتشار پلاسمون‌های سطحی، شرایط لازم برای تحریک این امواج در مرز مشترک دی‌الکتریک و فلز و نیز نحوه تحلیل این امواج بیان می‌شود. فصل سوم مروری بر روش عددی به کار برده شده در تحلیل ساختار پلاسمونی است. در فصل چهارم روش تحلیلی بررسی ساختارهای MIM با استفاده از تقریب شبه-ایستا بیان می‌شود. در فصل پنجم روش‌های تحلیلی و نتایج شبیه‌سازی ارائه می‌شود و در فصل ششم نتیجه‌گیری و پیشنهادها ارائه می‌شوند.

---

<sup>۱</sup>Metal-Isolator-Metal (MIM)

<sup>۲</sup> Diffraction limit

# فصل دوم: پلاسمونیک

## ۱-۲ مقدمه

تئوری‌های ضروری و مرتبط با موج<sup>۱</sup>-برهای پلاسمونی در این فصل بررسی می‌شوند. پلازما گروهی از ذرات باردار مثبت و منفی است که در مجموع از لحاظ بار الکتریکی خنثی است. نوسان پلازما زمانی اتفاق می‌افتد که گروهی از بارها جابه‌جا می‌شوند؛ مثلاً در یک فلز الکترون‌ها به سمت یون‌های مثبت حرکت می‌کنند [۱۸]. پلاسمون یک بوسان<sup>۲</sup> است و در نتیجه از احتمال بوس-انیشترین<sup>۳</sup> پیروی می‌کند [۱۹]، که در اینجا وارد جزئیات آن نمی‌شویم. در فرکانس‌های نوری، از مدل درود<sup>۳</sup> و لورنس برای بیان خواص فلز استفاده می‌شود [۲۰-۲۱].

در فرکانس‌های خاصی نور به راحتی در فلز منتشر می‌شود در حالی که ممکن است در دیگر فرکانس‌ها نور با تضعیف بسیار بالا مواجه شده و یا شاهد انتشار امواج سطحی باشیم. برای فرکانس‌هایی تا فرکانس نور مرئی فلزات بسیار بازتاباننده‌اند و اجازه عبور موج را از خود نمی‌دهند. در این فرکانس‌ها، نفوذ امواج به داخل فلز قابل صرف نظر بوده و تقریب رسانای خوب یا کامل برای بسیاری از اهداف مفید است. در فرکانس‌های بالاتر، نزدیک فرسرخ و محدوده نور مرئی نفوذ میدان به طور

---

<sup>1</sup>Boson

<sup>3</sup>Bose-Einstein

<sup>3</sup>Drude

قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد که در نتیجه تلفات افزایش پیدا خواهد کرد. در نهایت در فرکانس‌های فرابنفش، فلزات رفتاری همانند دی‌الکتریک داشته و اجازه می‌دهند که امواج در آن‌ها منتشر شوند. اگرچه متناسب با جزئیات باندهای الکترونی مرتبه‌های متفاوتی از تضعیف را نیز از خود نشان می‌دهند. به طور مثال فلزات قلیایی همانند سدیم که پاسخی شبیه به الکترون آزاد دارد، شفافیت فرابنفشی از خود نشان می‌دهد. از سوی دیگر فلزات ناب مانند طلا و نقره در این بازه فرکانسی جذب بالایی دارند [۲۲]. در اینجا هدف فراهم آوردن مقدمات ضروری برای بحث موج<sup>۱</sup>-برهای پلاسمون-پلاریتون‌های سطحی<sup>۱</sup> است به طوری که بتوان به محیط‌های پاشنده و با تلفات تعمیم داد.

## ۲-۲ معادله‌های انتشار امواج الکترومغناطیسی در فلزها

برهم‌کنش فلز با میدان‌های موج الکترومغناطیسی بر اساس معادله‌های ماکسول قابل بیان هستند. ابتدا از معادله<sup>۱</sup>-های ماکروسکوپی ماکسول شروع می‌کنیم:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_{ext}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1-2)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_{ext} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

که در آن‌ها،  $\mathbf{E}$ ،  $\mathbf{H}$ ،  $\mathbf{B}$  و  $\mathbf{D}$  به ترتیب میدان‌های الکتریکی، مغناطیسی، چگالی شار الکتریکی و مغناطیسی هستند. این معادله‌ها چهار میدان ماکروسکوپی  $\mathbf{E}$ ،  $\mathbf{D}$ ،  $\mathbf{H}$  و  $\mathbf{B}$  را با چگالی‌های بار و جریان خارجی،  $\rho_{ext}$  و  $\mathbf{J}_{ext}$  مرتبط می‌کنند.

<sup>۱</sup>Surface Plasmon Polariton (SPP)

این چهار میدان از طریق بردار قطبی شدگی،  $P$ ، و بردار مغناطیسی شدگی،  $M$ ، به هم مرتبط می-شوند:

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (2-2)$$

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{B} - \mathbf{M} \quad (3-2)$$

در اینجا بحث را فقط بر روی اثرهای قطبش الکتریکی که با چگالی بارهای مقید داخلی،  $\rho_b$  با رابطه  $\nabla \cdot \mathbf{P} = -\rho_b$  ارتباط دارد، متمرکز می کنیم. برای چگالی جریان داخلی نیز داریم:

$$\mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t} \quad (4-2)$$

در محیطهای خطی، همه سو یکسان و غیر مغناطیسی خواهیم داشت:

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon \mathbf{E} \quad (5-2)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu \mathbf{H} \quad (6-2)$$

$\epsilon$  ثابت دی الکتریک یا گذردهی نسبی است و برای محیط غیر مغناطیسی ضریب نفوذپذیری نسبی  $\mu = 1$  خواهد بود.

رابطه مهم دیگر، رابطه خطی میان چگالی جریان داخلی و میدان الکتریکی است که از طریق ضریب هدایت  $\sigma$  بیان می شود:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (7-2)$$

اعتبار رابطه اخیر و رابطه ارائه شده برای  $\mathbf{D}$  تنها برای محیطهای خطی و بدون پاشندگی زمانی و مکانی صادق است. پاسخ نوری فلزات، به صورت زیر به فرکانس وابسته است: