



دانشکده برق و کامپیوتر

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق - مخابرات میدان

استاد راهنما

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده برق و کامپیوتر

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق - مخابرات میدان

استاد راهنما



دانشکده برق و کامپیوتر

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی برق – مخابرات (میدان) خانم هدی فداکار

تحت عنوان

در تاریخ ۸۹/۱/۲۱ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

دکتر ابوالقاسم زید آبادی نژاد

۱- استاد راهنمای پایان نامه

دکتر امیر برجی

۲- استاد مشاور پایان نامه

دکترسید محمود مدرس هاشمی

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده

مشکر و قدردانی

سپاس بی کران خداوند یکتا را که به ما، هستی بخشید و به طریق علم و اندیشه، رهنمون کرد و به همنشینی با رهروان آن منسخر نمود.

اکنون و در پایان این مرحله شایسته است از کلیه کسانی که در این راه مرایاری کردند مشکر و قدردانی نمایم. از اساتید ارجمندم جناب آقای دکتر زید آبادی نژاد و جناب آقای دکتر برجی که با راهنمایی و مشاوره خود راهگشای اینجانب بوده اند، کمال مشکر و سپاسگزاری را دارم و برایشان آرزوی سلامتی و توفیق روزافزون می نمایم. از پدر و مادر عزیزم که در دوران تحصیل و در این تحقیق مشوق اینجانب بوده اند سپاسگزارم و از خداوند موفقیست و بهروزشان را خواستارم. همچنین از همه دوستان خوبم صمیمانه مشکر می کنم.

()

.

.

تقدیم بہ:

یگانہ منجی عالم

هشت	فهرست مطالب
۱	چکیده
۲	۱-۱ معرفی
۵	۲-۱ تاریخچه
۶	۳-۱ ساختار پایان نامه
۸	۱-۲ رفتار الکترومغناطیسی فلزات
۱۱	۲-۲ پلاریتون پلاسمونهای سطحی
۱۳	۳-۲ تحریک امواج پلاریتون پلاسمون سطحی
۱۳	۱-۳-۲ تزویج با منشور
۱۵	۲-۳-۲ تزویج با گریٹینگ
۱۵	۳-۳-۲ تحریک با میدان های نزدیک
۱۶	۴-۳-۲ روش تحریک از انتها
۱۶	۴-۲ تحلیل ناهمواریهای سطحی در محیطهای دولایه و سه لایه
۱۷	۱-۴-۲ روش معادله رایلی کاهش یافته برای محیط دو لایه
۲۳	۲-۴-۲ روش معادله رایلی کاهش یافته برای محیط دولایه با تلفات
۲۴	۳-۴-۲ روش معادله انتگرالی قضیه اطفاء برای محیط دولایه
۳۰	۴-۴-۲ روش معادله رایلی کاهش یافته برای محیط سه لایه (تیغه) [۱۳]
۳۳	۵-۴-۲ رفتار مودهای با زاویه انتشار دلخواه در محیطهای دولایه دارای تلفات
۳۶	۶-۴-۲ روش پیدا کردن صفرهای دترمینان
۳۸	۵-۲ نتیجه گیری
۳۹	3-1 نوار با سطح مقطع مستطیلی با مرزهای هموار
۴۰	3-1-1 روش ضریب شکست موثر (EIM)
۴۲	۲-۱-۳ روش پیشنهادی
۴۴	۲-۳ نوار با سطح مقطع مستطیلی با یک مرزهای ناهموار
۴۴	۳-۳ نتیجه گیری
۴۵	۱-۴ محیط دولایه
۴۸	۱-۱-۴ فصل مشترک ناهموار در محیط بدون تلفات
۶۰	۲-۱-۴ فصل مشترک ناهموار در محیط با تلفات
۶۵	۲-۴ محیط سه لایه

۶۷	..... فصل مشترک ناهموار در محیط بدون تلفات	۱-۲-۴
۶۸	..... فصل مشترک ناهموار در محیط با تلفات	۲-۲-۴
۷۲	..... نوار با سطح مقطع مستطیلی	۳-۴
۷۴	..... نتیجه گیری	۴-۴
.....		
۷۶	..... نتیجه گیری	۱-۵
۷۸	..... پیشنهادات	۲-۵
.....		

امواج پلاریتون پلاسمون‌های سطحی، امواجی هستند که در فصل مشترک دو محیط با ثابت دی‌الکتریک‌های مختلف علامه انتشار می‌یابند. با توجه به این که فلزات در فرکانس‌های نوری ثابت دی‌الکتریک منفی از خود نشان می‌دهند، بنابراین در فصل مشترک فلز/عایق امواج پلاریتون پلاسمون‌های سطحی می‌توانند منتشر شوند. پلاریتون پلاسمون‌های سطحی با دور شدن از فصل مشترک دو محیط به صورت نمایی میرا و منجر به محصور شدن امواج در فصل مشترک دو محیط می‌شوند. در سال‌های اخیر به دلیل ابعاد کوچکتر از طول موج ساختار توجه زیادی به این امواج جلب شده است. پلاسمونیک مهمترین بخش در زمینه نانوفوتونیک است و کاربردهای فراوانی در مدارهای مجتمع الکترونیکی فرکانس بالا، مخابرات نوری و حسگرها دارد. نوار فلزی با سطح مقطع مستطیلی به عنوان موجبر در مدارهای مجتمع نوری به کار می‌رود. از خاصیت‌های دیگر نوار فلزی با سطح مقطع مستطیلی داشتن مود دور-برد است. که با کاهش ضخامت فلز تلفات این مود کاهش یافته و طول انتشار افزایش می‌یابد.

به دلیل محصور شدن امواج پلاریتون پلاسمون‌های سطحی در فصل مشترک دو محیط، این امواج به ساختار سطح بسیار حساس هستند، و ناهمواری‌های سطحی باعث تغییر معادله پاشندگی آن‌ها می‌گردد. به طور کلی ناهمواری‌های روی سطح را می‌توان به صورت ۱- تابعی تصادفی ۲- تابعی معین با معادله مشخص و متناوب مدل کرد که در این جا ناهمواری‌ها را به صورت گریتنینگ با تابع متناوب مثلثی یا سینوسی مدل می‌شوند.

در این پایان نامه اثر ناهمواری‌های سطح هادی، در ساختارهای دو لایه متشکل از عایق و فلز در فرکانس‌های نوری در حالت دو بعدی و با زاویه انتشار دلخواه تحلیل و شبیه‌سازی می‌شود. برای بررسی ناهمواری‌ها روش‌های عددی مختلفی وجود دارد. اما در این جا از روش‌های که ترکیبی از تحلیلی و عددی هستند، استفاده می‌گردد. سپس اثر این ناهمواری‌ها بر تیغه فلزی در عایق یعنی محیط سه لایه عایق/فلز/عایق (تیغه)، و در انتها اثر ناهمواری‌ها در نوار فلزی با سطح مقطع مستطیلی، تحلیل و بررسی می‌شود. برای تحلیل نوار فلزی از روش تقریبی ضریب شکست موثر که نوار فلزی را به صورت دو تیغه در راستای عمود بر هم مدل می‌کند، استفاده می‌شود و پیشنهادی برای اصلاح این روش ارائه می‌گردد.

کلمات کلیدی: ۱- امواج پلاریتون پلاسمون‌های سطحی ۲- ناهمواری‌ها ۳- معادله رایلی کاهش یافته ۴- معادله انتگرالی قضیه اطفاء

با توجه به اینکه فوتون^۱ به عنوان حامل^۲ اطلاعات نسبت به الکترون سریعتر است و ظرفیت بیشتری جهت انتقال اطلاعات را دارد، استفاده از فوتونیک^۳ افزایش یافته است. اما از آنجا که در مقایسه با میکرو الکترونیک ادوات^۴ فوتونیک متداول همانند فیبر نوری اندازه بزرگی دارند، محدودیت بزرگی در مجتمع سازی نوری ایجاد می کنند. این نکته حتی برای بلورهای فوتونیک نیز صادق می باشد. زیرا دوره تناوب و اندازه بلورهای فوتونیک معمولاً در حد طول موج الکترومغناطیسی می باشد. در سالهای اخیر با استفاده از پلاسمونیک بر این مشکل غلبه شده است. اندرکنش^۵ نور با نانو ساختارهای فلزی باعث ایجاد شاخه جدیدی به نام پلاسمونیک^۶ در فوتونیک شده است. نکته کلیدی این است که امواج الکترومغناطیسی که معمولاً در موجبرهای عایقی منتشر می شوند، می توانند در سطح فلزات نیز به صورت امواج پلاریتون پلاسمونهای سطحی^۷ (SPP) منتشر شوند. امواج پلاریتون پلاسمونهای سطحی با دور شدن از فصل مشترک دو محیط به صورت نمایی میرا می شوند [۱] و منجر به محصور شدن امواج در فصل مشترک دو محیط می شوند. بنابراین به شدت می توان میدانها را به سطح فلزات محصور^۸ کرد به طوری که ابعاد

¹ Photon

² Carrier

³ Photonic

⁴ Component

⁵ Interaction

⁶ Plasmonics

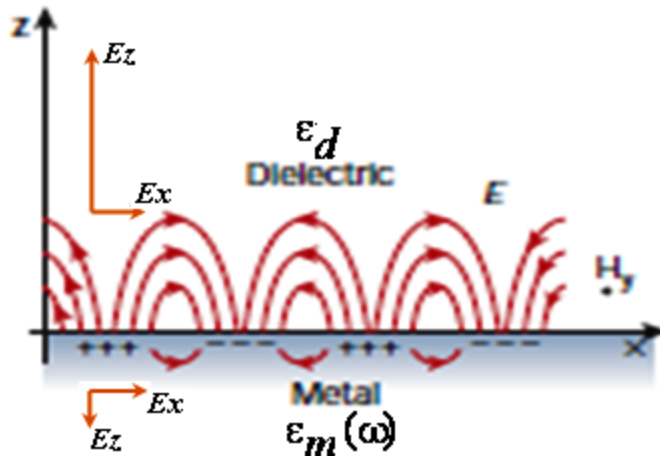
⁷ Surface Plasmon Polariton

⁸ Confine

عرضی آنها بسیار کوچکتر از طول موج می‌باشد. در نتیجه ادوات پلاسمونیک هم ظرفیت فوتونیک و هم کوچک بودن الکترونیک را دارا می‌باشند و راه جدیدی برای کاربردهای بعدی باز می‌کنند.

پلاسمونیک مهمترین بخش در زمینه نانوفتونیک می‌باشد و کاربردهای فراوانی در مدارهای مجتمع^۱ الکترونیکی فرکانس بالا، مخابرات نوری و حسگرها دارد [۲، ۳، ۴، ۵ و ۶]. موجبر، سوئیچ، مدولاتور پلاسمونی در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته شده‌اند. موجبرهای پلاسمونی، اجازه انتقال نور در ابعاد کوچکتر از طول موج را می‌دهد. در نتیجه این نوع از موجبرها نامزد مناسبی برای ارتباطات روی تراشه نسل بعدی هستند. زیبایی دیگر این زمینه این است که می‌توان آن را با فیزیک کلاسیک بررسی کرد. تحلیل پلاسمون‌ها نیاز به دانش اضافی در زمینه الکترومغناطیس ندارد و تحلیل آنها با داشتن زمینه مناسب درباره معادلات ماکسول و شرایط مرزی میدان‌های الکترومغناطیسی به سهولت امکان پذیر است.

از معایب امواج پلاریتون پلاسمون‌های سطحی که در فصل مشترک فلز/عایق منتشر می‌شوند، تلفات زیاد آنها است. با کاهش تلفات انحصار این امواج به فصل مشترک دو محیط کاهش می‌یابد. بنابراین بین تلفات و انحصار بده و بستان وجود دارد و نمی‌توان همزمان موج کاملاً منحصر شده به فصل مشترک دو محیط و با تلفات کم داشت.



شکل (۱-۱): انتشار امواج پلاریتون پلاسمون‌های سطحی در فصل مشترک دو محیط

فلزات در فرکانس‌های نوری ثابت دی‌الکتریک منفی از خود نشان می‌دهند، بنابراین در فصل مشترک^۲ فلز/عایق امواج الکترومغناطیسی سطحی می‌توانند منتشر شوند [۱]. به این امواج، پلاریتون پلاسمون‌های سطحی گفته می‌شود که در اثر تزویج^۳ میدان‌های الکترومغناطیسی طولی TM با پلاسمون‌های سطح ایجاد می‌شوند. پلاسمون‌های سطحی، کوانتای^۴ نوسان سطحی الکترون‌های باند هدایت فلز می‌باشند [۷]. میدان الکترونیکی این امواج دارای دو مولفه عمود و مماس بر سطح است. در ناحیه فلز بخش عمده میدان الکترونیکی را مولفه مماسی تشکیل

¹ Integrated Circuit

² Interface

³ Couple

⁴ Quantum

می‌دهد و باعث نوسان طولی الکترون‌ها به سمت جلو و عقب در جهت انتشار می‌شود. شکل (۱-۱) این امواج طولی را که در فصل مشترک فلز/عایق انتشار می‌یابند را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه ثابت انتشار این امواج از مولفه مماسی بردار موج نور تابشی بزرگتر می‌باشد، به طور مستقیم توسط نور تابشی نمی‌توان این امواج را تحریک کرد. برای جبران عدم تطبیق بردار موج^۱ مودهای SPP و نور تابشی چندین تکنیک خاص معرفی شده است. از جمله این تکنیک‌ها می‌توان تزویج توسط منشور یا بازتابش کلی، تزویج موجبری با استفاده از فیبر نوری، تزویج توسط گریتینگ^۲ و تحریک توسط میدان‌های نزدیک و غیره را نام برد [۱].

با توجه به اینکه امواج SPP به فصل مشترک دو محیط محصور شده‌اند، به ساختار سطح بسیار حساس هستند و ناهمواری‌های فصل مشترک دو محیط باعث تغییر ثابت انتشار امواج SPP می‌شود. در سالهای اخیر برهم کنش نور و سطوح ناهموار بسیار مورد توجه قرار گرفته شده است [۸ و ۹]. در حالت کلی ناهمواری‌های روی سطح را می‌توان به دو صورت مدل کرد.

۱- تابعی تصادفی

۲- تابعی معین با معادله مشخص و متناوب

بررسی سطوح ناهموار تصادفی و بررسی کمی برهم کنش نور با این سطوح دشوار می‌باشد. تنها در حالتی که ارتفاع ناهمواری‌ها بسیار کم باشد، می‌توان خواص فیزیکی سطح را با خواص آماری بیان کرد [۱۱ و ۱۰]. اما در حالتی که ناهمواری‌ها توسط تابع مشخص متناوب مدل شوند [۱۲، ۱۳ و ۱۴] وضعیت فرق می‌کند و می‌توان برهم کنش نور با این سطوح را، برای ناهمواری‌های با ارتفاع دلخواه بررسی کرد. در این پایان‌نامه تنها حالت دوم بررسی می‌شود و ناهمواری‌ها به صورت گریتینگ با تابع متناوب مثلثی و سینوسی مدل می‌شوند.

روش‌های عددی مختلفی مانند روش تفاضل محدود در حوزه زمان^۳ FDTD، روش اجزای محدود^۴ FEM روش ممان^۵ MOM و غیره برای بررسی انتشار امواج SPP بر روی گریتینگ وجود دارد. اما در این پایان‌نامه از دو روش معادله رایلی کاهش یافته^۶ و روش معادله انتگرالی قضیه اطفاء^۷ جهت تحلیل انتشار امواج SPP بر روی گریتینگ در محیط دولایه عایق/فلز استفاده می‌شود [۱۵ و ۱۶]. این روش‌ها ترکیبی از روش‌های تحلیلی و عددی هستند. در روش معادله رایلی کاهش یافته مسئله پراکندگی^۸ از یک محیط دولایه با در نظر گرفتن تابع موجی که شامل موج ورودی و امواج پراکنده شده است، حل می‌شود روش معادله رایلی کاهش یافته تنها برای گریتینگ با ارتفاع‌های کم همگرا می‌شود. روش معادله انتگرالی قضیه اطفاء بر اساس معادله انتگرالی است که شامل میدان‌های سطح و مشتق آنها است. این معادلات با استفاده از قضیه گرین بدست می‌آید. برای بررسی محیط سه لایه (تیغه^۹) که تنها یک مرز آن دارای گریتینگ است، نیز از روش معادله رایلی کاهش یافته استفاده می‌شود [۱۳].

^۱ Wave vector

^۲ Grating

^۳ Finite Difference Time Domain

^۴ Finite Element Method

^۵ Method Of Moment

^۶ Reduced Rayleigh Equation Method

^۷ Extinction Theorem Integral Equation Method

^۸ Scattering

^۹ Slab

یک ساختار که در این پایان نامه بررسی می‌شود، نوار فلزی با سطح مقطع مستطیلی است که به عنوان موجبر در مدارهای مجتمع نوری به کار می‌رود. موجبر مستقیم و خم‌ها در ساخت تقسیم‌کننده توان، کوپلر و غیره که بلوک‌های اساسی مدارهای مجتمع نوری هستند، به کار می‌روند [۵ و ۶]. برای تحلیل نوار فلزی با سطح مقطع مستطیلی و مرزهای هموار روش‌های عددی مختلفی مانند روش خط^۱ MOL، روش اجزای محدود FEM و روش تفاضل محدود در حوزه زمان FDTD و غیره وجود دارد [۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۳ و ۲۴]. همچنین می‌توان از روش‌های تقریبی که تحلیلی هستند نیز استفاده کرد. از جمله این روش‌ها، روش ضریب شکست موثر^۲، مارکاتیلی^۳ و غیره را می‌توان نام برد [۲۵، ۲۶ و ۲۷]. در این پایان نامه از روش تحلیلی و تقریبی ضریب شکست موثر که نوار فلزی را به صورت دو تیغه در راستای عمود بر هم مدل می‌کند، استفاده می‌شود. تقریب این روش برای ساختارهایی که اختلاف ثابت انتشار دو محیط زیاد باشد، افزایش می‌یابد. در این پایان نامه پیشنهادی برای اصلاح این روش ارائه می‌گردد. جهت بررسی صحت روش پیشنهادی، ثابت انتشار نوار عایقی با سطح مقطع مستطیلی که دارای ثابت دی-الکتریک مثبت است، با استفاده از این روش بدست می‌آید و نتایج با مراجع مقایسه می‌گردد. با استفاده از این روش و روش تحلیل تیغه فلزی که دارای یک مرز ناهموار است می‌توان ثابت انتشار نوار فلزی با سطح مقطع مستطیلی که دارای یک مرز ناهموار است، را بدست آورد.

توصیف ریاضی این امواج در اوائل قرن بیستم در زمینه انتشار امواج رادیویی در سطح هادی خوب توسط سامرفلد^۴ در سال ۱۸۹۹ و زنک^۵ در سال ۱۹۰۷ بیان شد. مشاهده افت غیر عادی شدت در طیف بازتاب نور مرئی از گریتنینگ فلزی (وود^۶، ۱۹۰۲) اولین مشاهده مدهای SPP بود. به هر حال این نتایج با تئوری‌های قبلی مرتبط نشده بود تا اینکه در اواسط قرن فانو^۷ (۱۹۴۱) این نتایج را به صورت امواج شبه ایستا پلاریزه^۸ که به صورت جریان در سطح فلز، توصیف کرد. او به درستی اشاره کرده بود که بردار موج این امواج سطحی در فصل مشترک فلز/عایق از مولفه موازی سطح بردار موج میدان الکترومغناطیسی تابشی بزرگتر است. همچنین خاصیت میرا شدن این امواج در جهت عمود بر سطح را نیز شناسایی کرده بود. در این زمان پدیده اتلاف مرتبط با اندرکنش‌های سطح فلزات با تفرق^۹ پرتو^{۱۰} الکترونی در ورق^{۱۱} فلزی نازک ثبت شده بود (ریتچی^{۱۲}، ۱۹۴۷)، که در سال ۱۹۶۰ با کار روی تفرق گریتنینگ در محدوده نور مرئی ارتباط داده شد (ریتچی، ۱۹۶۸). ریتچی توانست مدل تئوری برای رابطه پاشندگی

¹ Method of Line

² Effective Index Method (EIM)

³ Marcatili

⁴ Sommerfeld

⁵ Zenneck

⁶ Wood

⁷ Fano

⁸ Polarized quasi-stationary waves

⁹ Diffraction

¹⁰ Beam

¹¹ Film

¹² Ritchie

SPP ها در فصل مشترک فلز/خلاء ارائه کند. سپس تحریک امواج سطحی سامرفلد با نور مرئی با استفاده از تزویج^۱ توسط منشور بدست آمد (کرشمان^۲ و راتر^۳) و توصیف همه این پدیده ها به شکل پلاریتون پلاسمون های سطحی انجام شد [۱].

برای اولین بار مطالعه تئوری انتشار دو بعدی SPP ها با زاویه دلخواه بر روی سطح فلزی که دارای گریتنینگ یک بعدی متناوب است، با استفاده از روش تزویج مودها^۴، توسط میل^۵ [۲۸] انجام شد. یکی از نتایج اساسی آنالیز میل بیان کردن رابطه پهنای گاف^۶ در منحنی پاشندگی SPP به صورت تابعی از θ (زاویه بین جهت انتشار SPP و شیارهای مربوط به سطح) است. در [۲۹ و ۳۰] دلیل فیزیکی وجود گاف در منحنی پاشندگی SPP بیان شده است. همچنین در [۳۱] این ساختار با استفاده از معادله رایلی کاهش یافته بررسی شده است. در [۱۲] تنها حالت $\theta = 90$ یعنی عمود بر گریتنینگ (یک بعدی) توسط قضیه اطفاء بررسی شده است. در [۱۳] منحنی پاشندگی انتشار SPP بر روی تیغه فلزی (محیط سه لایه) که تنها یک مرز آن دارای گریتنینگ متناوب است، با استفاده از روش معادله رایلی کاهش یافته بدست آمده است. در [۱۷ و ۱۸] مودهای انتشاری نوار فلزی با سطح مقطع مستطیلی با مرزهای هموار که دارای زیر لایه عایقی با ثابت دی الکتریک ϵ_1 و رولایه عایقی با ثابت دی الکتریک ϵ_2 است، با استفاده از MOL بدست می آید و همچنین تأثیر تغییر عرض و ضخامت نوار بر روی مودها بررسی می شود. تحریک مود دور-برد به دلیل توزیع میدانی که دارد، با روش تحریک از انتها^۷ امکان پذیر است و همچنین با کاهش ضخامت فلز تلفات کاهش یافته و طول انتشار افزایش می یابد. در [۲۱] مودهای این ساختار با استفاده از نرم افزار HFSS که بر اساس روش محاسبه شده اند و همچنین اثر ناهموازی های تصادفی بر این ساختار به دست آمده است. در [۳۲، ۳۳، ۳۴، ۳۵ و ۳۶] مودهای انتشاری نوار عایقی (دارای ثابت دی الکتریک مثبت) با سطح مقطع مستطیلی با مرزهای هموار با استفاده از روش های تقریبی که تحلیلی هستند، مانند روش ضریب شکست موثر، مارکاتیلی و غیره بدست آمده است. در [۳۷] با استفاده از FEM مودهای انتشاری نوار عایقی بدست آمده است. در [۲۶ و ۲۷] از روش ضریب شکست موثر برای بدست آوردن مودهای نوار فلزی استفاده شده است.

در این پایان نامه ابتدا در فصل دوم تئوری انتشار امواج SPP توضیح داده می شود. در این فصل ابتدا ویژگی فلزات را در فرکانس های مختلف بررسی کرده و مدلی برای فلزات در ناحیه نور مرئی ارائه می شود. انتشار امواج SPP بر روی محیط دو لایه و سه لایه با فصل مشترک صاف و هموار بیان می گردد و همچنین به روش های مختلف تحریک این امواج اشاره می شود. سپس دو روش معادله رایلی کاهش یافته و روش معادله انتگرالی قضیه اطفاء برای

¹ Couple

² Kretschmann

³ Raether

⁴ Couple Mode Approach

⁵ Mill

⁶ Gap

⁷ End fire

بررسی ناهمواری‌ها توضیح داده می‌شود. با استفاده از این دو روش می‌توان ثابت انتشار امواج SPP در محیط دولایه فلز/عایق با فصل مشترک ناهموار و همچنین محیط سه لایه عایق/فلز/عایق با یک مرز ناهموار را بدست آورد. سپس رفتار مودها با زاویه انتشار دلخواه در محیط‌های دو لایه دارای تلفات بررسی می‌شود. از آنجا که در روش‌های ذکر شده همواره به یک ماتریس می‌رسیم که باید دترمینان آن برابر صفر شود، در انتها به روش‌های پیدا کردن صفر معادله غیر خطی اشاره می‌شود.

در فصل سوم نوار با سطح مقطع مستطیلی بررسی می‌شود. با توجه به این که روش تحلیلی برای حل معادلات میدان در این ساختار وجود ندارد، روش تقریبی مانند روش ضریب شکست موثر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این فصل روش پیشنهادی که اصلاح شده روش ضریب شکست موثر است، معرفی می‌گردد و ثابت انتشار نوار عایقی با سطح مقطع مستطیلی که دارای ثابت دی‌الکتریک مثبت است، با استفاده از این روش بدست می‌آید و با مراجع مقایسه می‌گردد. با استفاده از این روش و تحلیل محیط سه لایه عایق/فلز/عایق با یک مرز ناهموار، نوار با سطح مقطع مستطیلی با یک مرز ناهموار تحلیل می‌شود.

در فصل چهارم نتایج شبیه سازی ساختارهای معرفی شده، در فصل‌های دوم و سوم ارائه می‌شود. در این فصل فلز به دو صورت (۱) مدل دروده^۱ با تابع دی‌الکتریک حقیقی (۲) با استفاده از داده‌های تجربی جانسون^۲ و کریستی^۳[۳۸] (که تلفات فلز نیز در نظر گرفته می‌شود)، مدل می‌گردد. ناهمواری‌ها به صورت گریٹینگ با تابع متناوب مثلثی، مربعی یا سینوسی مدل شده است. همچنین در ساختار دو لایه اثر انتشار امواج SPP با زاویه دلخواه بر روی گریٹینگ نیز بررسی می‌شود. در فصل پنجم جمع بندی کلی و نتیجه گیری و پیشنهادات برای ادامه کار آورده شده است.

¹ Drude

² Johnson

³ Christy

در محدوده فرکانسی وسیعی، ویژگی نوری فلزات توسط مدل پلازما، یعنی گازی از الکترون‌های آزاد با چگالی n که در برابر شبکه‌ای از یون‌های مثبت ساکن در حرکتند توصیف می‌شود. در فلزات قلیایی این محدوده تا فرکانس‌های فرا بنفش می‌رسد، در حالی که در فلزاتی همانند طلا و نقره در اثر گذار بین ترازهای انرژی که در فرکانس‌های نوری رخ می‌دهد، اعتبار این مدل محدود می‌شود. الکترون‌ها در پاسخ به میدان اعمال شده نوسان می‌کنند، و حرکت آنها با فرکانس برخورد $\gamma = 1/\tau$ میرا می‌شود. τ زمان آرامش^۱ الکترون‌های آزاد است، در دمای اتاق تقریباً $\gamma = 100 \text{ THz}$ می‌باشد. معادله حرکت الکترون که در میدان \vec{E} قرار گرفته به صورت زیر است:

$$m \frac{d^2 \vec{X}}{dt^2} + m\gamma \frac{d\vec{X}}{dt} = -e\vec{E} \quad (1-2)$$

اگر وابستگی میدان به زمان به صورت $\exp(-j\omega t)$ باشد، جواب این معادله که نوسان‌های الکترون را توصیف می‌کند به صورت زیر است:

$$\vec{X} = \frac{e}{m(\omega^2 + j\gamma\omega)} \vec{E} \quad (2-2)$$

در نتیجه \vec{P} بردار قطبش^۲ و \vec{D} جابجایی الکتریکی به صورت زیر است:

$$\vec{P} = -\frac{ne^2}{m(\omega^2 + j\gamma\omega)} \vec{E} \quad (3-2)$$

¹ Relaxation time

² Polarization

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + j\gamma\omega} \right) \vec{E} \quad (۴-۲)$$

که $\omega_p^2 = \frac{ne^2}{\varepsilon_0 m}$ فرکانس پلاسما گاز الکترون‌های آزاد است فرکانس پلاسما فرکانس طبیعی نوسان آزاد الکترون است. کوانتای نوسان این بارها را پلاسما (یا پلاسما حجمی) می نامند از لحاظ عملی فرکانس پلاسما فلزات معمولاً با طیف سنجی تلفات الکترون^۱ تعیین می شود. در اغلب فلزات فرکانس پلاسما در ناحیه فرابنفش می باشد و در حدود ۵ الی ۱۵ الکترون ولت است. بنابراین ثابت دی الکترونیک گاز الکترون‌های آزاد برابر است با:

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + j\gamma\omega} \quad (۵-۲)$$

و قسمت‌های حقیقی و موهومی ثابت دی الکترونیک به صورت زیر می باشد:

$$\text{Re}\{\varepsilon(\omega)\} = 1 - \frac{\omega_p^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (۶-۲)$$

$$\text{Im}\{\varepsilon(\omega)\} = \frac{\omega_p^2 \tau}{\omega(1 + \omega^2 \tau^2)} \quad (۷-۲)$$

با توجه به مقدار فرکانس ثابت دی الکترونیک رفتارهای متفاوت از خود نشان می دهد. در فرکانس‌های بالا حوالی فرکانس پلاسما ω_p ، که $\omega\tau \gg 1$ ثابت دی الکترونیک حقیقی می باشد و میرایی کمی دارد که مقدار آن برابر است با:

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (۸-۲)$$

البته در فلزاتی همانند طلا و نقره در اثر گذار بین ترازهای انرژی $\text{Im}\{\varepsilon(\omega)\}$ افزایش می یابد. در فرکانس‌های پایین که $\omega\tau \ll 1$ ، $\text{Im}\{\varepsilon(\omega)\} \gg \text{Re}\{\varepsilon(\omega)\}$ می باشد و قسمت موهومی و حقیقی ضریب شکست قابل مقایسه می شوند داریم:

$$n_r \approx n_i = \sqrt{\frac{\text{Im}\{\varepsilon\}}{2}} = \sqrt{\frac{\tau\omega_p^2}{2\omega}} \quad (۹-۲)$$

که $\tilde{n} = \sqrt{\varepsilon}$ و $\tilde{n}(\omega) = n_r(\omega) + jn_i(\omega)$ است. در این محدوده فرکانسی فلزات عمدتاً جذب کننده هستند که ضریب جذب^۲ و عمق پوستی^۳ آن‌ها به صورت زیر است:

$$\alpha = \sqrt{2\sigma_0\omega\mu_0} \quad (۱۰-۲)$$

$$\delta = \frac{2}{\alpha} = \frac{c}{n_i\omega} = \sqrt{\frac{2}{\sigma_0\omega\mu_0}} \quad (۱۱-۲)$$

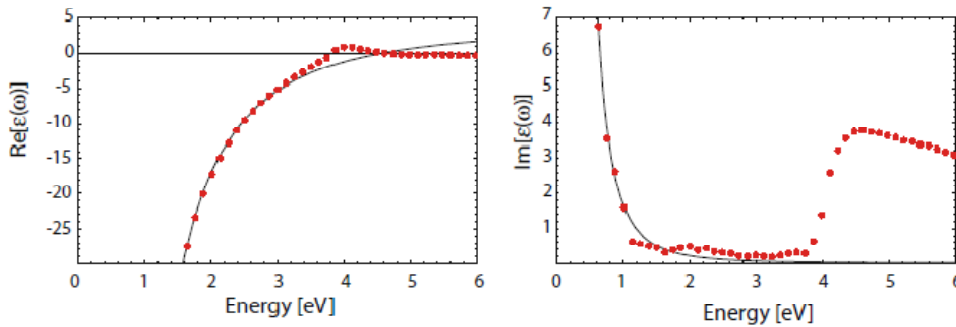
^۱ Electron loss spectroscopy

^۲ Absorption coefficient

^۳ Skin depth

که $\sigma_0 = \frac{ne^2\tau}{m} = \omega_p^2\tau\varepsilon_0$ ضریب هدایت DC می باشد.

در فرکانس های بالاتر ($1 \leq \omega\tau \leq \omega_p\tau$) ضریب شکست مختلط عمدتاً موهومی می شود، در نتیجه ضریب بازتاب^۱ تقریباً برابر یک می گردد، و مقدار موهومی σ بیشتر می شود.



شکل (۱-۲): تابع دی الکتریک گاز الکترون آزاد (خط پیوسته) و داده های تجربی برای نقره (نقطه چین) [۱]

در مدل الکترون آزاد، در $\omega \gg \omega_p$ ثابت دی الکتریک به یک میل می کند. در فلزاتی مانند نقره، مس و طلا در ناحیه $\omega > \omega_p$ باید این مدل را تعمیم داد. بنابراین قطبشی که در اثر یون های مثبت فلز ایجاد می شوند را با اضافه کردن جمله $\vec{P}_\infty = \varepsilon_0(\varepsilon_\infty - 1)\vec{E}$ اعمال می شود. این اثر را با ε_∞ (معمولاً $1 \leq \varepsilon_\infty \leq 10$) توصیف می شود، و ثابت دی الکتریک به صورت زیر می شود:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + j\gamma\omega} \quad (۱۲-۲)$$

در شکل (۱-۲) محدودیت اعتبار مدل رابطه (۱۲-۲) برای نقره مشاهده می شود. این شکل قسمت حقیقی و موهومی ثابت دی الکتریک و همچنین داده های تجربی جانسون و کریستی [۳۸] برای نقره را نشان می دهد. واضح است که به علت گذار بین تراز های انرژی که باعث افزایش $\text{Im}\{\varepsilon(\omega)\}$ می شود، در فرکانس های نور مرئی و مادون قرمز از اعتبار مدل الکترون های آزاد کاسته می شود. این مدل به عنوان مدل دروده برای فلزات در فرکانس های نوری معروف است.

بنابراین در فرکانس های نوری فلزاتی همچون نقره و طلا را به دو شکل می توان توصیف کرد (۱) از تلفات صرف نظر کرده و ثابت دی الکتریک فلز را با مدل دروده به صورت (۸-۲) مدل کرد که برای نقره

$\hbar\omega_p = 3.78\text{eV}$ است که $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 6.582118 \times 10^{-16} \text{ eV}\cdot\text{s}$ و h ثابت پلانک است. (۲) از داده های تجربی جانسون و کریستی استفاده کرده که در این صورت تلفات فلز نیز در نظر گرفته شده است.

^۱ Reflection coefficient