

دانشگاه کاشان

دانشکده فیزیک
گروه لیزر و فوتونیک

پایان نامه دکتری

جهت اخذ مدرک دکتری
در رشته فیزیک اتمی و مولکولی

عنوان:

طراحی و شبیه‌سازی میکرو و نانو موجبرهای اپتیکی چندگانه با پاسخ خطی و
غیرخطی مبتنی بر روش FDTD

استاد راهنما:

جناب آقای دکتر حمید رضا زنگنه

توسط:

مرضیه اسدنیای فرد جهرمی

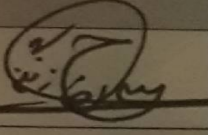
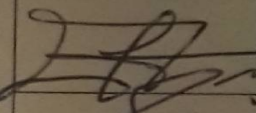
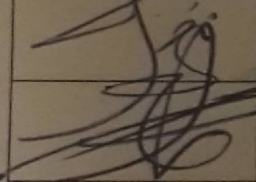
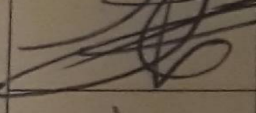
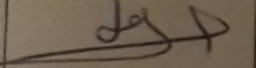
خرداد ماه 1393

فرم مربوط به نتیجه برگزاری امتحان دفاع از پایان نامه دانشجو

مخصوص دانشجویان دوره دکتری Ph.D.

امتحان دفاع از پایان نامه خانم مرضیه اسدنیای فرد جهرمی دانشجوی دوره دکتری رشته فیزیک گرایش اتمی - مولکولی روز چهارشنبه مورخ ۹۳/۰۳/۲۱ ساعت ۱۵ در سالن کنفرانس دانشکده علوم با حضور هیئت داوران تشکیل و نظرات کلی آن ها که در فرم صورتجلسه دفاع از پایان نامه دکتری نامبرده منعکس شده در جدول زیر مندرج گردید.

اعضاء هیأت داوران

عنوان	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱. استاد راهنما:	دکتر حمیدرضا زنگنه	استادیار	
۲. متخصصین و صاحب نظران دخیل دانشگاه:	دکتر بهرام جزی	دانشیار	
۳- متخصصین و صاحب نظران دخیل دانشگاه:	دکتر مجید ناظری	استادیار	
۴. متخصصین و صاحب نظران خارج از دانشگاه	دکتر خسرو معدنی پور	دانشیار	
۵. نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه:	دکتر زهرا توانگر	استادیار	

با توجه به جمع بندی نظرات فوق پایان نامه خانم مرضیه اسدنیای فرد جهرمی

به عدد: ۱۹,۷۷

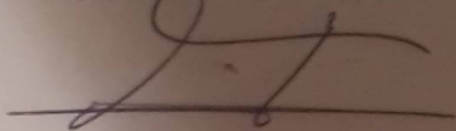
با نمره

به حروف: نوزده و هفتاد و هفت

و درجه عالی بسیار خوب خوب قابل قبول غیر قابل قبول کمتر از

علام می گردد.

دکتر منصورنیا
مدیر تحصیلات تکمیلی





تقدیم به:

پدر و مادر عزیزم

و

همسر مهربانم

با حمد و سپاس بیکران به درگاه خداوند منان که بالهای
الطاف بیکرانش سرپناه سختیها و باران رحمتش حیات
بخش بیابان غفلتها و جبرش آباد کننده ویرانه‌هایم بوده
است. او که اگر نظر لطفش نبود هیچ نبود.

تسلیم دستان پر مهر مادر و چشمان مشتاق پدر هستم که
وجود بارزش و دستان زحمتکش‌شان آرامش بخش و
راهنمای من است.

سپاس من تقدیم همسر مهربانم که آفریننده امید
نامیدیهایم است.

این اثر را مدیون راهنماییها، مساعدتها و صبوری‌های
استاد ارجمندم جناب آقای دکتر حمیدرضا زنگنه می‌دانم
و کمال سپاس و تشکر را از ایشان دارم. همچنین از
جناب آقای دکتر بهرام جزئی و جناب آقای دکتر مجید
ناظری و جناب آقای دکتر خسرو معدنی‌پور که زحمت
داوری رساله را بر عهده داشتند، بسیار سپاسگذارم.

سپاس و درود بی‌دریغ من نثار تمام کسانی که مرا در
انجام این رساله یاری داده‌اند.

چکیده

در این رساله سعی داریم نحوه‌ی عملکرد موجبرهای فلزی، با ترکیب یک محیط غیر خطی در بستر ساختار کوارتز و یا سیلیکون و کوارتز، را مورد مطالعه قرار دهیم. مهمترین کاربرد این ساختارها در تولید امواج تراهرتز (THz) همدوس به روش تولید فرکانس تفاضلی (DFG) است. در طراحی این موجبرها با دو چالش اصلی، محدودسازی نور و موج THz در ابعاد مورد نظر و دیگری شرایط جورشدهگی فاز بین دو موج، مواجه هستیم که در این رساله به آن دو می-پردازیم.

یکی از ساختارهای فلزی که در این پروژه مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته، موجبر معلق فلزی است. تولید امواج تراهرتز کوک‌پذیر و نحوه جورشدهگی فاز در دو حالت مختلف محدود شده عادی و محدود شده در ابعاد نانومتری در این نوع موجبرها بررسی شده است. همچنین نحوه جورشدهگی و تولید امواج در فرکانس تفاضلی در چند ساختار دیگر نیز به روش تفاضل متناهی در حوزه زمان (FDTD) شبیه‌سازی شده و مورد مطالعه قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: موجبرهای نوری، امواج تراهرتز، روش تولید فرکانس تفاضلی، روش تفاضل متناهی در حوزه زمان

فهرست مطالب

1..... مقدمه

فصل اول: تئوری موجبرهای نوری

8مقدمه

9..... 1.1 تئوری موجبرها

11..... 1.2.1 ساختمان موجبر

15 3.2.1 معادلات ماکسول

17 3.1 موجبرهای نوری مسطح

17 1.3.1 موجبرهای تیغه‌ای

28 4.1 موجبرهای مستطیلی

30..... 1.4.1 معادلات پاشندگی برای مدهای E_{pq}^x و E_{pq}^y در روش مارکاتیلی

32 2.4.1 روش کومار

38 5.1 روش ضریب شکست مؤثر

فصل دوم: بررسی روش تحلیل عددی تفاضل متناهی در حوزه زمان

42 مقدمه

43 1.2 تفاضل متناهی در حوزه زمان

45 1.1.2 الگوریتم Yee

50 2.2 حل معادلات ماکسول با روش FDTD

56 3.2 شرط مرزی PML

59 4.2 بررسی حل معادلات انتشار نور با روش FDTD در محیط‌های دی‌الکتریک

59 1.4.2 محیط دی‌الکتریک یک بعدی

61 2.4.2 کاواک دی‌الکتریک سه بعدی

64..... 3.4.2 موجبر کانالی

فصل سوم : پلاسمون سطحی

66	.....مقدمه
67	..... 1.3 علم پلاسمونیک
69	..... 1.1.3 تحلیل کلاسیک پلاسمون سطحی
77	..... 2.3 عمق نفوذ میدانها در پلاسمون سطحی
78	..... 3.3 پیاده سازی روش FDTD
82	..... 4.3 بررسی مدل درود
83	..... 1.4.3 اعمال مدل درود بر روی الگوریتم تفاضل نامتناهی
85	..... 5.3 پیاده سازی شرط مرزی PML
85	..... 1.5.3 اصول پیاده سازی شرط مرزی
91	..... 2.5.3 گسسته سازی الگوریتم PML

فصل چهارم : نتایج محاسبات

94	.....مقدمه
95	..... 1.4 تولید امواج THz در موجبر معلق فلزی
95	..... 1.1.4 مدل سازی و شبیه سازی
98	..... 2.1.4 بررسی شرط جورشدهی فاز و محاسبه بهره
104	..... 2.4 تولید امواج تراهرتز با استفاده از نور متمرکز
115	..... 3.4 تولید امواج تراهرتز در موجبر معلق فلزی با استفاده از نور متمرکز
115	..... 1.3.4 مدل سازی و شبیه سازی
123	..... 4.4 تولید امواج تراهرتز در موجبر معلق پلاسمونی کم اتلاف پیوندی
123	..... 1.4.4 ساختار موجبر و جورشدهی فاز
129	..... 2.4.4 بهره موجبر پلاسمونی پیوندی
	..... 5.4 طراحی و مشخصه یابی موجبر فلزی با سرپوش DAST برای تولید امواج تراهرتز پیوسته
132	..... با روش DFG
133	..... 1.5.4 ساختار موجبر و جورشدهی فاز
135	..... 2.5.4 محاسبه جورشدهی فاز و بهره موجبر
139	..... 6.4 طراحی منبع موج تراهرتز کوک پذیر با استفاده از یک شیار GaAs در مقیاس نانو
140	..... 1.6.4 ساختار موجبر
141	..... 2.6.4 جورشدهی فاز در موجبر
142	..... 7.4 جفتگر کم اتلاف برای دو موجبر پلاسمونی ترکیبی و سیلیکونی

142	.....	1.7.4 مدلسازی جفتگر
144	.....	2.7.4 شبیه سازی و نتایج
146	.....	نتیجه گیری و چشم انداز
149	.....	مراجع
153	.....	پیوست 1
159	.....	پیوست 2
161	.....	پیوست 3
161	.....	پیوست 4
162	.....	پیوست 5

فهرست شکل‌ها:

صفحه	عنوان
9	شکل (1-1): ساختار اصلی و ضرایب شکست موجبر نوری
9	شکل (2-1): نحوه‌ی محدود شدن نور در یک موجبر تیغه‌ای
11	شکل (3-1): پرتوهای نوری و جبهه‌های فازی آن‌ها در موجبر
11	شکل (4-1): بازتاب کلی موج تخت در فصل مشترک دی‌الکتریک
13	شکل (5-1): تشکیل مدها. (الف) مد اصلی ($m=0$). (ب) مد مرتبه‌ی بالاتر
16	شکل (6-1): موجبر نوری تیغه‌ای
18	شکل (7-1): ضرایب شکست موجبر تیغه‌ای
22	شکل (8-1): ارتباط $u - w$ در موجبر تیغه‌ای در روش ترسیمی
22	شکل (9-1): منحنی پاشندگی برای مدهای TE در موجبر تیغه‌ای در روش عددی
25	شکل (10-1): توزیع‌های میدان الکتریکی در موجبر تیغه‌ای
26	شکل (11-1): منحنی پاشندگی مدهای TE و TM در موجبر تیغه‌ای
27	شکل (12-1): موجبر مستطیلی سه بعدی در روش مارکاتیلی
31	شکل (13-1): تعاریف مد و توزیع‌های میدان الکتریکی در روش مارکاتیلی
32	شکل (14-1): موجبر مستطیلی و هم‌ارزهای آن با دو موجبر تیغه‌ای مستقل، در روش مارکاتیلی
33	شکل (15-1): نحوه پخش ضریب شکست در روش کومار
37	شکل (16-1): موجبر شیاردار
39	شکل (17-1): تغییرات ضریب شکست واقعی
47	شکل (1-2): نمایش سلول Yee
47	شکل (2-2): وابستگی میدان E به حلقه‌ی میدان H
48	شکل (3-2): نحوه‌ی قرارگیری میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی با گذشت زمان
49	شکل (2-4): الگوی جهش قورباغه‌ای
53	شکل (2-5): مکان قرارگیری هر درایه در شبکه
55	شکل (2-6): بررسی طریقه خاتمه دادن به شبکه مورد تحلیل
59	شکل (2-7): نتایج پیاده سازی الگوریتم برای یک محیط دی‌الکتریک (الف) بعد از 6 ثانیه (ب) بعد از 12 ثانیه
64	شکل (2-8) (الف) نمایش نتایج میدان الکتریکی و مغناطیسی در یک محیط دی‌الکتریک سه بعدی بعد از 64 ثانیه
61	شکل (2-8) (ب) نمایش نتایج میدان الکتریکی و مغناطیسی در یک محیط دی‌الکتریک سه بعدی بعد از 296 ثانیه
62	شکل (2-9): نتایج پیاده سازی الگوریتم برای یک موجبر کانالی
63	شکل (1-3): نمایش رفتار پلاسمون سطحی
69	شکل (2-3): نمودار تغییرات بسامد بر حسب عدد موج برای فلز با مدل درود با $\omega_p=15eV$

- شکل (3-3) الف) میدان الکترومغناطیسی در سطح بین دی‌الکتریک (ϵ_2) و فلز (ϵ_1). ب) تغییرات میدان الکتریکی E_z 74
- شکل (3-4) میدان الکتریکی SPP در سطح مشترک هوا-نقره برای طول موج 370 nm . ب) میدان الکتریکی SPP در سطح مشترک هوا-نقره برای طول موج $10 \mu\text{m}$ 75
- شکل (3-5) نمودار تغییرات بسامد بر حسب عدد موج در یک موجبر..... 76
- شکل (3-6) بررسی عمق نفوذ میدانها در یک پلاسمون سطحی از جنس درود با $\omega_p = 15 \text{ eV}$ در هوا..... 77
- شکل (3-7) نمایی از یک سلول یی در روش FDTD برای محاسبه میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی..... 78
- شکل (3-8) بررسی میزان بازتاب از مرز مشترک دو ماده PML..... 87
- شکل (3-9) روش پیاده سازی ضرایب در مرزها و نقاط طلاقی..... 89
- شکل (3-10) بررسی پاره‌ای از مشکلات ذاتی روش PML..... 89
- شکل (1-4): الف) ساختار دو بعدی (ب) سه بعدی، طرح کلی موجبر فلزی معلق طراحی شده با GaA..... 95
- شکل (2-4): الف) بخش حقیقی E_y حالت هدایت شده نوری در طول موج $\lambda = 1/5 \mu\text{m}$ (ب) بخش حقیقی E_x در بسامد 1/3 THz..... 96
- شکل (3-4): شاخص مؤثر تراهرتز حالت هدایت شده در 1/3 THz بر حسب فاصله ی هوا..... 97
- شکل (4-4): الف) ضریب شکست گروه و (ب) پاشندگی برای حالت‌های هدایت شده نوری بر حسب طول موج زمانی که پارامترهای فیزیکی ثابت هستند..... 98
- شکل (4-5): الف) پاشندگی THz و (ب) اتلاف انتشار THz بر حسب بسامد تراهرتز برای ابعاد هندسی ثابت..... 99
- شکل (6-4): اتلاف انتشار برای حالت هدایت شده در 1/3 THz بر حسب فاصله ی هوا زمانی که پارامترهای دیگر ثابت هستند..... 100
- شکل (7-4): الف) همپوشانی به عنوان تابعی از فاصله ی هوا در 1/3 THz (ب) توان خروجی تراهرتز در 1/3 THz در طول‌های متفاوت دستگاه و برای فواصل مختلف هوا..... 102
- شکل (8-4). سطح مقطع موجبر پلاسونیک. $h_{\text{Si}} = 100 \text{ nm}$, $h_{\text{GaAs}} = 50 \text{ nm}$, $w = 100 \text{ nm}$ 104
- شکل (9-4) توزیع شدت برای الف) مد نوری در $\lambda = 1/5 \text{ nm}$ ب) مدت تراهرتز..... 106
- شکل (10-4) فاصله انتشار را برای الف) موج اپتیکی و ب) موج THz برای ضخامت‌های مختلف نقره..... 107
- شکل (11-4) الف) ضریب شکست گروه نوری و ب) ضریب شکست مؤثر موج THz برای ضخامت‌های مختلف فلز نقره..... 109
- شکل (12-4) قسمت حقیقی ثابت پاشندگی برای موج‌های الف) دمش نوری و ب) تراهرتز برای ضخامت‌های مختلف نقره..... 111
- شکل (13-4) نمودار توان تراهرتز خروجی. $p_1 = p_2 = 50 \mu\text{W}$ 113
- شکل (14-4) سطح مقطع موجبر معلق فلزی برای تمرکز نور در مقیاس نانو..... 114
- شکل (15-4) توزیع شدت موج دمش در طول موج $1/55 \mu\text{m}$ و موج تراهرتز در 0/6 THz..... 115
- شکل (16-4) تغییرات ضریب شکست مؤثر الف) هنگامی که فاصله ی بین دو تیغه 300 nm است ب) در بسامد 0/6 THz هنگامی که فاصله بین دو تیغه از 270 nm تا 330 nm تغییر می‌کند..... 116
- شکل (17-4) الف) ضریب شکست گروه اپتیکی ب) پاشندگی موج دمش بر حسب طول موج..... 118

- شکل (4-18) نمودار الف) پاشندگی و ب) اتلاف موجبر بر حسب بسامد تراهرتز..... 119
- شکل (4-19) اتلاف موجبر در بسامد 0/6 THz بر حسب فاصله دو تیغه..... 120
- شکل (4-20) نمودار بهره‌ی تولید امواج تراهرتز با شرط جورشدگی فاز برای طول موجبرهای
 $L=0.5\text{cm}, L=1\text{cm}$ 121
- شکل (4-21) الف) سطح مقطع موجبر معلق پلاسمونی پیوندی ب) توزیع شدت موج اپتیکی در $1.55\ \mu\text{m}$
 ج) موج تراهرتز در 0/61 THz..... 123
- شکل (4-22) فاصله‌ی انتشار و ضریب شکست مؤثر موجبر پلاسمونی پیوندی..... 125
- شکل (4-23) الف) تغییرات ضریب شکست گروه اپتیکی بر حسب طول موج ب) تغییرات ضریب شکست مؤثر
 موج تراهرتز..... 127
- شکل (4-24) الف) نمودار پاشندگی موج تراهرتز در موجبر ب) نمودار پاشندگی موج تراهرتز در خلاء
 ج) نمودار پاشندگی موج اپتیکی در موجبر پلاسمونی پیوندی..... 129
- شکل (4-25) نمودار تأثیر جورناشدگی فاز در میزان بهره در $d=300\text{nm}$ 130
- شکل (4-26) بهره‌ی موجبر در فواصل پیوندی مختلف..... 131
- شکل (4-27) ساختار موجبر با سرپوش DAST. $W_{Ag}=1/54\text{nm}$, $W_D=1/1\ \mu\text{m}$ و $T_D=250\text{nm}$
 $T_q=250$ 132
- شکل (4-28) توزیع شدت الف) موج اپتیکی و ب) موج تراهرتز..... 134
- شکل (4-29) ضریب شکست گروه اپتیکی و ضریب غیر خطی موجبر..... 135
- شکل (4-30) نمودار پاشندگی الف) موج اپتیکی بر حسب طول موج ب) موج تراهرتز بر حسب بسامد..... 137
- شکل (4-31) تغییرات ضریب شکست مؤثر بر حسب ضخامت بلور DAST..... 138
- شکل (4-32) ساختار موجبر فلزی با یک شیار نانومتری..... 139
- شکل (4-33) توزیع شدت الف) موج دمش ب) موج تراهرتز در منبع موج تراهرتز کوک‌پذیر..... 140
- شکل (4-34) ضریب شکست گروه اپتیکی (خط نقطه چین) و ضریب شکست مؤثر (خط پیوسته)..... 140
- شکل (4-35) الف) ساختار جفتگر ب) توزیع شدت میدان الکتریکی را در طول موج..... 142
- شکل (4-36) الف) بهره کوپل شدگی ب) اتلاف در جفتگر بر حسب تابعی از طول مخروط..... 143
- شکل (4-37) بهره کوپل شدگی بر حسب جلوآمدگی فلز..... 144

فهرست علائم و اختصارات

THz wave
FDTD method
MAM
SOI

Terahertz wave
Finite difference time domain method
Metal-air-metal
Silicon on insulator

مقدمه

سال‌ها قبل از میلاد از ویژگی‌های پلاسمونیک و نانو ذرات برای ایجاد رنگ‌های چشم‌نواز در شیشه‌ها استفاده می‌شد که نمونه‌ای از آن جامی است که در یکی از موزه‌های شهر لندن نگهداری می‌شود. نخستین تحقیقات بر روی پلاسمونیک به ابتدای قرن بیستم برمی‌گردد. ابتدا وود¹، خواص عجیبی از اندازه‌گیری بازتاب نوری از شبکه‌های فلزی مشاهده کرد. حدود سال 1904، گرنت² رنگ‌های موجود در شیشه‌های رنگی را با استفاده از نظریه جدید درود (که خواص انتقال الکترون‌ها در مواد و مخصوصاً در فلزات را بیان می‌کند) برای فلزات توضیح داد. 4 سال بعد مای³، نظریه خود را در مورد پراکندگی الکترومغناطیسی ذرات کروی ارائه داد. در حدود سال 1956، پینس⁴ به صورت تحلیلی دلیل افت سریع انرژی الکترون‌ها در عبور از فلزات را بیان کرد و نتیجه گرفت این انرژی صرف حرکت تجمعی و نوسان گونه الکترون‌های آزاد فلز می‌شود و آن را پلاسمون نامید. دلیل این نام‌گذاری شباهت این نوسانات الکترون‌ها با نوسان‌های ذرات محیط پلاسما بود. در همان سال فانو⁵ عبارت پلاریتون را برای نوسان الکترون‌های مقید فلز در حالت جفت‌شدگی با فوتون‌های پرتو فرودی به کار برد. نام پلاریتون برای شبه‌ذراتی که نیم‌ماده و نیم‌فوتون بودند، بکار گرفته شد که حالت تزویج شده بین یک فوتون پرتو تحریک‌کننده ابتدایی و الکترون‌های رسانش فلز است و اصطلاح پلاسمون پلاریتون برای بیان علت تزویج شده بین یک فوتون و یک پلاسمون است.

امروزه با گسترش روزافزون علم نانو دریچه‌های جدیدی در دنیای علم گشوده شده است به گونه‌ای که توسعه این علم در دهه‌های اخیر امکان ساخت طیف جدیدی از ادوات را فراهم آورده است. برای مدت 30 سال پس از اختراع ترانزیستور، پردازش و انتقال اطلاعات توسط جریان الکترون‌ها انجام می‌گرفت. در اوایل دهه 1980 میلادی فوتونها بجای الکترون‌ها در

¹ R. Wood

² M. Grant

³ G. Mie

⁴ D. Pines

⁵ R. Fano

دستگاههای انتقال اطلاعات و حسگرها، نقش حاملها را ایفا کردند. امروزه ابزارهای فوتونیک و اپتوالکترونیک مبتنی بر مدارهای مجتمع فوتونیک آنچنان رشد کرده اند که نه تنها در ارتباطات راه دور نقش دارند بلکه در دستگاههای ارتباطی و صنعتی دگر نیز نفوذ کرده‌اند.

علم نانو با ورود به دنیای اپتیک امکان ساخت ادوات نوری متنوعی را فراهم آورده است. از جمله این ادوات موجبرهای نوری، جفتگرها و بلورهای فوتونی می‌باشند که در حقیقت ایده طراحی آنها ناشی از موفقیت‌های بدست آمده در همتای الکترونی آنها می‌باشد. در آغاز کار ساخت این ادوات به منظور کاهش پیچیدگی و سهولت در پیاده‌سازی از نیمه‌هادیها با پارامترهای ثابت کمک گرفته می‌شد اما بعدها دانشمندان پا از این هم فراتر گذاشتند. ظهور پلاسمونیک سطحی مثال موفقی از این دست می‌باشد. پلاسمون پلاریتون سطحی یک موج الکترومغناطیسی می‌باشد که به طور منسجم با نوسانات الکترون‌های فلز جفت شده است و در یک مدل موجی در امتداد مرز مشترک فلز-دی‌الکتریک انتشار می‌یابد. ریچه¹ را باید جزء اولین پیشگامان در عرصه بررسی پلاسمون در دانست. مشاهده برانگیزش دسته جمعی² در سطح یک لایه نازک فلز هنگام عبور الکترون پر انرژی جزء اولین آزمایشهای وی به حساب می‌آید. هر چند نتایج بدست آمده توسط وی قبلاً توسط پاین³ و بوهم⁴ نیز گزارش شده بودند اما بررسی دقیق آزمایشگاهی پلاسمونیک اولین بار توسط ریچه صورت پذیرفت. حدود دو سال بعد از این واقعه، پاول⁵ و سون⁶ وجود برانگیزش را به صورت تئوری ثابت نمودند. این موضوع را باید آغاز تحولات عظیم در عرصه پلاسمون سطحی دانست. هر چند در آن دوران مشکلات پیاده‌سازی ساختارهای مبتنی بر پلاسمونیک پیشرفت‌ها را دچار رکود گردانید.

الگوریتم تفاضل متناهی در حوزه زمان اولین بار توسط یی⁷ در سال 1966 ایجاد شد. او در الگوریتم خود از روش گسسته‌سازی تفاضل مرکزی مرتبه دوم استفاده کرده بود. تفلاو⁸ یکی از پیشگامان در این زمینه است که فعالیتش را از سال 1975 شروع کرده و تا اکنون مقالات و کتاب‌های مختلفی به جا گذاشته است. او و دیگران روش‌های عددی مربوط به این الگوریتم را گسترش دادند و بدین ترتیب مدل‌سازی انتشار و پراگندگی امواج الکترومغناطیسی در محیط

¹Ritchie

²Collective excitation

³Pines

⁴Bohm

⁵Powell

⁶Swan

⁷Yee

⁸Taflove

های غیرخطی و پاشنده با استفاده از این روش انجام شد. ژاوو¹ نیز یک روش تفاضل محدود دامنه فرکانسی را برای یک موج دو بعدی، به منظور تعیین ثابت های فاز یک ساختار کلی موجبر و بدست آوردن فرکانس پیشنهاد کرد که در آن تنها چهار مولفه عرضی میدان استفاده می شود و در نهایت معادله ویژه مقداری به وسیله ماتریس اسپارس بدست می آید. امروزه علم نانو با ورود به دنیای اپتیک امکان ساخت ادوات نوری متنوعی را فراهم آورده است. در آغاز کار ساخت این ادوات به منظور کاهش پیچیدگی و سهولت در پیاده سازی از نیمه هادیها با پارامترهای ثابت کمک گرفته می شد، اما بعدها دانشمندان پا از این هم فراتر گذاشتند. ظهور پلاسمونیک سطحی مثال موفقی از این دست می باشد.

در موجبرها یک سطح تخت با مقطع مربعی یا مستطیلی محیطی برای انتقال یا انتشار نور است که نور شبیه آنچه در فیبر اتفاق می افتد با بازتاب های کلی از سطح بالا و پایین بسته به زاویه دارای مدهایی است و می تواند انتشار پیدا کند. ارزش موجبرهای نوری به عنوان یکی از ادوات نوری در این است که نور درون این موجبرها انتقال می یابد و از طرف دیگر ضمن انتقال نور روی آن، می شود پردازش هایی روی آن انجام داد. پردازشهایی را که روی نور می توان انجام داد عبارتند از مدوله کردن نور، تغییر طول موج نور، تقسیم کردن نور و ... جالب است که با استفاده از این موجبرها می توان مدارهایی را طراحی کرد که نور در این مدارها انتقال پیدا می کند و در بین راه پردازش های لازم انجام گرفته و نهایتاً از سمت دیگر این مدارها خارج می شود. این مدارها می توانند شبیه مدارهای مجتمع الکترونیکی باشد که به اینگونه مدارها، مدارهای مجتمع نوری می گویند. مدارهای مجتمع نوری از موجبرها به عنوان محیط انتقال نور استفاده می کنند می توانند از چندین قطعه فرستنده، گیرنده و پردازشگر تشکیل شده باشد و یک عملیات خاص را انجام دهد که نقش بسیاری در تکنولوژی های جدید دارند. در این رساله موجبرهایی را طراحی می کنیم که ضمن انتقال نور در فرکانس های مختلف، مولد فرکانس تراهرتز نیز باشد؛ به این معنا که پردازش صورت گرفته در آنها جورشدگی فاز و تولید فرکانس تفاضلی باشد.

رساله حاضر مشتمل بر چهار فصل است؛ در فصل اول به بیان مفاهیم اساسی و معادلات نظریه ی موج الکترومغناطیسی به منظور درک انتشار امواج نور در موجبرهای نوری پرداخته

¹ Zhao

می‌شود و با در نظر گرفتن موجبر تیغه‌ای، محدودسازی نور و تشکیل مدها در موجبر به طور کیفی توضیح داده می‌شوند. مطالب این فصل به منظور درک نحوه‌ی محدود شدگی و انتشار نور در موجبرها و معرفی و شناسایی مشخصه‌های موجبرها، و طبعاً موجبرهایی که در فصل چهارم معرفی می‌شوند، بیان شده است. در انتهای فصل به بررسی موجبرهای مستطیلی می‌پردازیم سپس چند روش تحلیلی جهت تشریح موجبرهای مستطیلی ارائه می‌گردد که اگر چه تقریبی می‌باشند، ولی ساز و کار انتقال موج نوری را در این نوع موجبرها به طور کامل می‌توانند مورد بررسی قرار دهند. این روش‌های تقریبی فقط برای موجبرهای مستطیلی ساده کارا هستند و برای مطالعه رفتار موجبرهای پیچیده باید از راهکار دیگری بهره جست. بنابراین در فصل دوم روش محاسباتی تفاضل متناهی در حوزه زمان (FDTD)^۱ معرفی می‌شود. این روش یک روش رایج عددی در حل معادلات الکترومغناطیس می‌باشد و از عهده حل طیف گسترده‌ای از مسائل بر می‌آید. روش FDTD تقریب تفاضل مرکزی را جهت گسسته نمودن دو معادله‌ی ماکسول، یعنی قانون فارادی و قانون آمپر در هر دو حوزه‌ی زمان و مکان استفاده می‌کند و سپس معادلات بدست‌آمده را جهت استنتاج توزیع میدان الکتریکی و مغناطیسی در هر گام زمانی، با استفاده از طرح گره‌گره به صورت عددی حل می‌نماید. بدین ترتیب که ابتدا میدان‌های مورد بحث با مقادیر اولیه‌ی مناسب مقداردهی می‌شوند و سپس در یک حلقه‌ی زمانی مقادیر جدید میدان‌ها با در اختیار داشتن میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی مجاور در یک گام زمانی عقب‌تر به دست می‌آیند. این روش به طور مستقیم معادلات چرخشی ماکسول را حل می‌کند و نیازی به تعریف پتانسیل‌ها ندارد. در این روش نمونه‌برداری از فضای مورد بررسی برای محاسبه E و H در یک دوره‌ی زمانی صورت می‌گیرد. گام زمانی طوری انتخاب می‌گردد تا پایداری عددی الگوریتم برآورده شود. موجبرهایی که در فصل چهارم معرفی می‌شوند با استفاده از این روش مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته‌اند.

فصل سوم به معرفی پدیده پلاسمون سطحی^۲ اختصاص دارد و در آن ویژگیهای ساختارهای پلاسمونیک بیان می‌شود. در این فصل دیده می‌شود علاوه بر تحریک پلاسمون‌های حجمی به- وسیله نور، وجود یک صفحه یا فصل مشترک بین مواد با ثابت دی‌الکتریک مختلف نیز ممکن است به فرایندهای تحریک ویژه سطحی منجر شود. برای مثال فصل مشترک ماده‌ای با ثابت دی‌الکتریک مثبت و ماده‌ای با ثابت دی‌الکتریک منفی مانند فلزات می‌تواند باعث انتشار امواج

¹ Finite difference time domain

² Surface plasmon

الکترومغناطیسی بخصوصی شود که امواج پلاسمای سطحی خوانده می‌شوند و در محدوده‌ی نزدیک سطح باقی می‌مانند. همچنین دیده می‌شود استفاده از موجبرها می‌تواند راهکاری برای جفت کردن فوتون با پلاسمای سطحی ارائه دهد. ساختارهای اپتیکی که در بخش چهارم معرفی خواهند شد به کمک پیشرفتهای حاضر در ارتباط با پدیده پلاسمونیک امکان ساخت یافته‌اند.

در فصل چهارم طراحی، شبیه‌سازی و مشخصه‌یابی میکرو و نانو موجبرهای نوری که با طراحی مناسب ابعاد موجبر و انتخاب صحیح جنس قطعات تشکیل دهنده دارای پاسخ غیر خطی هستند و می‌توانند شرایطی را برای تولید امواج تراهرتز (THz)¹ فراهم کنند، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. شبیه‌سازی و بدست آوردن داده‌های اصلی مانند ضرایب شکست و پاشندگی موجبرها با روش FDTD انجام می‌شود. امواج تراهرتز دارای کاربردهای فراوانی در زمینه‌های مختلف پزشکی، صنعت، ارتباطات و تصویربرداری است. از این رو طراحی منابع تولید تراهرتز در ابعاد کوچک از اهمیت زیادی برخوردار است. به منظور استفاده بهینه از امواج تراهرتز این امواج باید به روشی تولید شوند که پیوسته و همدوس باشند.

موجبرهای معلق فلزی از جمله ساختارهایی هستند که در این پایان‌نامه برای تولید امواج تراهرتز همدوس پیشنهاد شده است. در این ساختار دو نوار کوارتز به فاصله‌ی 300 nm از هم قرار گرفته‌اند. در این فاصله بلور غیرخطی GaAs به نوار کوارتز بالایی متصل شده است و فلز نقره روی نوار پایینی قرار گرفته است. طراحی این موجبرها به گونه‌ای است که تولید امواج تراهرتز با اتلاف کم و بهره‌ی بالا انجام شود. مهمترین مزیت این موجبر به موجبرهای رایج دیگر این است که ضمن سادگی ساخت قطعه، دارای خاصیت کوک‌پذیری نیز هست.

در بخش دیگر این فصل، تولید امواج تراهرتز همدوس با استفاده از نور متمرکز مورد مطالعه قرار می‌گیرد. این موجبر شامل یک نوار سیلیکون بر روی عایق است که بر روی آن یک لایه GaAs با سرپوش فلز نقره قرار دارد. ساختار موجبر به گونه‌ای طراحی شده است که موج نوری در لایه GaAs که دارای ابعاد نانومتری است متمرکز شود و از طرف دیگر موج THz با کمترین اتلاف ممکن تولید شود.

² Terahertz

موجبر معلق پلاسمونی کم اتلاف پیوندی ساختار دیگری است که به منظور مطالعه انتشار امواج THz در فلز-هوا-فلز (MAM)¹، معرفی شده است و نشان داده می‌شود که ضمن دستیابی به بهره‌ی بالا، امکان استفاده از آن در برخی از کاربردهای این امواج فراهم می‌شود. در ادامه، موجبر فلزی با سرپوش DAST برای تولید امواج تراهرتز پیوسته و همدوس معرفی می‌شود. موجبر شامل یک تیغه کوارتز با سرپوش DAST است و یک تیغه‌ی نازک فلز در کوارتز به منظور هدایت موج THz تولید شده، طراحی شده است. بلور DAST یکی از بلورهای با ضریب غیر خطی بالاست که نوع حجیم آن برای تولید امواج تراهرتز دارای کاربرد فراوانی است. بارزترین مشکل استفاده از این بلور دستیابی به جورشدهگی فاز است. در این قسمت نشان می‌دهیم با استفاده از تکنیک‌های مهندسی موجبرها این مشکل قابل حل است و می‌توان در بسامدهایی که بلور حجیم جورشدهگی فاز ندارد، به جورشدهگی دست‌یافت. در انتهای فصل، یک منبع موج THz کوک‌پذیر با استفاده از یک شیار GaAs در مقیاس نانو معرفی و بررسی می‌شود. سپس در ادامه ساز و کار یک جفتگر نوری مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

¹ Metal- Air- metal

فصل اول

موجبرهای نوری