

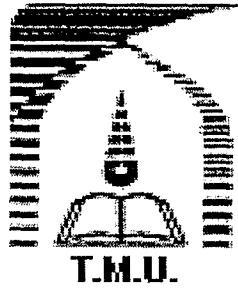
بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

13131

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

99177

~~99177~~



دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی و مهندسی

رساله دوره دکتری مهندسی برق - الکترونیک

تحلیل، مدل سازی و طراحی مدولاتورهای الکترومغناطی موج رونده

کامبیز عابدی

استاد راهنما:

دکتر وحید احمدی

اساتید مشاور:

دکتر محمد کاظم مروج فرشی

دکتر محمد حسین شیخی

۹۹۱۷۷

زمستان ۱۳۸۶

مهره اطلاعات و کتابخانه
تربیت مدرس

۱۳۸۷ / ۱۵ / ۲۵

۱۴۰۱۹



بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از رساله دکتری

آقای کامبیز عابدی رساله ۲۴ واحدی خود را با عنوان تحلیل، مدل سازی و طراحی مدولاتورهای الکترومغناطی موج رونده در تاریخ ۱۳۸۶/۱۱/۱۵ ارائه کردند. اعضای هیات داوران نسخه نهایی این رساله را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه دکتری مهندسی برق - الکترونیک پیشنهاد می کنند.

امضا	رتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیات داوران
	استاد	دکتر وحید احمدی	استاد راهنما
	استاد	دکتر محمد کاظم مروج فرشی	استاد مشاور
		دکتر محمد حسین شیخی	استاد مشاور
	استاد	دکتر احسان اله کبیر	استاد ناظر
	دانشیار	دکتر عبدالرضا نبوی لیشی	استاد ناظر
	استاد	دکتر علی رستمی	استاد ناظر
	استادیار	دکتر فاطمه شهبهانی	استاد ناظر
	دانشیار	دکتر عبدالرضا نبوی لیشی	نماینده شورای تحصیلات تکمیلی

این نسخه به عنوان تاییدیه هیات داوران رساله مورد تایید است.

امضای استاد/رئیس:

دستور العمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه:

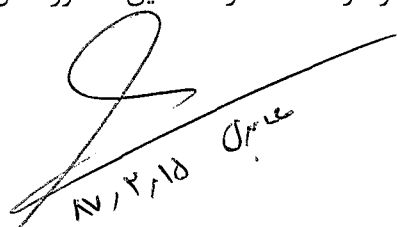
با عنایت به سیاست های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران لازم است اعضای هیات علمی دانشجویان دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان نامه رساله و طرحهای تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است موارد ذیل را رعایت نمایید:

ماده ۱: حقوق مادی و معنوی پایان نامه ها / رساله های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هر گونه بهره برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین نامه ها و دستورالعمل های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه / رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی می باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما نویسنده مسئول مقاله باشند. تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان نامه / رساله نیز منتشر می شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آیین نامه های مصوب انجام می شود. ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره های ملی، منطقه ای و بین المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان نامه / رساله و تمامی طرح های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هر گونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری خواهد بود.


۸۷/۲/۱۵

بسمه تعالی

آیین نامه چاپ پایان نامه‌های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه‌های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی- پژوهشی دانشگاه است بنابر این بمنظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش‌آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

- ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه‌های خود، مراتب را قبلاً بطور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.
- ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه)، عبارت ذیل را چاپ کند:
« کتاب حاضر، حاصل رساله دکتری نگارنده در رشته مهندسی برق - الکترونیک است که در سال ۱۳۸۶ در دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر وحید احمدی و مشاوره جناب آقایان دکتر محمدکاظم مروج فرشی و دکتر محمدحسین شیخی از آن دفاع شده است. »
- ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به « دفتر نشر آثار علمی » دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.
- ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تادیه کند.
- ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.
- ماده ۶: اینجانب کامبیز عابدی دانشجوی رشته مهندسی برق-الکترونیک مقطع دکتری تعهدات فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: کامبیز عابدی

تاریخ و امضا: ۱۳۸۷/۲/۲۴

ع.م

به پاس تعبیر عظیم و انسانی‌شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگان،

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان،

و به پاس محبت‌های بی دریغشان،

به مادر عزیزم و روح بیدار پدرم که با چشمانی نگران شاهد پویایی‌ام بود، تقدیم

می‌کنم.

تشکر و قدردانی

خداوند را سپاس می‌گویم بخاطر لطف و مهربانی‌هایش و اینکه به من لذت توفیق کسب علم را عطا فرموده است و امیدوارم بتوانم تکلیف خود را در برابر آنچه به من ارزانی داشته است بخوبی به انجام برسانم.

از استاد عزیزم جناب آقای دکتر وحید احمدی که رهنمودهایش راهگشای من و موجب فراهم آمدن این رساله شد و محضرشان نه فقط مرکزی بود بر نشر علم و اندیشه که کانونی بود بر تعلیم آیین زندگی، همچنین از اساتید مشاور آقایان دکتر محمد کاظم مروج فرشی و دکتر محمدحسین شیخی که همواره راهنما و مشوق من بوده‌اند و همچنین از خانم دکتر دارابی به خاطر کمک‌هایی که در انجام این رساله داشتند، تشکر و قدردانی می‌نمایم

از دوستان عزیز آقایان دکتر گل‌محمدی، منصور بیرجندی، رزاقی، یآوری، چمن مطلق، میردریکوندی، گندم‌کار، ابن‌علی، صعودی، کیان‌زاد که در طول تحصیل دوره دکتری افتخار همراهی ایشان را داشتم، تشکر می‌کنم.

چکیده

در این رساله یک ساختار جدید کوانتومی نامتقارن تحت کرنش برای ناحیه فعال (ذاتی) مدولاتورهای الکتروجدبی موج رونده در طول موج $1/55 \mu\text{m}$ ارائه شده است. تلفات الحاقی بسیار پایین، نسبت خاموشی بزرگ، چرپ صفر از جمله مهمترین ویژگی‌های ساختار جدید در مقایسه با ساختار سد پله‌ای داخل چاه کوانتومی می‌باشد. ضریب تحدید نوری و ضریب شکست موثر نوری موجبر مدولاتورهای الکتروجدبی موج رونده توسط روش تفاضل محدود تمام برداری محاسبه شده و برای اولین بار با استفاده از مدل مداری و برهمکنش نور و مایکروویو، پاسخ فرکانسی مدولاتورهای الکتروجدبی موج رونده و قسمت‌بندی‌شده بدست آمده است. تحلیل، مدل‌سازی و طراحی مدولاتورهای الکتروجدبی موج رونده در سه مرحله انجام گرفته است. در مرحله اول، محاسبه پارامترهای وابسته به ناحیه فعال مدولاتور الکتروجدبی از قبیل نسبت خاموشی، تلفات الحاقی، چرپ و معیارهای برجستگی، با محاسبه ضریب الکتروجدبی برای ساختار کوانتومی پیشنهادی انجام شده است. در این راستا ترازهای انرژی و توابع موج الکترون و حفره در نوار هدایت و ظرفیت با حل عددی هامیلتونی ساختار کوانتومی نامتقارن با در نظر گرفتن اثر کرنش و میدان الکتریکی توسط روش ماتریس انتقال محاسبه شده‌اند. با استفاده از نتایج حاصل و با حل معادله انتگرالی اکسایتون در فضای اندازه حرکت توسط کوادراتور لژاندر گاوسی، انرژی بستگی و قدرت نوسانگری اکسایتون‌ها بدست آمده و طیف ضریب الکتروجدبی برای نور با قطبش TE در میدان‌های الکتریکی مختلف محاسبه شده است. در ادامه، عملکرد مدولاتور با ساختار پیشنهادی با عملکرد مدولاتور با ساختار سد پله‌ای داخل چاه کوانتومی مقایسه شده است. در مرحله دوم، موجبر نوری مدولاتورهای الکتروجدبی موج رونده توسط روش تفاضل محدود تمام برداری تحلیل شده و پارامترهای مهم نوری از جمله ضریب تحدید نوری و ضریب شکست موثر نوری محاسبه شده‌اند. ضریب تحدید نوری در محاسبه پارامتر نسبت خاموشی و ضریب شکست موثر نوری در محاسبه پاسخ فرکانسی نقش مهمی دارند. در مرحله سوم، موجبر مایکروویو مدولاتورهای الکتروجدبی موج رونده توسط نرم‌افزار HFSS شبیه‌سازی شده‌است. پارامترهای مایکروویو خط انتقال مدولاتور از قبیل امپدانس مشخصه، تلفات و ضریب شکست بدست آورده شده و پارامترهای مدل مداری استخراج شده‌اند. با استفاده از مدل مداری و برهمکنش نور و مایکروویو، پاسخ فرکانسی مدولاتورهای الکتروجدبی موج رونده محاسبه شده است. برای اولین بار، پاسخ فرکانسی مدولاتورهای الکتروجدبی قسمت‌بندی‌شده توسط مدل مداری محاسبه شده و با پاسخ فرکانسی مدولاتورهای الکتروجدبی موج رونده مقایسه شده‌اند.

کلید واژه: مدولاتور الکتروجدبی موج رونده، تلفات الحاقی، نسبت خاموشی، چرپ، قسمت‌بندی‌شده

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل ۱- مقدمه و تاریخچه
۱	۱-۱- پیشگفتار
۱	۱-۲- مدولاسیون نور در سیستمهای مخابرات نوری
۳	۱-۳- تاریخچه پیدایش و ساخت مدولاتورهای الکتروجدبی موج رونده
۵	۱-۴- مطالعات انجام شده در زمینه مدل سازی مدولاتور الکتروجدبی موج رونده
۸	۱-۵- اهداف رساله
۹	۱-۶- ساختار رساله
۱۱	فصل ۲- عملکرد، ساختار و پارامترهای مدولاتور الکتروجدبی موج رونده
۱۱	۲-۱- مقدمه
۱۱	۲-۲- مکانیسم مدولاتورهای الکتروجدبی
۱۴	۲-۳- بررسی پدیده الکتروجدب با در نظر گرفتن اکسایتون ها
۱۴	۲-۳-۱- اکسایتون
۱۴	۲-۳-۲- پدیده جذب اکسایتونی در نیمه هادی کپه ای
۱۶	۲-۳-۳- پدیده جذب اکسایتونی در چاه کوانتومی برای میدانهای عمود بر لایه ها (اثر استارک DC) ...
۱۸	۲-۴- ساختار مدولاتورهای الکتروجدبی فشرده و موج رونده
۲۰	۲-۵- عملکرد مدولاتورهای الکتروجدبی فشرده و موج رونده
۲۳	۲-۶- مشخصات و پارامترهای مدولاتورهای الکتروجدبی موج رونده
۲۳	۲-۶-۱- پارامتر نسبت خاموشی
۲۳	۲-۶-۲- چرپ فرکانسی
۲۵	۲-۶-۳- تلفات الحاقی
۲۶	۲-۶-۴- پاسخ فرکانسی
۲۷	۲-۷- دینامیک حامل های نوری
۲۸	۲-۷-۱- طول عمر حامل
۳۱	۲-۸- ملاحظات طراحی در مدولاتورهای الکتروجدبی
۳۱	۲-۸-۱- توزیع میدان الکتریکی
۳۱	۲-۸-۲- امیدانس مشخصه
۳۲	۲-۸-۳- تطبیق سرعت فاز
۳۲	۲-۸-۴- تضعیف میکروویو
۳۳	فصل ۳- محاسبه ضریب الکتروجدبی برای ساختارهای کوانتومی
۳۳	۳-۱- مقدمه

۲-۳- روش ماتریس انتقال برای بدست آوردن ترازهای انرژی و توابع موج یک ذره در چاه

- کوانتومی ۳۳
- ۱-۲-۳- ماتریس انتقال در فصل مشترک ۳۴
- ۳-۳- کرنش و اثر آن بر ساختار نواری ۳۷
- ۳-۳-۱- انواع کرنش و نوع رفتار آنها ۳۷
- ۳-۳-۲- مؤلفه‌های کرنش ۳۸
- ۳-۳-۳- تغییر ساختار نواری در اثر کرنش ۳۹
- ۴-۳- محاسبه پوش توابع موج الکترون و حفره در ساختارهای چاه کوانتومی ۳۹
- ۱-۴-۳- هامیلتونی باند هدایت برای ساختارهای تحت کرنش و میدان الکتریکی ۴۲
- ۲-۴-۳- هامیلتونی باند ظرفیت نوارهای حفره سنگین و سبک، کرنش و میدان الکتریکی ۴۵
- ۵-۳- محاسبه ضریب الکترو جذبی با لحاظ کردن اثرات اکسایتونی ۵۰
- ۱-۵-۳- محاسبه انرژی بستگی و قدرت نوسانگری اکسایتون ۵۱
- ۲-۵-۳- محاسبه عنصر ماتریس گذار ۵۳
- ۳-۵-۳- محاسبه طیف الکترو جذبی ۵۵

فصل ۴- ساختار جدید چاه کوانتومی دوتائی جفت شده نامتقارن تحت کرنش برای

- مدولاتورهای الکترو جذبی در طول موج $1/55 \mu m$ ۵۷
- ۱-۴- مقدمه ۵۷
- ۲-۴- ساختار کوانتومی پیشنهادی برای مدولاتور الکترو جذبی ۵۸
- ۳-۴- نتایج محاسبات عددی ۶۰
- ۴-۴- نتیجه گیری ۷۲

فصل ۵- تحلیل موجبر نوری و مایکروویو مدولاتور الکترو جذبی موج رونده

- ۱-۵- مقدمه ۷۳
- ۲-۵- ساختار موجبری مدولاتور الکترو جذبی موج رونده و مواد لایه‌ها ۷۳
- ۳-۵- تحلیل تمام برداری موجبر نوری مدولاتور الکترو جذبی موج رونده ۷۵
- ۱-۳-۵- معادلات مد ویژه در موجبر نوری دی الکتریک ۷۵
- ۲-۳-۵- روش تفاضل محدود تمام برداری ۷۹
- ۳-۳-۵- ضریب شکست موثر نوری ۸۸
- ۴-۳-۵- محاسبه ضریب تحدید نوری ۹۰
- ۴-۵- تحلیل موجبر مایکروویو مدولاتور الکترو جذبی موج رونده ۹۱
- ۱-۴-۵- مدل مداری مدولاتور الکترو جذبی موج رونده ۹۱
- ۵-۵- مشخصات مایکروویو و تحلیل مدل مداری مدولاتور الکترو جذبی موج رونده ۹۵
- ۱-۵-۵- مدولاتور الکترو جذبی موج رونده با ساختار قارچی شکل ۱۰۲
- ۲-۵-۵- مدولاتور الکترو جذبی موج رونده قسمت بندی شده ۱۰۵

فصل ۶- نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات ۱۱۰

- ۱-۶ - نتیجه‌گیری ۱۱۰
- ۲-۶ - ارائه پیشنهاد جهت ادامه تحقیقات ۱۱۲
- فهرست مراجع ۱۱۳

فهرست علائم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
مقاومت هدایت خط انتقال	R_{con}
اندوکتانس خط انتقال	L_m
مقاومت سری مدولاتور	R_S
ظرفیت خازن اتصال	C_m
مقاومت نشتی اتصال	R_J
جریان نوری	I_O
خازن پارازیتی	C_P
مقاومت ناشی از وابستگی جریان نوری به ولتاژ اتصال مدولاتور	R_O
قابلیت گذردهی نسبی ماده	ϵ_r
قابلیت گذردهی خلا	ϵ_0
قطبی‌شدگی اکسایتون	\bar{P}
ظرفیت خازنی ناحیه ذاتی	C_i
مقاومت تفاضلی	R_d
فاکتور تحدید نوری	Γ
تغییرات ضریب جذب نوری	$\Delta\alpha$
چرپ فرکانسی	$\Delta\nu(t)$
ضریب شکست مختلط	$n' - jn''$
طول موج فضای آزاد	λ_0
عدد موج فضای آزاد	k_0
پارامتر چرپ	α_H
ضریب جذب در میدان الکتریکی صفر	α_0
توان نور ورودی	P_{in}
توان نور خروجی	P_{out}
ضریب جذب لایه فعال	$\alpha(x)$
مولفه dc ضریب جذب	α_b
مولفه ac ضریب جذب	α_{ac}
ولتاژ بایاس	V_b
ولتاژ مدولاسیون	V_{ac}
ضریب انعکاس داخلی مدولاتور در درگاه مبدا	Γ_S
ضریب انعکاس داخلی مدولاتور در درگاه بار	Γ_L

Z_0	امپدانس مشخصه خط انتقال مایکروویو
Z_S	امپدانس منبع
Z_L	امپدانس بار
Γ	فاکتور تحدید نوری
ω	فرکانس مایکروویو
α_μ	تلفات مایکروویو
n_μ	ضریب شکست مایکروویو
β_μ	عدد موج مایکروویو
v_μ	سرعت فاز مایکروویو
γ_μ	ثابت انتشار مایکروویو
n_o	ضریب شکست نوری
v_o	سرعت گروه نوری
β_o	عدد موج نوری
τ_i^{-1}	نرخ گسیل ترمیونیومیک
τ_t^{-1}	نرخ گسیل تونل زنی
τ_r^{-1}	نرخ گسیل باز ترکیب
K_B	ثابت بولتزمن
T	درجه حرارت
$m_{e,h}$	جرم موثر الکترون (حفره)
L_W	عرض چاه
L_b	عرض سد
F	میدان الکتریکی
h	ثابت پلانک
$\Delta E_{c,v}$	ارتفاع سد برای الکترون (حفره)
$E_{e,h}^{(n)}$	انرژی زیرنوار n ام الکترون (حفره)
$h\nu$	انرژی فوتون های تابشی
κ	نسبت توان نوری جذب شده به توان تابشی
τ	زمان فرار حامل
I_S	چگالی اشباع نوری
N_S	چگالی حالات
a	ثابت شبکه چاه
a_0	ثابت شبکه سد
a_c	پتانسیل تغییر شکل هیدرواستاتیک
C_{12}, C_{11}	ثوابت کشسانی (الاستیک) ماده چاه

ε	ضریب کرنش
ΔE_g	اختلاف انرژی گاف نوار چاه و سدّ در حالت کپهای
Q_e	بند- افسست نوار هدایت
$Q_{hh}(lh)$	بند- افسست نوار ظرفیت حفره سنگین (سبک)
$\psi_j(z)$	تابع موج الکترون (حفره)
V_{Coul}	پتانسیل کولنی
Ψ_ν^X	تابع موج اکسایتون
E_X	انرژی گذار اکسایتون
E_B	انرژی بستگی اکسایتون
f_X	قدرت نوسانگری اکسایتون
$M_{nm}(k)$	ماتریس المان گذار در فضای k
I_{nm}	انتگرال همپوشانی توابع موج الکترون و حفره
M_b^2	ماتریس المان حالت کپهای
Δ	انرژی تراز جدا شدگی اسپین - اوربیت
$\alpha(h\nu)$	ضریب الکترو جذبی
$\alpha(h\nu)^{band}$	ضریب جذب لبه نوار
$\alpha(h\nu)^{exciton}$	ضریب جذب اکسایتونی
Γ_X	عامل پهن شدگی
E_{ex}	انرژی رزونانس اکسایتون
W_e	عرض الکتروود خط انتقال میکروویو
W_g	گاف بین صفحات زمین
W_a	عرض لایه ذاتی
h_i	ضخامت لایه ذاتی
η_0	امپدانس موج در فضای آزاد
e_t	بردار مولفه عرضی میدان الکتریکی
TML	خط انتقال
TWEAM	مدولاتور الکترو جذبی موج رونده
PCW	موجبر جفت شده پیرامونی
FDTD	تفاضل محدود در حوزه زمان
IQW	چاه کوانتومی سدّ پله‌ای
AICD-SQW	چاه کوانتومی دو تائی جفت شده نامتقارن با سدّ پله‌ای تحت کرنش
ER	نسبت خاموشی
TMM	روش انتقال ماتریس
MZM	مدولاتور ماخ-زندر

EML
FKE
QCSE
MQW
FCC

لیزر مدوله شده الکتروجدبی
فرانز - کلدیش
اثر محدود شده کوانتومی استارک
چاه کوانتومی چندتائی
مکعبی مرکز وجوه پر

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۳: پارامترهای استفاده‌شده در محاسبات مربوط به هامیلتونی باندهای هدایت و ظرفیت	۴۷
جدول ۲-۳: عنصر ماتریس گذار در حالت $k=0$ و با فرض همپوشانی کامل توابع موج الکترون و حفره برای مدهای TE و TM	۵۵
جدول ۱-۴: مقادیر پارامترهای دینامیکی محاسبه‌شده در ساختارهای IQW و AICD-SQW	۷۱
جدول ۲-۴: مقادیر محاسبه‌شده پارامترهای مدولاتور الکتروجدبی در سه ساختار IQW، AICD-QW و AICD-SQW	۷۲
جدول ۱-۵: پارامترهای لایه‌های ساختار شبیه‌سازی‌شده	۷۵

فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

- شکل ۱-۱: نمودار بلوکی یک سیستم مخابرات نوری با مدولاسیون مستقیم دیود لیزر..... ۲
- شکل ۱-۲: مدولاسیون مستقیم دیود لیزر با مدوله کردن جریان آن..... ۲
- شکل ۱-۳: برش مقطعی موجبر Undercut-Etching Active-Region..... ۵
- شکل ۱-۴: مدل مداری شبه ایستا ارائه شده توسط لی برای طول واحد یک خط انتقال TWEAM..... ۵
- شکل ۱-۵: مدل مداری ارائه شده توسط لیم..... ۶
- شکل ۱-۶: ساختار شماتیکی مدولاتورهای الکتروجدبی موج رونده با خط انتقال پیوسته و قسمت بندی-
شده..... ۸
- شکل ۱-۲: ساختار لیزر مدوله شده الکتروجدبی..... ۱۲
- شکل ۲-۲: نمایش تصویرهایی برای مدل کردن اثر فرانز-کلدیش (الف) تصویر تونل زنی به کمک فوتون
(ب) جذب بین نوارهای ویژه..... ۱۳
- شکل ۲-۳: نمایش پتانسیل کولنی و اربیتال کلاسیک هنگامی که میدان الکتریکی به اکسایتون اعمال
می‌شود..... ۱۵
- شکل ۲-۴: طیف جذب نوری برای نمونه چاه کوانتومی GaAs/AlGaAs در دمای اتاق برای میدانهای
عمود بر لایه های چاه کوانتومی..... ۱۷
- شکل ۲-۵: نمایش محدود شدن اکسایتون در چاه کوانتومی..... ۱۷
- شکل ۲-۶: ساختارهای مدولاتور الکتروجدبی (الف) فشرده، (ب) موج رونده و (ج) جانمایی..... ۱۹
- شکل ۲-۷: تراز انرژی چاه کوانتومی بعلت اثر تحدیدشده کوانتومی به سمت سرخ جابجا می‌شود.
 ΔE جابجایی (شیفت) تراز انرژی، F میدان الکتریکی و L ضخامت چاه کوانتومی است..... ۲۱
- شکل ۲-۸: عملکرد مدولاتور الکتروجدبی موج رونده..... ۲۲
- شکل ۲-۹: مدل مدار معادل (الف) مدولاتورهای فشرده و (ب) مدل توزیع شده مدولاتور موج رونده، L_{eff}
اندوکتانس سیم، C_m خازن اتصال و R_L امپدانس بار است..... ۲۲
- شکل ۲-۱۰: مدولاسیون فاز (چرپ فرکانسی) متناظر با مدولاسیون شدت در مدولاتور الکتروجدبی..... ۲۴
- شکل ۲-۱۱: مکانیسم فیزیکی برای طول عمر حامل در چاه کوانتومی: گسیل ترمیونیک، تونل زنی و
باز ترکیب..... ۲۹
- شکل ۳-۱: ساختار چاه کوانتومی نوار هدایت در یک ساختار ناهمجنس دو تایی..... ۳۴
- شکل ۳-۲: تغییر ساختار شبکه در اثر (الف) کرنش تراکمی (ب) کرنش کششی..... ۳۸
- شکل ۳-۳: ساختار نواری در فضای اندازه حرکت برای نیمه هادی کپه‌ای در حالت (الف) بدون کرنش،
(ب) اعمال کرنش تراکمی، (ج) اعمال کرنش کششی..... ۴۰
- شکل ۳-۴: اثر اعمال کرنش بر باند هدایت در ساختار چاه کوانتومی..... ۴۳
- شکل ۳-۵: شکل تقریب زده شده چاه‌های پتانسیل در حضور میدان الکتریکی..... ۴۴

شکل ۴-۱: (الف) پروفایل نوار هدایت ساختار AICD-SQW پیشنهادی (ب) برش مقطعی از ساختار لایه‌ای مدولاتور الکتروجدبی..... ۵۹

شکل ۴-۲: پوش توابع موج الکترون (C1) در ساختارهای (الف) IQW و (ج) AICD-QW و (ه) AICD-SQW و حفره سنگین (HH1) در ساختارهای (ب) IQW ، (د) AICD-QW و (ی) AICD-SQW به ازای اعمال میدان الکتریکی $0-60-120 \text{ kV/cm}$ ۶۱

شکل ۴-۳: انرژی بستگی اکسایتون برای گذارهای (الف) C1-HH1 و (ب) C1-LH1 ۶۲

شکل ۴-۴: قدرت‌های نوسانگری محاسبه شده برای سه ساختار بر حسب میدان الکتریکی اعمالی..... ۶۳

شکل ۴-۵: تلفات الحاقی محاسبه شده برای سه ساختار بر حسب ناتنظیمی انرژی..... ۶۳

شکل ۴-۶: جابجایی استارک بر حسب میدان الکتریکی اعمالی برای گذارهای C1-HH1 در سه ساختار IQW ، AICD-QW و AICD-SQW ۶۴

شکل ۴-۷: طیف الکتروجدبی محاسبه شده برای مد TE در ساختارهای (الف) IQW (ب) AICD-QW و (ج) AICD-SQW بازای میدان‌های الکتریکی $0-40-80-120 \text{ kV/cm}$ ۶۵

شکل ۴-۸: نسبت خاموشی محاسبه شده برای مد TE در ساختارهای (الف) IQW (ب) AICD-QW و (ج) AICD-SQW بازای میدان‌های الکتریکی $60-80-100-120 \text{ kV/cm}$ ۶۷

شکل ۴-۹: معیار برجستگی $\Delta\alpha/\alpha_0$ محاسبه شده برای مد TE در ساختارهای (الف) IQW (ب) AICD-QW و (ج) AICD-SQW بازای میدان‌های الکتریکی $60-80-100-120 \text{ kV/cm}$ ۶۸

شکل ۴-۱۰: معیار برجستگی $\Delta\alpha$ بر حسب میدان الکتریکی در طول موج $1/55 \mu\text{m}$ در ساختارهای IQW ، AICD-QW و AICD-SQW ۶۹

شکل ۴-۱۱: پارامتر چرپ محاسبه شده برای مد TE در ساختارهای (الف) IQW (ب) AICD-QW و (ج) AICD-SQW بازای میدان‌های الکتریکی $60-80-100-120 \text{ kV/cm}$ ۷۰

شکل ۴-۱۲: پارامتر چرپ محاسبه شده برای مد TE در ساختارهای IQW ، AICD-QW و AICD-SQW بازای میدان الکتریکی 120 kV/cm ۷۱

شکل ۵-۱: ساختار مدولاتور الکتروجدبی موج رونده برای شبیه‌سازی..... ۷۴

شکل ۵-۲: مش بندی تفاضل محدود نوعی برای موجبر پشته‌ای..... ۸۰

شکل ۵-۳: طرح برچسب‌گذاری در مدل تفاضل محدود. زیرنویس‌های P, N, S, E, W, NE, NW, SW و SE بترتیب برای برچسب‌گذاری نقطه مورد نظر و نزدیکترین همسایه‌ها در شمال، جنوب، شرق، غرب، شمال شرقی، شمال غربی، جنوب غربی و جنوب شرقی استفاده می‌شود..... ۸۱

شکل ۵-۴: پروفایل میدان نوری محاسبه شده برای مد اصلی..... ۸۷

شکل ۵-۵: کانتور مولفه‌های e_x و e_y میدان نوری محاسبه شده برای مد TE..... ۸۸

شکل ۵-۶: ضریب شکست موثر نوری محاسبه شده برای مد اصلی و قطبش TE بازای مقادیر مختلف ضخامت لایه ذاتی..... ۸۹

شکل ۵-۷: ضریب شکست موثر نوری محاسبه شده برای مد اصلی و قطبش TE بازای مقادیر مختلف عرض لایه ذاتی..... ۸۹

شکل ۵-۸: ضریب تحدید نوری (Γ) محاسبه شده برای مد اصلی و قطبش TE..... ۹۰

- شکل ۵-۹: ساختار موجبر مایکروویو مدولاتور الکتروجدبی موج رونده ۹۱
- شکل ۵-۱۰: مدل مداری TWEAM. L_m ، R_{com} ، $\frac{1}{R_s}$ ، $\frac{1}{R_o}$ ، C_m و C_o در واحد طول تعریف شده‌اند ۹۲
- شکل ۵-۱۱: امپدانس مشخصه محاسبه شده بر حسب فرکانس مایکروویو به ازای: (الف) We های متفاوت، (ب) Wg های متفاوت ۹۷
- شکل ۵-۱۲: ضریب شکست مایکروویو محاسبه شده بر حسب فرکانس مایکروویو به ازای: (الف) We های متفاوت، (ب) Wg های متفاوت ۹۸
- شکل ۵-۱۳: تلفات مایکروویو محاسبه شده بر حسب فرکانس مایکروویو به ازای: (الف) We های متفاوت، (ب) Wg های متفاوت ۹۹
- شکل ۵-۱۴: (الف) امپدانس مشخصه، (ب) ضریب شکست و (ج) تلفات مایکروویو محاسبه شده بر حسب فرکانس مایکروویو به ازای مقادیر مختلف h_i ۱۰۰
- شکل ۵-۱۵: مشخصات مایکروویو محاسبه شده بر حسب ضخامت لایه ذاتی به ازای فرکانس مایکروویو ۹۶ GHz ۱۰۱
- شکل ۵-۱۶: عناصر مداری محاسبه شده بر حسب فرکانس (الف) ظرفیت خازنی پیوندگاه، (ب) ظرفیت خازنی بیرونی، (ج) اندوکتانس و (د) مقاومت رسانش فلز ۱۰۲
- شکل ۵-۱۷: پاسخ فرکانسی TWEAM به ازای طول‌های مختلف ۱۰۳
- شکل ۵-۱۸: ساختار قارچی شکل مدولاتور الکتروجدبی موج رونده ۱۰۳
- شکل ۵-۱۹: مشخصات مایکروویو مدولاتور الکتروجدبی موج رونده با ساختار پشت‌های و قارچی شکل ۱۰۴
- شکل ۵-۲۰: پاسخ فرکانسی TWEAM با دو ساختار پشت‌های و قارچی شکل به ازای طول‌های مختلف ۱۰۵
- شکل ۵-۲۱: ساختار مدولاتور موج رونده قسمت بندی شده. مدولاتور به دو قسمت تقسیم شده است. برای افزایش امپدانس مشخصه موثر، از قسمت‌های غیرفعال برای جدا نمودن قسمت‌های فعال مدولاتور استفاده شده است ۱۰۵
- شکل ۵-۲۲: مدار معادل مایکروویو برای مدولاتورهای الکتروجدبی موج رونده قسمت بندی شده ۱۰۶
- شکل ۵-۲۳: مدار معادل RLGC خط انتقال مایکروویو ۱۰۶
- شکل ۵-۲۴: مشخصات مایکروویو قسمت‌های غیرفعال مدولاتور الکتروجدبی موج رونده با ساختار قارچی شکل ۱۰۸
- شکل ۵-۲۵: پاسخ فرکانسی مدولاتورهای الکتروجدبی قسمت بندی شده و قارچی شکل ۱۰۹

فصل ۱ - مقدمه و تاریخچه

۱-۱ - پیشگفتار

مدولاتورهای نوری الکتروجدبی موج رونده با داشتن ویژگی‌هایی از قبیل سرعت و بازده بالا، ولتاژ راه اندازی و چرپ پایین، وابستگی کمتر به قطبش، قابلیت یکپارچه شدن با لیزرهای نیمه‌هادی، عناصر پایه‌ای و کلیدی در مخابرات نوری بشمار می‌آیند، که در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند.

مدولاتورهای نوری الکتروجدبی موج رونده افزاره‌هایی هستند که امواج نوری در راستای الکتروود (شامل یک خط انتقال) توسط میدان‌های الکتریکی رونده، مدوله می‌شوند. چون در TWEAM^۱ ها، ضریب جذب ناحیه فعال (لایه ذاتی) به ولتاژ الکتریکی وابسته است، با تغییر ضریب جذب توسط سیگنال‌های الکتریکی، مدولاسیون نوری انجام می‌گیرد. در اثر جذب توان نوری در لایه فعال مدولاتورهای الکتروجدبی موج رونده، ولتاژ الکتریکی رونده نیز در راستای الکتروود توسط جریان‌های نوری تولیدشده تأثیر می‌پذیرد. بنابراین در موجبر TWEAM ها، بین میدان‌های الکترومغناطیسی و توان‌های نوری برهمکنش وجود دارد.

در این فصل مروری بر مدولاسیون نور در سیستم‌های مخابرات نوری، تاریخچه پیدایش، ساخت و پیشرفت مدولاتورهای الکتروجدبی موج رونده خواهد شد و مطالعات انجام‌شده در زمینه مدل‌سازی این افزاره‌ها، ارائه می‌شود.

۱-۲ - مدولاسیون نور در سیستم‌های مخابرات نوری

تلفات بسیار کم شدت نور در مخابرات فیبر نوری، یکی از مزیت‌های مهم استفاده از نور هدایت شده در فیبر است. در حال حاضر تلفات فیبر سیلیکونی در حدود 0.2 dB/Km در طول موج‌های $1.3 \mu\text{m}$ یا $1.55 \mu\text{m}$ است. بنابراین در این طول موج‌ها، فیبر نوری کمترین پاشندگی و تلفات را خواهد داشت. حال این سؤال مطرح می‌شود که چطور اطلاعات سیگنال الکتریکی را به سیگنال نوری تبدیل کنیم. فرآیند تبدیل سیگنال الکتریکی به سیگنال نوری، تبدیل الکتریکی به نوری^۲ نامیده می‌شود که توسط مدولاتورهای نوری انجام می‌گیرد. در انتهای فیبر، سیگنال‌های نوری باید به سیگنال‌های الکتریکی برگردانده شوند تا در مدارات الکترونیکی قابل استفاده باشند. این فرآیند، تبدیل نوری به الکتریکی^۳ نامیده می‌شود که توسط آشکارسازهای نوری انجام می‌گیرد. بنابراین مسأله مدولاسیون نور یکی از موضوعات اصلی پژوهش در حوزه مخابرات نوری است [۱].

^۱ Traveling Wave Electro-Absorption Modulator: TWEAM

^۲ E-O Conversion

^۳ O-E Conversion