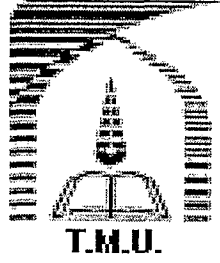


الله اعلم

٩٢١٢٤



دانشگاه تربیت مدرس  
دانشکده فنی و مهندسی

رساله دکتری مهندسی برق-الکترونیک

طراحی و تحلیل عددی جبران ساز پاشندگی مبتنی بر ساختارهای شبه پرئودیک

سعید گل محمدی هریس

استاد راهنما:

دکتر محمد کاظم مروج فرشی

استاد مشاور:

دکتر علی رستمی

دکتر عباس ظریفکار

۱۳۸۷ / ۲ / ۱۵

زمستان ۱۳۸۶

۹۳۱۶۳

## آیین نامه چاپ پایان نامه (رساله) های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله) های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله) ی خود مراتب را قبلاً به طور 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 پایان نامه کارشناسی ارشد / رساله دکتری نگارنده در رشته الکترونیک است

که در سال ۱۳۸۴ در دانشکده علمی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به

راهنمایی سرکار خانم / جناب آقای دکتر محمد کاظم مروج فرستی مشاور سرکار خانم / جناب آقای دکتر

دکتر علی رستی و مشاوره سرکار خانم / جناب آقای دکتر عباس ظریفکار 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 مطالعه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می دهند به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروشو تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب سعید گل محمدی هرنسی دانشجوی رشته مهندسی برق - الکترونیک مقطع

تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی سعید گل محمدی

تاریخ و امضاء ۸۷/۱۱/۱

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

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های 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، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان‌نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

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

ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان‌نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین‌نامه‌های مصوب انجام می‌شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه / رساله و تمامی طرحهای 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 لازم‌الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری خواهد بود.



۱۳۹۹



بسمه تعالی

### تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از رساله دکتری

آقای سعید گل محمدی هرپس رساله ۲۴ واحدی خود را با عنوان طراحی و تحلیل عددی جبران سازهای پاشندگی مبتنی بر ساختارهای شبه پرپو دیک 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.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر محمد کاظم مروج فرشی	استاد	
استاد مشاور	دکتر علی رستمی	استاد	
استاد مشاور	دکتر عباس ظریفکار	استاد	
استاد ناظر	دکتر وحید احمدی	استاد	
استاد ناظر	دکتر عبدالرضا نبوی لیشی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر محمد صادق ابریشمیان	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر نصرت اله گرانپایه	دانشیار	
نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر عبدالرضا نبوی لیشی	دانشیار	

مستأد

این رساله با قرارداد شماره ۳۶۷۹/ت ۵۰۰، با حمایت مالی مرکز تحقیقات مخابرات ایران انجام شده است.

تقدیم

به پدر و مادر عزیزم

و

همسر مهربانم

## تشکر و قدردانی

خداوند را شاکرم که این رساله پس از تلاش فراوان به نتایج رضایت‌بخش رسید. از آنجاکه تشکر از بندگان خدا در به جای آوردن شکرش شرط است، لازم می‌دانم از زحمات استاد عزیزم جناب آقای دکتر محمد کاظم مروج فرشی به خاطر کمک‌های فراوان و راهنمایی‌های مفیدشان در انجام رساله و همچنین زحمتهایی که در طول دوره آموزشی دکتری داشتند، تشکر و قدردانی کنم. همچنین لازم می‌دانم از اساتید مشاور آقایان دکتر علی رستمی و دکتر عباس ظریفکار به خاطر کمک‌هایی که در انجام این رساله داشتند، تشکر و قدردانی کنم. از آقای دکتر وحید احمدی به خاطر کمک‌های درسی و همچنین کمک‌هایی که در انجام رساله داشتند، کمال امتنان را دارم. از اساتید ممتحن، آقایان دکتر نبوی، دکتر ابریشمیان و دکتر گرانیپه تشکر می‌کنم. از دوستان عزیز آقایان دکتر عابدی، دکتر زارع، منصوری بیرجندی، جلالی، یآوری، رزاقی، ابن‌علی، صعودی، کیانزاد و چمن مطلق که در طول تحصیل دوره دکتری افتخار همراهی ایشان را داشتم، تشکر می‌کنم. در پایان از دوستان خوابگاهی عزیزم، آقایان یعقوبی، آقایی، ختن‌لو، اشرفی، علیرضاپور، دلیلی اسکویی و حیدری به خاطر همراهی در طول تحصیل دوره دکتری تشکر و قدردانی می‌کنم.



## چکیده

در این رساله، براساس ساختارهای شبه پریودیک فیبوناچی، ساختارهای جدیدی را برای طراحی فیلترهای نوری و همچنین جبران‌ساز پاشندگی پیشنهاد داده‌ایم. برای دستیابی به ساختارهای بهینه برای کاربردهای مذکور، ابتدا طیف بازتاب انواع ساختارهای شبه‌پریودیک و همچنین ساختارهای شبه پریودیک فیبوناچی مراتب ( $n$  های) مختلف با هم مقایسه شده است. با استفاده از نتایج حاصل، ساختارهای مناسب برای به‌کارگیری در سامانه‌های DWDM پیشنهاد شده است.

در ادامه یک فیلتر چندکاناله برای سامانه‌های مخابرات نوری DWDM طراحی کرده‌ایم. برای دستیابی به ساختار مطلوب از روش اپودیز کردن ضریب شکست لایه‌ها استفاده شده است. با تحلیل اثر حرارت بر تغییرات ضخامت لایه‌های تشکیل دهنده ساختار فیلتر و همچنین خطاهای ساخت بر مشخصه‌های فیلتر و مقایسه آن‌ها با استاندارد ITU-T، دریافتیم که انحراف در ضخامت لایه‌های ساخته شده نباید از  $5\text{nm}$  بیشتر باشد. علاوه بر طراحی، روش ساخت این‌گونه فیلترها نیز با استفاده از نانولیتوگرافی پیشنهاد شده است.

در پایان با بهره‌گیری از نتایج قبلی و اعمال تغییراتی مناسب در ضخامت لایه‌های تشکیل دهنده فیلترهای طراحی شده، جبران‌سازهای پاشندگی با ویژگی‌هایی مطابق با استاندارد ITU-T طراحی شده است. ضخامت لایه‌های به‌کارگرفته شده در این افزاره‌های جدید هر یک مضرب فردی از یک چهارم طول موج مرکزی بر ضریب شکست لایه هستند. بعلاوه، در خواص طیفی این‌گونه فیلترها، دیده شده است که پاشندگی آن‌ها در گستره پهنای هر یک از باندها ناچیز است درحالی‌که در دولبه هر باند اندازه آن به‌طور ناگهانی و به‌مقدار زیادی تغییر می‌کند. با بهره‌گیری از روش متداول در توری‌های براگ چرپ شده، با ایجاد چرپ مناسب در ساختار شبه پریودیک فیبوناچی رفتار پاشندگی افزاره‌های جدید به نحو مطلوبی به رفتار افزاره‌های جبران‌ساز پاشندگی برای کاربرد در سامانه‌های DWDM نزدیک می‌شود. یعنی، ساختارهای جدید در گستره هر باند، دارای تأخیر گروه با شیب منفی و ثابت است. با این‌همه هم در طیف بازتاب و هم در نمایه تأخیر گروه این افزاره‌های چرپ شده ناهمواری‌هایی مشاهده می‌شود. اما، جبران‌سازی که قرار است در سامانه‌های DWDM به‌کار گرفته شود باید عاری از این‌گونه ناهمواری‌ها باشد. برای از میان برداشتن این ناهمواری‌ها، از روش اپودایز کردن ضریب‌های شکست لایه‌های به‌کار رفته در ساختار بهره گرفته‌ایم. نتایج محاسبات نشان می‌دهد که جبران‌سازهای طراحی شده با استفاده از این ساختارها می‌توانند پاشندگی را در یک سامانه DWDM ۲۰ کاناله با فاصله  $0.8$  نانومتری و طول موج مرکزی  $1550\text{nm}$  در یک فیبر تک مد معمولی به طول  $220\text{km}$  را جبران سازند.

**کلید واژه:** پاشندگی، جبران‌ساز، ساختار شبه پریودیک، فیلتر نوری، سامانه DWDM

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
د	فهرست علایم و نشانه‌ها
و	فهرست جدول‌ها
ح	فهرست شکل‌ها
۱	فصل ۱- مقدمه
۱-۱	۱-۱- پیشگفتار
۱-۲	۱-۲- مروری بر فیلترهای نوری و جبران‌سازهای پاشندگی در سامانه‌های نوری
۱-۲-۱	۱-۲-۱- فیلترهای نوری چند کاناله و نقش آنها در سیستم‌های مخابرات نوری
۲-۲	۲-۲- پاشندگی و نقش محدودکننده آن در سیستم‌های مخابرات نوری
۱-۲-۲-۱	۱-۲-۲-۱- پاشندگی مرتبه بالاتر
۲-۲-۲-۱	۲-۲-۲-۱- تدابیر پیش جبران
۱-۲-۲-۲-۱	۱-۲-۲-۲-۱- روش پیش چرپ
۳-۲-۲-۱	۳-۲-۲-۱- تدابیر پس جبران
۱-۳-۲-۲-۱	۱-۳-۲-۲-۱- فیبرهای جبران ساز پاشندگی
۲-۳-۲-۲-۱	۲-۳-۲-۲-۱- فیلترهای نوری
۳-۳-۲-۲-۱	۳-۳-۲-۲-۱- توریهای براگ فیبری
۴-۳-۲-۲-۱	۴-۳-۲-۲-۱- توریهای با پریود یکنواخت
۵-۳-۲-۲-۱	۵-۳-۲-۲-۱- توری چرپ شده فیبری
۶-۳-۲-۲-۱	۶-۳-۲-۲-۱- ترکیب فاز نوری
۷-۳-۲-۲-۱	۷-۳-۲-۲-۱- جبران پاشندگی باند وسیع
۳-۱	۳-۱- ساختار رساله
۲	فصل ۲- انواع ساختارهای چند لایه
۱-۲	۱-۲- مقدمه
۲-۲	۲-۲- ساختارهای پریودیک
۱-۲-۲	۱-۲-۲- تحلیل ساختارهای پریودیک با استفاده از تئوری بلاخ
۲-۲-۲	۲-۲-۲- تئوری مد تزویج شده برای ساختارهای پریودیک
۱-۲-۲-۲	۱-۲-۲-۲- معادلات مد تزویج شده برای انتشار نور در محیط پریودیک
۳-۲-۲	۳-۲-۲- ساختار باند نوری در محیط‌های پریودیک
۳-۲	۳-۲- ساختارهای ابرپریودیک
۴-۲	۴-۲- ساختارهای شبه پریودیک
۱-۴-۲	۱-۴-۲- ساختار شبه پریودیک فیبوناچی مرتبه اول $S_j = FC(j, 1)$
۲-۴-۲	۲-۴-۲- ساختار شبه پریودیک فیبوناچی مرتبه $n$ $FC(j, n)$
۳-۴-۲	۳-۴-۲- ساختار شبه کانتور

۱۷	تئوری مد تزویج شده برای ساختارهای شبه پرئودیک	۴-۴-۲
۱۷	روش تبدیل فوریه سریع	۵-۲
۱۸	روش ماتریس انتقال	۶-۲
۱۸	استخراج روابط ماتریسی انتشار نور در یک لایه دیالکتریک	۶-۲-۱
۲۱	استخراج روابط بازتاب و انتقال در یک لایه دیالکتریک	۶-۲-۲
۲۳	روش محاسبه ماتریس انتقال و محاسبه بازتاب برای یک ساختار چند لایه	۶-۲-۳
۲۴	محاسبه شدت میدان در یک ساختار چند لایه	۶-۲-۴
۲۶	<b>فصل ۳ - طیف بازتاب ساختارهای شبه پرئودیک یک بعدی</b>	
۲۶	مقدمه	۳-۱-۱
۲۶	طیف بازتاب ساختار شبه پرئودیک فیبوناچی	۳-۲-۱
۲۶	طیف بازتاب ساختار فیبوناچی مرتبه اول $FC(j,1)$	۳-۲-۱-۱
۲۸	طیف بازتاب ساختار فیبوناچی مرتبه $n$ $FC(j,n)$	۳-۲-۲
۴۱	طیف بازتاب ساختار شبه کانتور	۳-۳
۴۷	بحث و نتیجه گیری	۳-۴
۴۹	<b>فصل ۴ - طراحی فیلترهای DWDM با استفاده از ساختارهای فیبوناچی</b>	
۴۹	مقدمه	۴-۱-۱
۵۱	مقایسه طیف ساختار شبه پرئودیک فیبوناچی $FC(j,n)$ با زهای مختلف	۴-۲-۱
۵۱	ساختار باند فتونیک $FC(3,n)$	۴-۲-۱-۱
۵۲	ساختار باندهای فتونیک $FC(4,n)$	۴-۲-۲
۵۳	ساختار باندهای فتونیک $FC(5,n)$	۴-۲-۳
۵۵	طراحی فیلتر با چندین باند عبور با استفاده از ساختارهای فیبوناچی	۴-۳-۱
۵۵	اثرات مرتبه ساختار فیبوناچی، $n$ روی خواص فیلتر	۴-۳-۱-۱
۵۶	اثرات طول لایه‌ها، $d_n$ و $d_b$ ، روی خواص فیلتر	۴-۳-۲
۵۷	اثرات ضریب شکست لایه‌ها، $n_n$ و $n_b$ ، روی خواص فیلتر	۴-۳-۳
۵۸	طراحی فیلتر DWDM چند کاناله با استفاده از $FC(j,n)$	۴-۴-۱
۵۸	کاهش گلبرگهای کناری باندهای فیلتر فیبوناچی با استفاده از اپودایز کردن نمایه ضریب شکست	۴-۴-۵
۶۰	شکست	
۶۱	اینترلیور/دی اینترلیور با استفاده از ساختارهای فیبوناچی	۴-۶-۱
۶۳	ساختار فیلتر فیبوناچی با استفاده از نانولیتوگرافی	۴-۷-۱
۶۴	اثرات خطای ساخت و تغییرات دما روی فیلتر فیبوناچی	۴-۸-۱
۶۵	بحث و نتیجه گیری	۴-۹-۱
۶۷	<b>فصل ۵ - جبران پاشندگی با استفاده از ساختارهای شبه پرئودیک</b>	
۶۷	مقدمه	۵-۱-۱
۶۷	تأخیر گروه (GD) و پاشندگی سرعت گروه (GVD) برای ساختارهای شبه پرئودیک	۵-۲-۱

۷۳.....	۳-۵- جبران پاشندگی با استفاده از ساختارهای فیبوناچی
۷۸.....	۳-۵-۱- تأثیر افزایش $n$ بر روی پاشندگی ساختار فیبوناچی
۸۱.....	۳-۵-۲- آثار ضخامت لایه‌ها بر روی پاشندگی ساختار فیبوناچی
۸۲.....	۳-۵-۳- آثار ضریب شکست لایه‌ها بر روی پاشندگی ساختار فیبوناچی
۸۵.....	۴-۵- طراحی جبرانساز پاشندگی برای سامانه‌های DWDM با ساختارهای فیبوناچی
۸۸.....	۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۹۳.....	فهرست مراجع
۹۹.....	واژه نامه فارسی به انگلیسی
۱۰۱.....	واژه نامه انگلیسی به فارسی

## فهرست علائم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
هم‌تافت تقسیم طول	WDM
هم‌تافت تقسیم طول موج متراکم	DWDM
هم‌تافت تقسیم طول موج نامتراکم	CWDM
فیبر آلئیده به اریوم	EDFA
فیبر با سطح مؤثر بزرگ	LEAF
مجمع بین‌المللی مخابرات	ITU
پاشندگی سرعت گروه	GVD
طول موج	$\lambda$
نرخ بیت	$B$
طول	$L$
ضریب پاشندگی	$D$
شیب پاشندگی	$S$
تقویت کننده نوری نیمه‌رسانا	SOA
فرکانس زاویه‌ای	$\omega$
فیبر جبران‌ساز پاشندگی	DCF
ضریب تلفات فیبر	$\alpha$
معیار کیفیت فیبر	$M$
نویز خودبخودی اضافی	ASE
ماخ-زندر	MZ
پریود توری براگ	$\Lambda$
لایه A	A
لایه B	B
ضریب شکست لایه‌ها	$n_{a,b}$
ضخامت لایه‌ها	$d_{a,b}$
اختلاف ضریب شکست دو لایه	$\Delta n$
میدان الکتریکی	$E$
عدد موج	$k$
ضریب تزویج	$\kappa$
سرعت گروه	$v_g$
ثابت شبکه	$a$

DFB	فیدبک توزیع شده براگ
DBR	بازتاب‌دهنده توزیع شده براگ
FC	ساختار فیبوناچی
SFC	ساختار فیبوناچی متقارن
$j$	عدد تولید فیبوناچی
$n$	مرتبۀ فیبوناچی
$L_{opt}$	طول نوری لایه‌ها
PBG	گاف فتونیک
FFT	تبدیل فوریه سریع
TMM	روش ماتریس انتقال
$r$	ضریب فرنل (بازتاب)
$t$	ضریب فرنل (انتقال)
$\Gamma$	ضریب بازتاب
$\mathcal{T}$	ضریب انتقال
$R$	بازتاب
$T$	انتقال
$m$	ضریب فرد یک‌چهارم طول‌موج
FSR	بازه طیفی آزاد
$\Delta\lambda$	پهنای باند
$g(z)$	تابع گوسی
$h$	دامنه تابع گوسی
$\sigma$	انحراف استاندارد تابع گوسی
T	حرارت
$\alpha_{a,b}$	ضریب انبساط حرارتی لایه‌ها
$\nu_{a,b}$	نسبت پواسن لایه‌ها
CDC	جبران ساز پاشندگی رنگی
SMF	فیبر تک‌مد
GD	تأخیر گروه
$\tau_g$	تأخیر گروه
$\varphi$	فاز بازتاب
$C(z)$	تابع چرپ

## فهرست جدول‌ها

صفحه

عنوان

- جدول ۴-۱- طول‌موجهای تعریف شده و فرکانس معادل آنها در باندهای C و S توسط ITU-T ..... ۵۰
- جدول ۴-۲- طول موج مرکزی هر گاف فتونیکی  $(\lambda_{\mu})$ ، فرکانس مرکزی آن  $(\omega_{\mu})$ ، فرکانس قطع پائین  $(\omega_{\mu 1})$ ، فرکانس قطع بالا  $(\omega_{\mu 2})$  و پهنای هر باند بازتاب  $(\Delta\omega_{\mu})$  برای طیف بازتاب  $FC(3,50)$  در پنجره نشان داده شده در شکل ۴-۱-الف ..... ۵۲
- جدول ۴-۳- طول موج مرکزی هر گاف فتونیکی  $(\lambda_{\mu})$ ، فرکانس مرکزی آن  $(\omega_{\mu})$ ، فرکانس قطع پائین  $(\omega_{\mu 1})$ ، فرکانس قطع بالا  $(\omega_{\mu 2})$  و پهنای هر باند بازتاب  $(\Delta\omega_{\mu})$  برای طیف بازتاب  $FC(4,25)$  در پنجره نشان داده شده در شکل ۴-۲-الف ..... ۵۳
- جدول ۴-۴- طول موج مرکزی هر گاف فتونیکی  $(\lambda_{\mu})$ ، فرکانس مرکزی آن  $(\omega_{\mu})$ ، فرکانس قطع پائین  $(\omega_{\mu 1})$ ، فرکانس قطع بالا  $(\omega_{\mu 2})$  و پهنای هر باند بازتاب  $(\Delta\omega_{\mu})$  برای طیف بازتاب  $FC(5,10)$  برای باندهای باریک موجود در شکل ۴-۳-ب ..... ۵۴
- جدول ۴-۵- وابستگی خواص مختلف فیلتر فیبوناچی  $FC(4,n)$  به مرتبه فیبوناچی برای  $n_a=1.9$  و  $n_b=1.6$  ..... ۵۶
- جدول ۴-۶- وابستگی خواص مختلف فیلتر چند باندهای  $FC(4,30)$  به مقادیر  $d_a$  برای  $n_a=1.9$  و  $n_b=1.6$  ..... ۵۶
- جدول ۴-۷- وابستگی خواص مختلف فیلتر چند باندهای  $FC(4,30)$  به مقادیر  $d_b$  برای  $n_a=1.9$  و  $n_b=1.6$  ..... ۵۷
- جدول ۴-۸- وابستگی خواص مختلف فیلتر  $FC(4,30)$  به مقادیر مختلف  $n_a$  و  $n_b$  ..... ۵۷
- جدول ۴-۹- وابستگی خواص مختلف فیلتر  $FC(4,30)$  به مقادیر مختلف  $n_a$  و  $n_b$  ..... ۵۷
- جدول ۵-۱-  $L$ ،  $\Delta\lambda$ ،  $FSR$ ،  $\Delta\tau$  و  $D$  برای ساختار  $FC(3,n)$  چرپ و آپودایز شده به ازای مقادیر مختلف  $n$  سایر پارامترها  $\lambda_0=1550\text{nm}$ ،  $n_a=1.6$ ،  $n_b=1.75$ ،  $n_0=1.4$ ،  $\Delta n_a=0.2$ ،  $\Delta n_b=0.35$ ،  $d_{a0}=7\lambda_0/4n_a=1.7\mu\text{m}$ ،  $d_{b0}=7\lambda_0/4n_b=1.55\mu\text{m}$ ،  $\alpha=-1$ ،  $\beta=1000$ ،  $\sigma=0.25$  و  $h=1$  هستند ..... ۷۹

جدول ۵-۲- L،  $\Delta\lambda$ ، FSR،  $\Delta\tau$  و  $D$  برای ساختار  $FC(4,n)$  چرپ و اپودایز شده به ازای مقادیر مختلف  $n$  سایر پارامترها  $\lambda_0=1550\text{nm}$   $n_a=1.6$   $n_b=1.75$   $n_0=1.4$   $\Delta n_a=0.2$   $\Delta n_b=0.35$   $d_{a0}=\lambda_0/4n_{a0}=242\text{nm}$   $d_{b0}=\lambda_0/4n_{b0}=221\text{nm}$   $\alpha=-1$   $\beta=4000$   $\sigma=0.25$  و  $h=1$  هستند..... ۷۹

جدول ۵-۳- L،  $\Delta\lambda$ ، FSR،  $\Delta\tau$  و  $D$  برای ساختار  $FC(4,35)$  چرپ و اپودایز شده به ازای مقادیر مختلف  $m$  سایر پارامترها  $\lambda_0=1550\text{nm}$   $n_a=1.6$   $n_b=1.75$   $n_0=1.4$   $\Delta n_a=0.2$   $\Delta n_b=0.35$   $d_{a0}=m\lambda_0/4n_{a0}$   $d_{b0}=m\lambda_0/4n_{b0}$   $\alpha=-1$   $\beta=4000$   $\sigma=0.25$  و  $h=1$  هستند..... ۸۱

جدول ۵-۴- L،  $\Delta\lambda$ ، FSR،  $\Delta\tau$  و  $D$  برای ساختار  $FC(3,50)$  چرپ و اپودایز شده به ازای مقادیر مختلف  $m$  سایر پارامترها  $\lambda_0=1550\text{nm}$   $n_a=1.6$   $n_b=1.75$   $n_0=1.4$   $\Delta n_a=0.2$   $\Delta n_b=0.35$   $d_{a0}=m\lambda_0/4n_{a0}$   $d_{b0}=m\lambda_0/4n_{b0}$   $\alpha=-1$   $\beta=1000$   $\sigma=0.25$  و  $h=1$  هستند..... ۸۲

جدول ۵-۵- L،  $\Delta\lambda$ ، FSR،  $\Delta\tau$  و  $D$  برای ساختار  $FC(4,n)$  چرپ و اپودایز شده به ازای مقادیر مختلف  $n$  سایر پارامترها  $\lambda_0=1550\text{nm}$   $n_a=1.6$   $n_b=1.75$   $n_0=1.4$   $\Delta n_a=0.2$   $\Delta n_b=0.35$   $d_{a0}=3\lambda_0/4n_{a0}=726\text{nm}$   $d_{b0}=3\lambda_0/4n_{b0}=664\text{nm}$   $\alpha=-1$   $\beta=4000$   $\sigma=0.25$  و  $h=1$  هستند..... ۸۶



## فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۲- ساختار پریودیک تشکیل شده از دو ماده A و B به ترتیب دارای ضخامت $d_a$ و $d_b$ و ضریب شکست $n_a$ و $n_b$ .....	۱۰
شکل ۲-۲- تشابه تغییرات ضریب شکست در یک ساختار پریودیک با تغییرات پتانسیل پریودیک شبکه اتمی.....	۱۱
شکل ۳-۲- تغییرات ضریب تزیوج در یک ساختار ابر پریودیک نمونه.....	۱۴
شکل ۴-۲- ترتیب لایه‌ها در ساختار فیبوناچی مرتبه اول $FC(6,1)$ .....	۱۵
شکل ۵-۲- ساختار شبه پریودیک کانتور برای $N=0,1,2,3$ .....	۱۶
شکل ۶-۲- یک لایه دی‌الکتریک به ضخامت $L$ که بین دو لایه متفاوت دیگر قرار گرفته است. مؤلفه‌های پیشرو و پسرو میدان الکتریکی در نقاط مختلف روی شکل مشخص شده‌اند.....	۱۹
شکل ۷-۲- میدان الکتریکی متشکل از مؤلفه‌های پیشرو و پسرو که در دو طرف مرز بین دو لایه تعریف شده‌اند.....	۱۹
شکل ۸-۲- میدانهای الکتریکی در $z_1$ و $z_2$ که با لایه‌های به طول $L$ و ضریب شکست $n_2$ از هم جدا شده‌اند.....	۲۰
شکل ۹-۲- نمای دو اتصال در دو انتهای یک لایه دی‌الکتریک به ضخامت $L$ .....	۲۴
شکل ۱-۳- بازتاب از $FC(7,1)$ ، $\lambda_0=1.55 \mu\text{m}$ ، $n_a=1.5$ ، $n_b=2.5$ ، $d_a=5\lambda_0/(4n_a)$ ، $d_b=5\lambda_0/(4n_b)$ و $L=23 \mu\text{m}$ ، بر حسب (الف) طول موج، (ب) نسبت $\lambda/\lambda_0$ .....	۲۷
شکل ۲-۳- بازتاب از $FC(10,1)$ ، $\lambda_0=1.55 \mu\text{m}$ ، $n_a=1.5$ ، $n_b=2.5$ ، $d_a=5\lambda_0/(4n_a)$ ، $d_b=5\lambda_0/(4n_b)$ و $L=97.4 \mu\text{m}$ ، بر حسب (الف) طول موج، (ب) نسبت $\lambda/\lambda_0$ .....	۲۷
شکل ۳-۳- بازتاب از $FC(13,1)$ ، $\lambda_0=1.55 \mu\text{m}$ ، $n_a=1.5$ ، $n_b=2.5$ ، $d_a=5\lambda_0/(4n_a)$ ، $d_b=5\lambda_0/(4n_b)$ و $L=412.6 \mu\text{m}$ ، بر حسب (الف) طول موج، (ب) نسبت $\lambda/\lambda_0$ .....	۲۸

شکل ۳-۴- بازتاب از  $FC(3,3)$ ،  $\lambda_0=1.55 \mu\text{m}$ ،  $n_a=1.5$ ،  $n_b=1.8$ ،  $d_a=5\lambda_0/(4n_a)$ ،  $d_b=5\lambda_0/(4n_b)$  و  $L=11.4 \mu\text{m}$ ، بر حسب (الف) طول موج، (ب) نسبت  $\lambda/\lambda_0$  ..... ۳۰

شکل ۳-۵- بازتاب از  $FC(3,4)$ ،  $\lambda_0=1.55 \mu\text{m}$ ،  $n_a=1.5$ ،  $n_b=1.8$ ،  $d_a=5\lambda_0/(4n_a)$ ،  $d_b=5\lambda_0/(4n_b)$  و  $L=19.1 \mu\text{m}$ ، بر حسب (الف) طول موج، (ب) نسبت  $\lambda/\lambda_0$  ..... ۳۰

شکل ۳-۶- بازتاب از  $FC(3,7)$ ،  $\lambda_0=1.55 \mu\text{m}$ ،  $n_a=1.5$ ،  $n_b=1.8$ ،  $d_a=5\lambda_0/(4n_a)$ ،  $d_b=5\lambda_0/(4n_b)$  و  $L=55.3 \mu\text{m}$ ، بر حسب (الف) طول موج، (ب) نسبت  $\lambda/\lambda_0$ ، (ج) طول موج در یک محدوده وسیع، (د) نسبت  $\lambda/\lambda_0$  برای محدوده (ج) ..... ۳۱

شکل ۳-۷- بازتاب از  $FC(3,50)$ ،  $\lambda_0=1.55 \mu\text{m}$ ،  $n_a=1.5$ ،  $n_b=1.8$ ،  $d_a=5\lambda_0/(4n_a)$ ،  $d_b=5\lambda_0/(4n_b)$  و  $L=2.7 \text{ mm}$ ، بر حسب (الف) طول موج، (ب) نسبت  $\lambda/\lambda_0$ ، (ج) قسمتی از بازه‌ی قسمت (الف) ..... ۳۲

شکل ۳-۸- بازتاب از  $FC(4,3)$ ،  $\lambda_0=1.55 \mu\text{m}$ ،  $n_a=1.5$ ،  $n_b=2.5$ ،  $d_a=5\lambda_0/(4n_a)$ ،  $d_b=5\lambda_0/(4n_b)$  و  $L=30.7 \mu\text{m}$ ، بر حسب (الف) طول موج، (ب) نسبت  $\lambda/\lambda_0$  ..... ۳۴

شکل ۳-۹- بازتاب از  $FC(4,4)$ ،  $\lambda_0=1.55 \mu\text{m}$ ،  $n_a=1.5$ ،  $n_b=2.5$ ،  $d_a=5\lambda_0/(4n_a)$ ،  $d_b=5\lambda_0/(4n_b)$  و  $L=81 \mu\text{m}$ ، بر حسب (الف) طول موج، (ب) نسبت  $\lambda/\lambda_0$  ..... ۳۴

شکل ۳-۱۰- طیف بازتاب از  $FC(4,6)$ ،  $\lambda_0=1.55 \mu\text{m}$ ،  $n_a=1.5$ ،  $n_b=2.5$ ،  $d_a=5\lambda_0/(4n_a)$ ،  $d_b=5\lambda_0/(4n_b)$  و  $L=0.25 \text{ mm}$ ، بر حسب (الف) طول موج، (ب) نسبت  $\lambda/\lambda_0$  ..... ۳۵

شکل ۳-۱۱- بازتاب از  $FC(4,9)$ ،  $\lambda_0=1.55 \mu\text{m}$ ،  $n_a=1.5$ ،  $n_b=2.5$ ،  $d_a=5\lambda_0/(4n_a)$ ،  $d_b=5\lambda_0/(4n_b)$  و  $L=0.82 \text{ mm}$ ، بر حسب (الف) طول موج، (ب) نسبت  $\lambda/\lambda_0$ ، (ج) قسمتی از بازه‌ی قسمت (الف) ..... ۳۶

شکل ۳-۱۲- بازتاب از  $FC(4,9)$ ،  $\lambda_0=1.55 \mu\text{m}$ ،  $n_a=1.5$ ،  $n_b=2.5$ ،  $d_a=4\lambda_0/(4n_a)$ ،  $d_b=4\lambda_0/(4n_b)$  و  $L=0.65 \text{ mm}$ ، بر حسب (الف) طول موج، (ب) نسبت  $\lambda/\lambda_0$  ..... ۳۷

شکل ۳-۱۳- بازتاب از  $FC(4,15)$ ،  $\lambda_0=1.55 \mu\text{m}$ ،  $n_a=1.5$ ،  $n_b=1.8$ ،  $d_a=5\lambda_0/(4n_a)$ ،  $d_b=5\lambda_0/(4n_b)$  و  $L=3.7 \text{ mm}$ ، الف- بازتاب بر حسب طول موج، ب- بازتاب بر حسب نسبت  $\lambda/\lambda_0$ ، ج- طیف بزرگنمایی شده قسمت (الف) ..... ۳۸

شکل ۳-۱۴- طیف بازتاب از  $FC(4,20)$ ،  $\lambda_0=1.55 \mu\text{m}$ ،  $n_a=1.5$ ،  $n_b=1.8$ ،  $d_a=5\lambda_0/(4n_a)$ ،  $d_b=5\lambda_0/(4n_b)$  و  $L=8.7 \text{ mm}$ ، بر حسب (الف) طول موج، (ب) نسبت  $\lambda/\lambda_0$ ، (ج) قسمتی از بازه‌ی قسمت (الف) ..... ۳۹

شکل ۳-۱۵- طیف بازتاب از  $FC(4,21)$ ،  $\lambda_0=1.55 \mu\text{m}$ ،  $n_a=1.5$ ،  $n_b=1.8$ ،  $d_a=5\lambda_0/(4n_a)$ ،  $d_b=5\lambda_0/(4n_b)$  و  $L=10.1 \text{ mm}$ ، بر حسب (الف) طول موج، (ب) نسبت  $\lambda/\lambda_0$ ، (ج) قسمتی از بازه‌ی قسمت (الف)، (د) قسمتی از بازه‌ی قسمت (الف)، (ه) - قسمتی از بازه‌ی قسمت (د) ..... ۴۱

شکل ۳-۱۶- بازتاب از ساختار شبه کانتور  $n=3$ ،  $\lambda_0=1.55 \mu\text{m}$ ،  $n_a=2.2$ ،  $n_b=1.5$ ،  $d_a=\lambda_0/(4n_a)$ ،  $d_b=\lambda_0/(4n_b)$  و  $L=6.3 \mu\text{m}$  بر حسب (الف) طول موج، (ب) نسبت  $\lambda/\lambda_0$  ..... ۴۳

شکل ۳-۱۷- بازتاب از ساختار شبه کانتور  $n=4$ ،  $\lambda_0=1.55 \mu\text{m}$ ،  $n_a=2.2$ ،  $n_b=1.5$ ،  $d_a=\lambda_0/(4n_a)$ ،  $d_b=\lambda_0/(4n_b)$  و  $L=19.3 \mu\text{m}$  بر حسب (الف) طول موج، (ب) نسبت  $\lambda/\lambda_0$  ..... ۴۳

شکل ۳-۱۸- بازتاب از ساختار شبه کانتور،  $n=5$ ،  $\lambda_0=1.55 \mu\text{m}$ ،  $n_a=1.7$ ،  $n_b=1.5$ ،  $d_a=\lambda_0/(4n_a)$ ،  $d_b=\lambda_0/(4n_b)$  و  $L=61.8$  بر حسب (الف) طول موج، (ب) نسبت  $\lambda/\lambda_0$ ، (ج) قسمتی از بازه‌ی قسمت (ب) ..... ۴۴

شکل ۳-۱۹- بازتاب از ساختار شبه کانتور  $n=8$ ،  $\lambda_0=1.55 \mu\text{m}$ ،  $n_a=1.52$ ،  $n_b=1.5$ ،  $d_a=\lambda_0/(4n_a)$ ،  $d_b=\lambda_0/(4n_b)$  و  $L=1.7 \text{ mm}$  بر حسب (الف) طول موج، (ب) قسمتی از بازه‌ی قسمت (الف)، (ج) قسمتی از بازه‌ی قسمت (ب)، (د) نسبت  $\lambda/\lambda_0$ ، (ه) قسمتی از بازه‌ی قسمت (د)، (ز) قسمتی از بازه‌ی قسمت (ه) ..... ۴۷

شکل ۴-۱- طیف بازتاب  $FC(3,50)$  در پنجره‌ای با طول  $200 \text{ nm}$ ، ابعاد ساختار  $d_a=0.75 \mu\text{m}$  و  $d_b=2.0 \mu\text{m}$  و  $L=4.93 \text{ mm}$  و ضریب شکست لایه‌ها  $n_a=1.7$  و  $n_b=1.5$  فرض شده‌است. (ب) دو باند بزرگنمایی شده از قسمت (الف) ..... ۵۱

شکل ۴-۲- طیف بازتاب  $FC(4,25)$  در پنجره‌ای با طول  $32 \text{ nm}$ ، ابعاد ساختار  $d_a=1.5 \mu\text{m}$  و  $d_b=2.0 \mu\text{m}$  و  $L=31 \text{ mm}$  و ضریب شکست لایه‌ها  $n_a=1.7$  و  $n_b=1.5$  فرض شده‌است. (ب) بخش مرکزی طیف که روی دو باند بزرگنمایی شده‌است ..... ۵۳

شکل ۴-۳- طیف بازتاب  $FC(5,10)$  در پنجره‌ای با طول  $60 \text{ nm}$ ، ابعاد ساختار  $d_a=1.5 \mu\text{m}$  و  $d_b=2.5 \mu\text{m}$  و  $L=24.7 \text{ mm}$  و ضریب شکست لایه‌ها  $n_a=1.7$  و  $n_b=1.5$  فرض شده‌است. (ب) بخشی از طیف که روی دو باند بزرگنمایی شده‌است ..... ۵۴

شکل ۴-۴- (الف) طیف بازتاب از دو ساختار  $FC(4,25)$  سری شده به‌عنوان فیلتر DWDM، پارامترهای طراحی:  $d_{a1}=2.4 \mu\text{m}$ ،  $d_{a2}=2.97 \mu\text{m}$ ،  $d_b=2.4 \mu\text{m}$ ،  $n_a=1.75$ ،  $n_b=1.6$ ،  $\Delta\lambda \approx 0.11 \text{ nm}$  (at -3 dB)، (ب) بخش مرکزی طیف بازتاب که در محدوده دو باند بزرگنمایی شده است ..... ۵۹

شکل ۴-۵- (الف) طیف بازتاب از دو ساختار  $FC(4,25)$  سری اپودایز شده توسط معادله (۴-۵)، پارامترهای ساختار  $d_{a1}=2.4 \mu\text{m}$ ،  $d_{a2}=2.97 \mu\text{m}$ ،  $d_b=2.4 \mu\text{m}$ ،  $n_0=1.3$ ،  $\Delta n_a=0.45$ ،  $\Delta n_b=0.3$ ،  $\sigma=0.3$ ،  $h=1.5$ ،  $\Delta\lambda \approx 0.1 \text{ nm}$  (ب) بخش مرکزی طیف بازتاب که در محدوده دو باند بزرگنمایی شده است ..... ۶۱

شکل ۴-۶- دو طبقه دی‌اینترلیور سری باهم که یک دسته کانال را به چهار دسته کانال با فاصله کانالها چهار برابر تبدیل کرده است ..... ۶۱

شکل ۴-۷- اینترلیور- دی اینترلیور نوری با استفاده از سیرکولاتور نوری و ساختارهای شبه پریودیک  
 $FC(4,n)$ ..... ۶۲

شکل ۴-۸- (الف) نمای سطح مقطع عرضی موجبر پیشنهادی، لایه فعال بین دو لایه  $SiO_2$  قرار گرفته و  
 کل ساختار روی زیرپایه Si بنا شده است. (ب) نمای سه بعدی موجبر..... ۶۳

شکل ۵-۱- (الف) یک زیر مجموعه کامل از طیف بازتاب ساختار  $FC(3,50)$  با پارامترهای؛  $\lambda_0=1550nm$   
 ،  $n_a=1.6$  ،  $n_b=1.75$  ،  $d_a=7\lambda_0/4n_a=1.7\mu m$  ،  $d_b=7\lambda_0/4n_b=1.7\mu m$  ،  $L=4.2mm$  و  $FSR\approx 9nm$  (ب)  
 بخش مرکزی طیف که برای وضوح بیشتر بزرگنمایی شده است. (ج) بازتاب، (د) فاز، (ه) تأخیر گروه و  
 (و) پاشندگی برای باند سمت چپ باند مرکزی. (ز) بازتاب، (ح) فاز، (ط) تأخیر گروه و (ی) پاشندگی  
 برای باند مرکزی. (ک) بازتاب، (ل) فاز، (م) تأخیر گروه و (ن) پاشندگی برای باند سمت راست باند  
 مرکزی..... ۷۲

شکل ۵-۲- (الف) طیف بازتاب  $FC(4,35)$  در یک گستره معین از طول موجهای پنجره C پارامترها به-  
 صورت  $\lambda_0=1550nm$  ،  $n_a=1.6$  ،  $n_b=1.75$  ،  $d_a=\lambda_0/4n_a=242nm$  ،  $d_b=\lambda_0/4n_b=221nm$  ،  $L=9.35mm$  و  
 $FSR\approx 2.5nm$  هستند. (ب) مرکز طیف که بزرگنمایی شده است..... ۷۳

شکل ۵-۳- (الف) طیف بازتاب و (ب) تأخیر گروه، برای ساختار  $FC(3,50)$  چرپ شده، پارامترها به صورت  
 $\lambda_0=1550nm$  ،  $n_a=1.6$  ،  $n_b=1.75$  ،  $d_{a0}=7\lambda_0/4n_a=1.7\mu m$  ،  $d_{b0}=7\lambda_0/4n_b=1.55\mu m$  ،  $L=4.2mm$   
 و  $\alpha=-1$  ،  $FSR\approx 9nm$  و  $\beta=1000$ ..... ۷۵

شکل ۵-۴- (الف) طیف بازتاب و (ب) تأخیر گروه، برای ساختار  $FC(3,50)$  چرپ و اپودایز شده، پارامترها  
 به صورت  $\lambda_0=1550nm$  ،  $n_a=1.6$  ،  $n_b=1.75$  ،  $n_0=1.4$  ،  $\Delta n_a=0.2$  ،  $\Delta n_b=0.35$  ،  $d_{a0}=7\lambda_0/4n_a=1.7\mu m$   
 و  $FSR\approx 9nm$  ،  $L=4.2mm$  ،  $d_{b0}=7\lambda_0/4n_b=1.55\mu m$  ،  $\alpha=-1$  ،  $\beta=1000$  ،  $\sigma=0.25$  و  $h=1$  هستند..... ۷۶

شکل ۵-۵- (الف) طیف بازتاب و (ب) تأخیر گروه، برای ساختار  $FC(4,35)$  چرپ و اپودایز شده، پارامترها  
 به صورت  $\lambda_0=1550nm$  ،  $n_a=1.6$  ،  $n_b=1.75$  ،  $n_0=1.4$  ،  $\Delta n_a=0.2$  ،  $\Delta n_b=0.35$  ،  $d_{a0}=\lambda_0/4n_{a0}=242nm$   
 و  $FSR\approx 2.5nm$  ،  $L=9.53mm$  ،  $d_{b0}=\lambda_0/4n_{b0}=221nm$  ،  $\alpha=-1$  ،  $\beta=4000$  ،  $\sigma=0.25$  و  $h=1$  هستند..... ۷۷

شکل ۵-۶- (الف) طیف بازتاب و (ب) تأخیر گروه، برای ساختار  $FC(4,55)$  چرپ و اپودایز شده، پارامترها  
 به صورت  $\lambda_0=1550nm$  ،  $n_a=1.6$  ،  $n_b=1.75$  ،  $n_0=1.4$  ،  $\Delta n_a=0.2$  ،  $\Delta n_b=0.35$  ،  $d_{a0}=\lambda_0/4n_{a0}=242nm$   
 و  $FSR\approx 1nm$  ،  $L=36.92mm$  ،  $d_{b0}=\lambda_0/4n_{b0}=221nm$  ،  $\alpha=-1$  ،  $\beta=4000$  ،  $\sigma=0.25$  و  $h=1$  هستند. (ج) شکل  
 بازتاب و (د) تأخیر گروه برای باند مرکزی..... ۸۰

شکل ۵-۷- (الف) طیف بازتاب و (ب) تأخیر گروه، برای ساختار  $FC(4,35)$  چرپ و اپودایز شده، پارامترها  
 به صورت  $\lambda_0=1550nm$  ،  $n_a=1.6$  ،  $n_b=1.75$  ،  $n_0=1.4$  ،  $\Delta n_a=0.2$  ،  $\Delta n_b=0.35$  ،  $d_{a0}=3\lambda_0/4n_{a0}=726nm$  ،