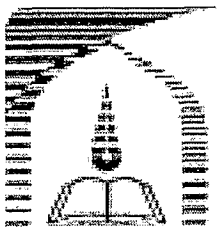
٨٧/١/١٠٨٥٥٨
٨٨/١/٣٠
٣٩٠

بسم الله الرحمن الرحيم

١١٠٠١٦

۸۷/۱/۱۰۸۵۵۸
۸۸/۱/۳۰



دانشگاه تربیت مدرّس
دانشکده فنی و مهندسی

رساله دوره دکتری مهندسی برق–الکترونیک

مدل‌سازی و تحلیل انتشار پالس‌های پیکو ثانیه در تقویت‌کننده‌های نوری نیمه‌هادی

محمد رزاقی

استاد راهنما:

دکتر وحید احمدی

استاد مشاور:

دکتر مایکل کانلی

۱۳۸۸ /۱/ ۱۰۸

زمستان ۱۳۸۷

۱۱۰۰۱۶

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از رساله دکتری

آقای محمد رزاقی رساله ۲۴ واحدی خود را با عنوان مدل سازی وتحلیل انتشار پالس پیکو ثانیه در تقویت کننده نوری نیمه هادی در تاریخ ۱۳۸۷/۱۰/۲۴ 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 وحید احمدی	استاد	
استاد مشاور	دکتر مایکل کانلی		
استاد ناظر	دکتر محمدکاظم مروج فرشی	استاد	
استاد ناظر	دکتر عبدالرضا نبوی لیشی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر شهرام محمد نژاد	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر علی رستمی	استاد	
نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر عبدالرضا نبوی لیشی	دانشیار	

این نسخه به عنوان نسخه نهایی پایان نامه/رساله مورد تأیید است.

امضای استاد راهنما:

آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی

دانشگاه تربیت مدرس

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

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

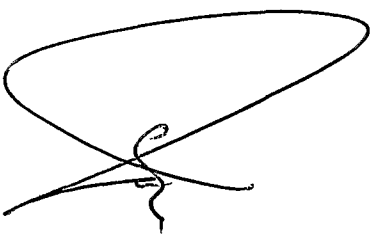
ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجوی مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

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 و یا نرم افزار و یا آثار ویژه حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین نامه های مصوب انجام شود.

ماده ٤- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته ها 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 معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ٥- این آیین‌نامه در ٥ ماده و یک تبصره در تاریخ ۸۷/٤/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/٤/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱٥ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.



آیین نامه چاپ پایان‌نامه (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 می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» 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 الکترونیک است که در سال ۱۳۸۷ در دانشکده فنی و مهندسی‌دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر وحید احمدی، مشاوره جناب آقای دکتر مایکل کانلی از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده رابه عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواندخسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده‌نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب محمد رزاقی دانشجوی رشته الکترونیک مقطع دکتری

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

نام و نام خانوادگی: محمد رزاقی

تاریخ و امضا: ۱۳۸۷/۱۱/۱

این رساله طی قرارداد شماره ۵۰۰/۸۴۸۲/ت، مورخ ۸۵/۷/۴، از طرف مرکز تحقیقات مخابرات ایران حمایت مالی شده است. بدین وسیله از همکاری مسولین آن مرکز تقدیر می‌شود.

تقدیم به:

پدر و مادر فداکارم

همسر عزیزم

و خواهران مهربانم

که زیبایی زندگی را به من هدیه کردند.

تقدیر و تشکر

بدینوسیله از زحمات اساتید بزرگواری که من را در این تحقیق راهنمایی و کمک کردند تشکر و قدردانی می‌نمایم:

استاد بزرگوار جناب آقای دکتر وحید احمدی
استاد ارجمند جناب آقای دکتر مایکل کانلی

همچنین از دوستان عزیزم آقایان **محمد حسن یاوری، احسان صعودی، محمد سروش، مهدی کیانزاد، دکتر محمد علی منصوری، دکتر غلامرضا عبایانی، دکتر کامبیز عابدی و**...که در مدت تحصیل, مشوق بنده بودند کمال تشکر را دارم.

سوگند نامه دانش آموختگان دانشگاه تربیت مدرس

بسم الله الرحمن الرحیم

کُونُوا رَبّانییّنَ بما کُنتُم تُعلِمونَ الکتابَ و بما کُنتُم تَدرُسُون

اکنون که با عنایات و الطاف بیکران الهی و با بهره مندی از نعمتهای بیشمار او تحصیلاتم را در این دانشگاه به پایان برده ام و در آستانه مرحله جدیدی از ایفای وظیفه خطیر علمی قرار دارم، در برابر قرآن کریم، به خداوند قادر متعال که بر پیدا و پنهان آگاه است، سوگند یاد می کنم که همواره در عمل به وظایف آموزشی، پژوهشی و اجتماعی در صدد کسب رضای او، تعالی انسانها و وفادار به آرمانهای والای انقلاب اسلامی و خدمتگزار ملت شریف ایران باشم و خداوند بزرگ را در همه حال، ناظر بر گفتار و کردار خود بدانم.

اللّهم انفِعنی بما علّمتَنی، و علّمِنی ما یَنفعُنی و زِدنی علماً و الحمدُلله علی کلِّ حالٍ.

۱ - علمای دین باشید به سبب آنکه کتاب تعلیم می دادید و از آن رو که درس می خواندید (آل عمران-۷۹)

۲ - اقلیتهای دینی در برابر کتاب آسمانی خود سوگند یاد کرده، دین مورد اعتقاد خود را نام می برند.

۳ - بار خدایا! مرا با دانشی که به من آموختی سودمند گردان و مرا به علمی رهنمون ساز که مرا سودمند افتد خدایا بر مراتب دانش و آگاهی من بیفزا، سپاس حقیقی در تمام حالات از آن خداوند متعال است. (آداب تعلیم و تربیت در اسلام، ص ۲۸۶).

826722005

چکیده

در این رساله، مدلی عددی مبتنی بر روش تفاضل محدود-انتشار پرتو[1] جهت مطالعه و تحلیل انتشار پالس‌های فوق‌باریک در تقویت‌کننده‌های نوری نیمه‌هادی ارائه شده است. جهت مدل‌سازی دقیق رفتار پالس‌های نوری فوق باریک از معادلات غیرخطی شرودینگر بهبود یافته استفاده شده است. این معادلات با دقت بالایی توانایی مدل‌سازی پالس‌هایی تا پهنای 100 fs را دارند. در این معادله، اثرات کلیه پدیده‌های غیرخطی شناخته شده در حوزه فمتو ثانیه، نظیر پراش سرعت گروه، تغییرات غیرخطی بهره و ضریب شکست ناشی از تخلیه حامل، پراش طیف بهره، جابه‌جایی پیک طیف بهره با تغییرات چگالی حامل، SHB[2]، جذب دو فوتونی و انکسار فوق‌سریع غیرخطی، در نظر گرفته شده است. بر اساس اطلاعات موجود، تاکنون مدل جامعی جهت بررسی اثرات پالس‌های غیرخطی برهم در محیط تقویت‌کننده نیمه‌هادی که کلیه آثار غیرخطی ذکر شده به طور همزمان در آن لحاظ شده باشد ارائه نشده است. در این رساله اثرات پالس‌های همجهت و خلاف‌جهت برهم بطور جامع و دقیق مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. پس از اطمینان از صحت مدل در ابتدا اثرات پالس‌های نسبتا پهن بر هم در حضور کلیه پدیده‌های غیرخطی مورد بررسی قرار گرفته است. با بررسی نتایج در این حالت، نشان داده شده است که توسط استفاده از پالس پمپ پر قدرتی با پهنای 4 ps در دو حالت همجهت و خلاف جهت پالس پروب با پهنای 14 ps، می‌توان در کنار تقویت پالس پروب، پهنای این پالس را به کمتر از نصف مقدار اولیه کاهش داد. همچنین در این بررسی نشان داده شده است که علاوه بر تاثیر پهنای پالس پمپ و تغییر توان پمپ بر پهنای پالس پروب خروجی، با کنترل تاخیر زمانی میان پالس‌های پمپ و پروب می‌توان روند فشرده‌سازی پروب را بهبود داد. در ادامه با کاهش پهنای پالس پروب ورودی به کمتر از 500 fs روند مشابه شبیه‌سازی تکرار شده است. نشان داده شده که پالس پمپ پر انرژی در شیوه خلاف‌جهت علاوه بر کاستن از پهنای پالس پروب به بزرگی 200 fs، حاصلضرب پهنای پالس در دو حوزه فرکانس و زمان (TBP[3]) را نیز به طور چشم‌گیری بهبود داده است؛ بطوریکه می‌توان TBP را در بعضی از موارد به‌میزان 80% مقدار اولیه آن کاهش داد. در کنار چنین خصوصیت منحصر به‌فردی پالس خروجی به خوبی تقویت‌خواهد شد. در ادامه با کاهش توان پالس پروب به 1 fJ، اثرات پالس پمپ بر آن مجددا بررسی شده است. مشاهده می‌شود که در این حالت پالس پمپ می‌تواند تغییرات دلخواهی در طیف فرکانسی پالس پروب ایجاد کند. به‌طوری‌که در بعضی حالات بیشینه مقدار طیف فرکانسی تحت تاثیر پمپ 700 GHz جابه‌جا خواهد شد. علاوه بر این، طیف فرکانسی پالس پروب خروجی تا 300 GHz فشرده می‌شود. این در حالی است که پالس پروب خروجی در این حالت به خوبی تقویت می-

[1] Finite-difference beam propagation method (FDBPM)
[2] Spectral hole burning
[3] Time-bandwidth product

شود. همچنین، روشی نوین جهت جبران‌سازی آثار متعدد غیرخطی بر پالس‌های فوق باریک چرپدار ارائه شده است. توسط این شیوه نشان داده شده که می‌توان عدم تقارن ایجاد شده توسط تاثیر فرایندهای غیرخطی را کاملا از بین برد و با متقارن کردن دوباره پالس خروجی آن را به میزان قابل توجهی تقویت کرد. در این حالت همزمان با جبران‌سازی شکل پالس در حوزه زمان، با ایجاد تغییرات در طیف فرکانسی پالس خروجی بیشینه طیف پروب تا حد 750 GHz جابه‌جا شده و به مکان اولیه‌اش بازگردانده می‌شود. علاوه بر این، پروفایل زمانی و فرکانسی پالس پروب را نیز می‌توان فشرده‌کرد. بنابراین، در این شیوه، در کنار تقویت پالس ورودی و جبران‌سازی تاثیر فرایندهای غیرخطی بر آن، می‌توان همزمان مشخصه TBP پالس خروجی را نیز بهبود بخشید.

کلید واژه: تقویت‌کننده نوری نیمه‌هادی، پالس‌های فوق باریک، معادله غیرخطی شرودینگر بهبودیافته، روش تفاضل‌محدود-انتشار پرتو

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۴-۱. لیست پارامترهای بکار رفته در شبیه‌سازی. ۵۱

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱-۱. نمودار افزایش حاصلضرب نرخ‌بیت-فاصله (BL) در بازه زمانی سال‌های ۱۸۵۰ تا ۲۰۰۰. ۳

شکل ۱-۲-۱. نمایی کلی از یک تقویت‌کننده نوری نیمه‌هادی. ۵

شکل ۲-۲-۱. نمایی کلی از ناحیه فعال تقویت‌کننده نوری نیمه‌هادی با ساختار نامتجانس دوگانه. ۱۱

شکل ۲-۲-۲. نحوه ایجاد تابش تحریکی. ۱۲

شکل ۲-۲-۳. نمودار تغییرات بهره تقویت‌کننده بازای توان‌های مختلف خروجی در جریانی برابر با ۰/۸۱ جریان آستانه. ۱۳

شکل ۲-۲-۴. نمودار نحوه وابستگی بهره به طول موج. ۱۴

شکل ۲-۴-۱. بهره و ضریب شکست محاسبه شده بر حسب فرکانس نوری برای ماده GaAs در دماها و چگالی‌های متفاوت. ۲۳

شکل ۲-۴-۲. بهره و ضریب شکست محاسبه شده بر حسب فرکانس نوری برای ماده AlGaAs در دماها و چگالی‌های متفاوت. ۲۳

شکل ۲-۴-۳. بهره و ضریب شکست بر حسب فرکانس نوری برای ماده GaAs با در نظر گرفتن اثر سوختگی طیفی ... و بدون آن ——. ۲۶

شکل ۲-۴-۴. بهره، مشتق اول و دوم آن محاسبه شده بر حسب فرکانس نوری برای ماده GaAs. ۲۹

شکل ۲-۴-۵. تغییرات بهره، مشتق اول و دوم، بر حسب چگالی حامل در فرکانس نوری داده‌شده برای ماده GaAs. ۲۹

شکل ۳-۳-۱ .طرحی کلی از روش فوریه نیم‌گام. ۳۶

شکل ۳-۴-۱. نحوه ارتباط میان مختصات جدید (u^+,u^-) و مختصات اولیه (z,T). ۴۱

شکل ۳-۴-۲. روندنمای روش تفاضل محدود- انتشار پرتو حالت غیر همسو. ۴۴

شکل ۴-۲-۱. شکل پالس خروجی بازای مقادیر مختلف بهره غیر اشباع. ۴۷

شکل ۴-۲-۲. شکل پالس خروجی در نقاط مختلف موجبر. ۴۸

شکل ۴-۲-۳. محاسبه شکل پالس خروجی توسط سه روش متفاوت مدل‌سازی. T_{FWHM} پهنای پالس ورودی است. ۴۸

شکل ۴-۲-۴. طیف پالس خروجی بازای مقادیر مختلف بهره غیر اشباع. ۴۹

شکل ۴-۲-۵. چرپ پالس خروجی بازای مقادیر مختلف بهره غیر اشباع. ۴۹

شکل ۴-۲-۶. چرپ پالس خروجی بازای مقادیر مختلف بهره غیر اشباع. ۵۰

شکل ۴-۲-۷. نمای کلی از تقویت کننده نوری نیمه‌هادی استفاده شده در آزمایش. ۵۱

شکل ۴-۲-۸. طیف ورودی وخروجی بدست آمده از آزمایش. ۵۱

شکل ۴-۲-۹. طیف پالس خروجی برای دو مدل متفاوت. ۵۲

شکل ۴-۲-۱۰. شکل پالس خروجی برای دو مدل متفاوت. ۵۲

شکل ۴-۳-۱. شکل پالس خروجی. ۵۴

شکل ۴-۳-۲. طیف پالس خروجی. ۵۴

شکل ۴-۳-۳. شکل پالس‌های خروجی پمپ، پروب و FWM. ۵۵

شکل ۴-۳-۴. شکل پالس‌های خروجی پمپ، پروب و FWM مدل DAS. توان پالس‌های پمپ، پروب و FWM به ترتیب 55 pJ ، 2.18 pJ و 0.038 pJ است. ۵۵

شکل ۴-۴-۱. نمایی کلی از سیستم. ۵۶

شکل ۴-۴-۲. (الف) شکل پالس (ب) طیف پالس، بازای مقادیر مختلف بهره غیر اشباع. ۵۷

شکل ۴-۴-۳. (الف) شکل پالس (ب) طیف پالس، بازای مقادیر مختلف بهره غیر اشباع در مدل Fernandez. ۵۸
شکل ۴-۴-۴. مقایسه میان CFP محاسبه شده پالس پروب خروجی بازای تغییرات پهنای پروب در حضور SPM (مدل Fernandez)وکلیه پدیده‌های غیر خطی (مدل ما). ۵۹
شکل ۴-۴-۵. شکل پالس خروجی پمپ و پروب. پهنای هر دو پالس ورودی 500 fs است. ۶۰
شکل ۴-۴-۶. چرپ پالس پروب خروجی در حضور کلیه پدیده‌های غیر خطی و SPM. ۶۱
شکل ۴-۴-۷. دینامیک بهره مکانی-زمانی در حضور (الف) کلیه پدیده‌های غیر خطی و(ب) SPM. ۶۲
شکل ۴-۴-۸. جابجایی بیشینه مقدار پالس خروجی بازای تغییرات طول تقویت‌کننده. ۶۳
شکل ۴-۴-۹. اثر افزایش توان پالس ورودی بر تغییرات بیشینه مقدار پالس خروجی. ۶۴
شکل ۴-۴-۱۰. شکل پالس پروب خروجی در تاخیرهای زمانی مختلف. ۶۵
شکل ۴-۴-۱۱. پهنای پالس پروب خروجی بازای تاخیر زمانی بین پالس‌های پمپ و پروب در توان‌های متفاوتی از پالس پمپ ورودی. ۶۶
شکل ۴-۴-۱۲. ضریب تقویت پالس پروب خروجی بازای تاخیر زمانی بین پالس‌های پمپ و پروب در توان‌های متفاوتی از پالس پمپ ورودی. ۶۷
شکل ۴-۴-۱۳. مقایسه مقدار پهنا و ضریب تقویت پالس پروب خروجی در دو شیوه همجهت و خلاف جهت. ۶۸
شکل ۴-۴-۱۴. پهنای پالس پروب خروجی بازای تغییرات پهنای پالس پمپ ورودی و تغییرات پارامتر چرپ پروب ورودی. ۶۹
شکل ۴-۴-۱۵. نحوه تغییرات ضریب تقویت پالس پروب خروجی بازای تغییرات پهنای پالس پمپ ورودی و تغییرات پارامتر چرپ پروب ورودی. ۷۰
شکل ۴-۴-۱۶. پهنای پالس پروب خروجی بازای انرژی پالس پمپ ورودی و تغییرات پارامتر چرپ پروب ورودی. ۷۱
شکل ۴-۴-۱۷. ضریب تقویت پالس پروب خروجی بازای انرژی پالس پمپ ورودی و تغییرات پارامتر چرپ پروب ورودی. ۷۱
شکل ۴-۴-۱۸. نحوه تغییرات TBP بازای تغییرات پهنای پالس پمپ و پارامتر چرپ پروب ورودی. ۷۲
شکل ۴-۴-۱۹. تغییرات پهنای پالس پروب خروجی بازای تغییرات زمان تاخیر در توانهای متفاوتی از پالس پمپ ورودی. ۷۲
شکل ۴-۴-۲۰. TBP بازای تغییرات زمان تاخیر در توانهای متفاوتی از پالس پمپ ورودی. ۷۳
شکل ۴-۴-۲۱. نحوه تغییرات طیف پالس پروبی بازای تغببرات انرژی پالس پمپ ورودی. ۷۴
شکل ۴-۴-۲۲. نحوه تغییرات طیف پالس پروبی بازای تغببرات پهنای پالس پمپ ورودی. ۷۵
شکل ۴-۴-۲۳. PSPS بازای تغییرات پهنای پالس پروب ورودی در Δf متفاوت ۷۶
شکل ۴-۴-۲۴. OPSC و ضریب تقویت بازای تغییرات پهنای پالس پروب ورودی در Δf متفاوت. ۷۷
شکل ۴-۴-۲۵. مقایسه نحوه تغییرات شکل پالس پروب خروجی در دو شیوه خلاف جهت و تک پالس. ۷۸
شکل ۴-۴-۲۶. مقایسه نحوه تغییرات طیف پالس پروب خروجی در دو شیوه خلاف جهت و تک پالس. ۷۸
شکل ۴-۴-۲۷. تغییرات مکان بیشینه پالس پروب خروجی بازای تغییرات انرژی پمپ ورودی در چرپ‌های متفاوتی از پالس ورودی. ۷۹
شکل ۴-۴-۲۸. ضریب تقویت پالس پروب خروجی بازای انرژی پالس پمپ ورودی در چرپ‌های متفاوتی از پالس ورودی. ۸۰

فهرست

عنوان صفحه

فصل ۱- مقدمه ۲

۱-۱- پیشگفتار ۲

۱-۲- نقش تقویت‌کننده نوری نیمه‌هادی در مخابرات نوری ۴

۱-۳- تاریخچه ۴

فصل ۲- معادلات حاکم ۱۰

۲-۱- مقدمه ۱۰

۲-۲- مدل‌سازی ساختار دو ترازه ۱۰

۲-۳- معادله نرخ تقویت‌کننده ۱۴

۲-۴- معادله شرودینگر غیرخطی بهبودیافته ۱۸

۲-۴-۱- محاسبه پذیررفتاری القا شده ناشی از حامل ۲۱

۲-۴-۲- مدل دینامیکی بهره و فاز ۲۴

۲-۴-۳- مدل پراش بهره و فاز ۲۸

فصل ۳- روش‌های حل ۳۲

۳-۱- مقدمه ۳۲

۳-۲- روش تحلیلی ۳۲

۳-۳- روش فوریه نیم گام ۳۴

۳-۴- روش تفاضل محدود-انتشار پرتو ۳۷

۳-۴-۱- حالت همجهت ۳۸

۳-۴-۲- حالت خلاف‌جهت ۳۹
فصل ۴- نتایج مدل‌سازی و تحلیل آنها ۴۶
۴-۱- مقدمه ۴۶
۴-۲- بررسی اثرات غیرخطی در حالت تک پالس ۴۶
۴-۳- بررسی اثرات غیرخطی برای پالس‌های همجهت ۵۳
۴-۴- بررسی اثرات غیرخطی برای پالس‌های خلاف‌جهت ۵۶
فصل ۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۸۲
۵-۱- نتیجه‌گیری ۸۲
۵-۲- پیشنهادات ۸۴
فهرست مراجع ۸۶
ضمیمه I- واژه نامه انگلیسی- فارسی ۹۰
ضمیمه II- واژه نامه فارسی-انگلیسی ۹۲

فصل اول

مقدمه

فصل ۱– مقدمه

۱–۱– پیشگفتار

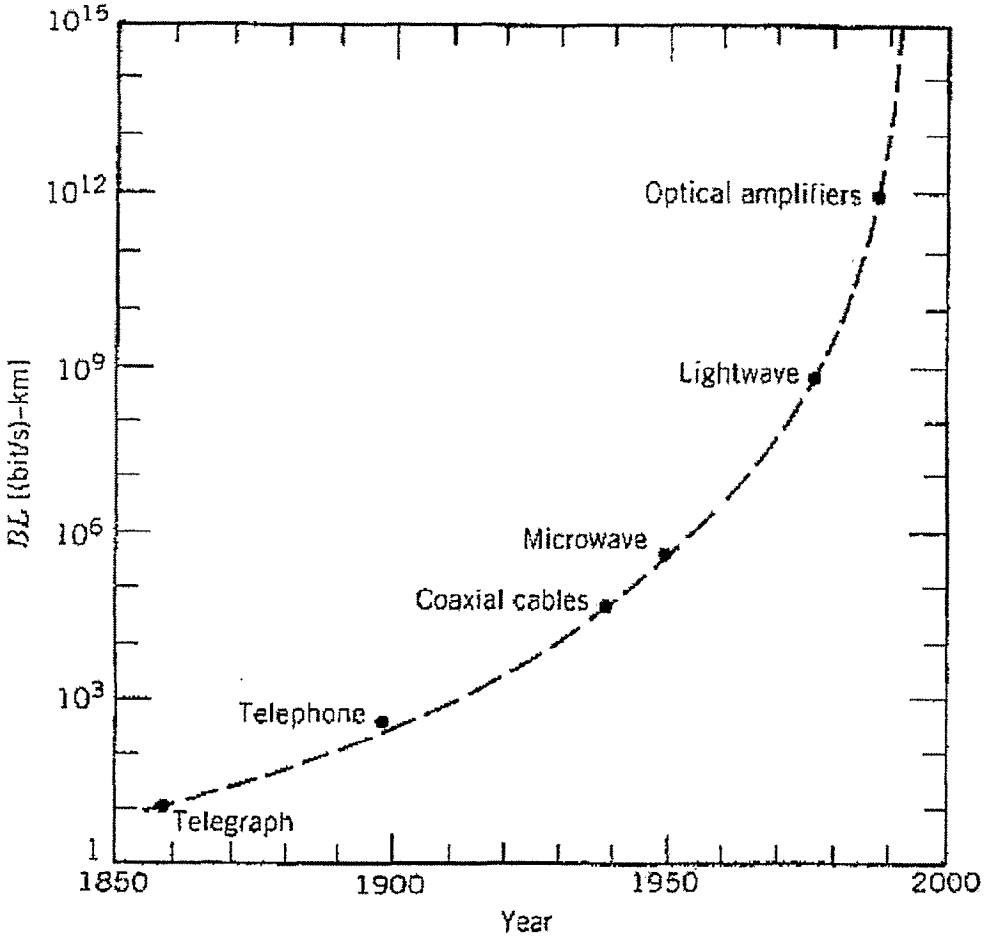
توسعه شبکه مخابراتی جهانی در قرن بیستم منجر به پیشرفت‌های شگرفی در طراحی گونه‌های متفاوتی از سیستم‌های مخابراتی شده است. در سال ۱۹۴۰، اولین سیستم مبتنی بر کابل هم‌محور[1] با نرخ بیت[2] 3 MHz مورد استفاده قرار گرفت. این سیستم توانایی انتقال ۳۰۰ کانال صدا یا یک کانل تلویزیونی را داشت. وابستگی تلفات این کابل‌ها به فرکانس باعث ایجاد محدودیت پهنای باند چنین سیستم‌هایی می‌شد. استفاده از سیستم‌هایی با کابل هم‌محور بهبود یافته توانست نرخ بیت را به 100 Mbit/s افزایش دهد. اما مشکل اساسی چنین سیستم‌هایی در کم بودن فاصله بین تکرار کننده‌ها[3] بود(1 km~). این خصیصه باعث افزایش قیمت سیستم می‌شد. فواصل تکرار کننده‌ها در سیستم‌های مخابراتی مایکروویو بطور کلی طولانی‌تر است. اما در این سیستم‌ها نرخ بیت توسط فرکانس حامل محدود می‌شود. روش معمول برای تعیین مشخصه سیستم ارتباطی استفاده از حاصلضرب نرخ بیت (B) و فاصله بین دو تکرار کننده (L) است. تا سال ۱۹۷۰ این حاصلضرب (BL) در سیستم‌های مخابراتی در حدود Mbit-km/s 100 بود.

همانطور که در شکل ۱-۱-۱ نمایش داده شده است، استفاده از نور به‌عنوان سیگنال حامل اطلاعات حاصلضرب BL را چندین مرتبه بهبود بخشید. تا سال ۱۹۵۰ هیچ خبری از منبع مناسب نوری و محیط انتقال مناسب نبود. اما در اوائل دهه ۶۰ اولین مشکل توسط اختراع لیزر حل شد. بعد از این واقعه تلاش‌های بسیاری جهت یافتن محیط انتقال مناسب صورت گرفت. فیبر نوری به نظر بهترین انتخاب می‌رسید. اما بزرگترین مشکل چنین محیطی در آن زمان تلفات بالای نوری (1000 dB/km) بود. در دهه ۱۹۷۰ این تلفات به میزان چشمگیری برای طول موج[4] 1.3 μm کاهش یافت (1 dB/km) [۱].

یکی از مشکلات اساسی سیستم‌های انتقال نوری تکرارکننده‌های نوری بود. در این قطعه سیگنال نوری ابتدا توسط آشکارسازهای نوری[5] تبدیل به سیگنال الکتریکی می‌شود. سپس عملیات پردازش روی این سیگنال الکتریکی توسط انتقال‌دهنده[6] انجام می‌گیرد، در ادامه پس از عملیات بازسازی[7] سیگنال سرانجام سیگنال نوری جدید تولید می‌گردد. چنین مدارهایی بسیار پیچیده‌اند و از سوی دیگر گران‌قیمت‌اند. محدودیت پهنای باند در این‌گونه مدارها ناشی از پاسخ سیستم الکتریکی است. با ابداع تقویت‌کننده نوری

---

[1] Coaxial cable
[2] Bit-rate
[3] Repeater
[4] Wavelength
[5] Photo-detector
[6] Transmitter
[7] Regenerate



شکل ۱-۱-۱. نمودار افزایش حاصلضرب نرخ‌بیت-فاصله (*BL*) در بازه زمانی سال‌های ۱۸۵۰ تا ۲۰۰۰ [۱].

این قطعه به‌سرعت جایگزین تکرارکننده‌ها در سیستم‌های ارتباطی نوری شد. تقویت‌کننده نوری علاوه بر ارزان بودن در مقایسه با تکرارکننده‌ها دارای پهنای‌باندی در حد THz است که باعث افزایش نرخ بیت سیستم نوری می‌شود.

یکی از مشکلات اساسی در نسل جدید سیستم‌های مخابراتی، پاشندگی فیبرهای نوری است. جهت رفع چنین مشکلی عموما از پالس‌های سالیتونی[1] استفاده می‌شود. در سال ۱۹۹۶ این ایده برای اولین بار برروی لینکی 9400 Km پیاده سازی شد [۲].

انتظار می‌رود سیستم‌های مخابراتی تمام نوری در نسل جدید شبکه‌های مخابراتی نقش بسیار فعالی را ایفا کنند. این گونه سیستم‌ها می‌توانند بر محدودیت پهنای باند که از سوی مدارهای الکتریکی به سیستم اعمال می‌شود غلبه کنند. در حال حاظر، سیستم‌های مخابراتی با ظرفیت 40 Gb/s برای هرکانال

[1] Soliton

به صورت تجاری مورد استفاده قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است این ظرفیت تا 168 Gb/s در آزمایشگاه‌های مخابراتی پیاده‌سازی شده است[۳].

۱-۲- نقش تقویت‌کننده نوری نیمه‌هادی در مخابرات نوری

افزایش روز افزون حجم اطلاعات از سویی و قابلیت‌های منحصر بفرد سیستم‌های مبتنی بر فیبر نوری از سوی دیگر از جمله دلایل اصلی در گسترش و پیشرفت قطعات نوری است. این پیشرفت‌ها خصوصا در مورد قطعاتی که تماما نوری باشند سریعتر است.

تقویت‌کننده‌های نوری نیمه‌هادی در تقابل با دیگر تقویت‌کننده‌های نوری بسیار کوچک‌اند، بعلاوه به راحتی توسط سیگنال الکتریکی تحریک[1] می‌شوند و در ضمن پهنای باند وسیعی دارند. از دیگر ویژگی‌های این گونه تقویت‌کننده‌ها می‌توان به قابلیت تنظیم بیشنه طیف بهره آن توسط تغییر میزان عناصر به کار رفته در ناحیه فعال تقویت‌کننده اشاره کرد. قابلیت یکپارچه‌سازی[2] با دیگر قطعات فعال و غیر فعال نوری از دیگر مزایای استفاده از تقویت‌کننده نوری نیمه‌هادی است. توسط این خصوصیت می‌توان به کاربردهای بسیار پیچیده‌ای دست یافت. در آخر می‌توان به قیمت مناسب چنین تقویت‌کننده‌هایی در مقایسه با دیگر گونه تقویت‌کننده‌ها اشاره کرد که به لطف تکنولوژی جدید ساخت فراهم شده است.

نمای کلی از تقویت‌کننده نیمه‌هادی در شکل ۱-۲-۱ نمایش داده شده است. بطور معمول از این قطعه به عنوان تقویت‌کننده‌های خطی در سیستم‌های انتقال استفاده می‌شود. اما ازآنجا که رفتار این گونه از تقویت‌کننده تحت تاثیر عوامل غیرخطی بیشماری است می‌توان از این قطعه جهت کاربردهای غیر خطی نظیر سویچنگ، تغییر طول موج و عملیات منطقی استفاده کرد.

۱-۳- تاریخچه

پدیده‌هایی که در بازه زمانی بسیار کوتاهی در موجبر نیمه‌هادی فعال اتفاق می‌افتد، نه تنها پیامدهای بسیار مهمی برای برخی از ادوات نوری دارد، بلکه درک ماهیت چنین پدیده‌هایی به خودی خود هم دارای جذابیت قابل توجهی است. اصولا در چنین مواردی هدف یافتن نحوه پاسخ موجبر به تحریک نوری است، به عبارت دیگر بررسی چگونگی تغییرات بهره و ضریب شکست موجبر با زمان است. این اطلاعات منجر به پیدایش لیزرهای نیمه‌هادی فوق سریع [۴, ۵] ونیز ادوات جدیدی برای پردازش سیگنال تماما نوری شد. مبدل‌های فرکانس[۶]، دمالتی‌پلکسرها [۷, ۸]و جبران‌سازهای پاشندگی[۹] مثال‌هایی از ادواتی از این دست هستند.

---

[1] Pump
[2] Integration