به نام خدا

بررسی و شبیه سازی تقویت کننده نوری نیمه هادی از نوع Index-Guided

به وسیله‌ی:

نوید نهضتی

پایان نامه
ارائه شده به معاونت تحصیلات تکمیلی به عنوان بخشی
از فعالیت های تحصیلی لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

۱۳۸۱ /۹/ ۳۰

در رشته‌ی:

الکترونیک

از دانشگاه شیراز

شیراز

جمهوری اسلامی ایران

ارزیابی شده توسط کمیته پایان نامه با درجه: عالی

دکتر علیرضا ذوالقدر اصلی استادیار بخش برق.....

دکتر حبیب الله عبیری دانشیار بخش برق.....

دکتر حمید نادگران استاد یار بخش فیزیک.....

شهریور ماه ۱۳۸۱

۴۲۶۵۲

تقدیم به :

روح والای دکتر ادیبی

٤٢٦٠٢

سپاسگزاری

لازم می دانم از زحمات و کمکهای استاد ارجمند دکتر علیرضا ذوالقدر اصلی که راهنمایی اینجانب در طول انجام پایان نامه را بر عهده داشتند تشکر نمایم. همچنین سپاسگزار استاد دکتر عبیری که مشاوره اینجانب بر عهده ایشان بود، می باشم. همچنین قدردانی می نمایم از زحمات استاد ارجمند بخش فیزیک, دکتر نادگران که با دقت پایان نامه را مطالعه نمودند. در پایان از تمامی دوستان و همدوره ایها که خاطرات خوشی را در این چند سال برجای گذاردند تشکر و قدردانی می نمایم .

چکیده

بررسی و شبیه سازی تقویت کننده نوری نیمه هادی از نوع Index-Guided

به وسیله‌ی:

نوید نهضتی

هدف از این پایان نامه بررسی ویژگیها و شبیه سازی تقویت کننده نوری نیمه هادی با ساختار Index-Guided و از نوع T.W.A. می باشد. با افزایش چشمگیر کار برد نور به ویژه در مخابرات نوری استفاده از قطعاتی همچون تقویت کننده های نوری هرروز گسترش می یابد. این قطعات دارای نقش مهمی در مخابرات فواصل دور (که تکرار کننده مورد نیاز است) می باشند. یکی از متداولترین و بهترین نوع تقویت کننده های نوری تقویت کننده نوری با ساختار B.H. می باشد که در این پایان نامه شبیه سازی شده است. شبیه سازی یکی از مراحل ساخت و تولید هر قطعه می باشد که باعث بررسی قطعه قبل از ساخت و لذا بهینه شدن قطعه می گردد.

در این پایان نامه ابتدا روابط و ویژگیهای مرتبط با تقویت کننده های نوری نیمه هادی که جهت شبیه سازی مورد نیازند ارائه می گردد. سپس با استفاده از برنامه شبیه سازی نوشته شده معادلات ریت (که معادلات اصلی حاکم بر تقویت کننده های نوری نیمه هادی می باشند.) حل گشته و پارامترهای مورد نیاز مانند: بهره،توان خروجی اشباع،توان خروجی نویز،پهنای باندو....بدست می آیند. برنامه نوشته شده همه منظوره بوده و قابلیت تحلیل تقویت کننده های نوری مختلف را دارد و می توان تغییرات متغیرهای خروجی را بر حسب تغییرات پارامترهای تقویت کننده بدست آورد. ویژگیهای برنامه نوشته شده به تفصیل در پایان نامه ارائه شده است.

همچنین در این پایان نامه روشی جهت محاسبه توان نویز خروجی با دقت بالا ارائه گردیده است. در این روش طیف انتشار خودبخودی که عامل ایجاد نویز است به چندین کانال تقسیم می شود. با این کار می توان تقویت فوتونهای نویز و تأثیر آنها بر چگالی حاملها که پارامتر

مهمی در تقویت کننده نوری می‌باشد را محاسبه نمود. به این ترتیب معادلات ریت شکل کاملتری می یابند که حل آنها منجر به جوابهایی دقیقتر می شود. در انتها با استفاده از توان نویز هر کانال می‌توان توان نویز کل خروجی و توان نویزی که در هر کانال سیگنال کوپل می‌شود ر بدست آورد.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
چکیده	ت
فهرست شکلها	د
فصل اول: مقدمه	۱
۱-۱-کاربرد نور در الکترونیک	۱
۱-۲- سیستم مخابرات نوری	۳
۱-۳-فیبرهای تقویت کننده	۵
۱-٤-تقویت کننده های نوری نیمه هادی	٦
۱-۵- ساختار	۷
فصل دوم: روابط فیزیکی	۱۲
۲-۱-مقدمه	۱۲
۲-۲-واکنش بین فوتون و ماده	۱۲
۲-۲-۱-انتشار خودبخودی	۱٤
۲-۲-۲-جذب	۱۵
۲-۲-۳-انتشار القایی	۱۵
۲-۲-٤-بهره نوری	۱۷

۲-۲-۵-شرط ایجاد لیزر	۱۸
۲-۳-نیمه هادی	۲۰
۲-۳-۱-الکترونها در کریستال	۲۰
۲-۳-۲-چگالی حاملها	۲۲
۲-۳-۳-جریان در نیمه هادی	۲٤
۲-۳-٤-پیوند p-n	۲۵
۲-۳-۵-تغییرات بندگپ	۲۸
۲-۳-٦-معادلات حاکم بر نیمه هادی	۳۰
۲-٤-ویژگیهای نوری نیمه هادی	۳۰
۲-٤-۱-بازترکیب	۳۱
۲-٤-۲-بهره و تلفات	۳۵
۲-۵-روابط نوری	۳۸
فصل سوم: تقویت کننده های نوری نیمه هادی	٤۱
۳-۱-مقدمه	٤۱
۳-۲-بهره	٤۱
۳-۳-اشباع	٤٤
۳-٤-پهنای باند	٤٦
۳-۵-نویز	٤۹
۳-٦-معادلات ریت	۵۱
۳-۷-حل معادلات	۵۳

۳-۸-ساختار تقویت کننده های نوری ۵۵

فصل چهارم: شبیه سازی و نتایج ۵۷

٤-۱-روش شبیه سازی ۵۷

٤-۲-برنامه شبیه سازی ٦۰

٤-۲-۱-قابلیتهای برنامه ٦۰

٤-۲-۲-معادلات مورد استفاده در برنامه ٦۱

٤-۳-نتایج ٦۳

٤-۳-۱-تغییر متغیرهای خروجی در طول تقویت کننده ٦۳

٤-۳-۲-تغییرات متغیرهای خروجی نسبت به متغیرهای ورودی ٦۸

٤-۳-۳-تغییر خروجی بر حسب طول موج ۷۳

٤-٤-نتیجه گیری و پیشنهادات ۷٦

مراجع ۷۷

فهرست شکلها

عنوان	صفحه
شکل (۱-۱) تلفات فیبر نوری	۳
شکل (۱-۲) سیستم مخابرات فیبر نوری	۴
شکل (۱-۳) بهره بر حسب طول موج	۷
شکل (۱-۴) ساختار تقویت کننده	۸
شکل (۱-۵) اتصال Double-HeteroStrucyure	۹
شکل (۱-۶) ساختار Gain-Guided و Index-Guided	۱۰
شکل (۲-۱) پدیده های انتشاری حاصل از برهمکنش فوتون و اتم	۱۴
شکل (۲-۲) مدل سه سطحی ترازهای انرژی	۱۹
شکل (۲-۳) نمودار انرژی بر حسب اندازه حرکت	۲۱
شکل (۲-۴) انرژی دیاگرام اتصال p-n	۲۷
شکل (۲-۵) دیاگرام انرژی ساختار Double HeteroStructure	۲۸
شکل (۲-۶) نمودار انرژی ترازهای هدایت و ظرفیت	۲۹
شکل (۲-۷) ترازهای انرژی در باند ظرفیت و هدایت	۳۲
شکل (۲-۸) طیف انتشار خودبخودی	۳۳
شکل (۲-۹) ناحیه فعال و ضریب محدودیت	۳۹
شکل (۳-۱) نمودار بهره بر حسب توان خروجی	۴۴
شکل (۳-۲) اشباع در تقویت کننده های F.P. و T.W.A.	۴۵
شکل (۳-۳) طیف بهره F.P.	۴۶
شکل (۳-۴) دیاگرام انرژی بر حسب ممنتم	۴۷
شکل (۳-۵) طیف بهره برای نیمه هادی InGaAsP	۴۹
شکل (۳-۶) مش بندی در طول تقویت کننده	۵۴
شکل (۳-۷) ساختار Buried Hetero Structure	۵۵
شکل(۴-۱) تغییرات چگالی حاملها (n) بر حسب فاصله	۶۳
شکل(۴-۲) تغییرات چگالی حاملها بر حسب طول با استفاده از مرجع [۵]	۶۴

شکل(۴-۳) تغییرات لگاریتمی چگالی فوتون در طول تقویت کننده ۶۴
شکل(۴-۴) تغییرات خطی چگالی فوتونها در طول ۶۵
شکل(۴-۵) تغییرات چگالی فوتونها بر حسب طول با استفاده از مرجع [۵] ۶۵
شکل (۴-۶) تغییرات چگالی فوتونهای Spontaneous بر حسب طول ۶۶
شکل (۴-۷) چگالی حاملها بر حسب طول برای InP ۶۷
شکل (۴-۸) تغییرات چگال فوتون بر حسب طول برای InP ۶۷
شکل(۴-۹) تغییرات توان خروجی بر حسب جریان ۶۹
شکل(۴-۱۰) تغییرات چگالی فوتونهای خودبخودی بر حسب جریان ۶۹
شکل(۴-۱۱) تغییرات توان خروجی بر حسب طول قطعه ۷۰
شکل (۴-۱۲) منحنی بهره بر حسب توان ۷۱
شکل(۴-۱۳) منحنی توان خروجی بر حسب توان ورودی ۷۱
شکل(۴-۱۴) تغییرات بهره بر حسب توان ورودی برای نیمه هادی InP ۷۲
شکل(۴-۱۵) خروجی توان نویز بر حسب توان ورودی برای نیمه هادی GaAs ۷۲
شکل(۴-۱۶) تغییرات ضریب بهره بر حسب انرژی فوتون ۷۴
شکل(۴-۱۷) تغییرات ضریب تلفات بر حسب طول موج (انرژی فوتون) ۷۴
شکل (۴-۱۸) تغییرات نرخ انتشار خودبخودی بر حسب طول موج (انرژی فوتون) ۷۵
شکل(۴-۱۹) تغییرات توان خروجی بر حسب طول موج (پهنای باند) ۷۵

مرکز اطلاعات علمی آزمایشگاهی ایران

فصل اول
مقدمه

۱-۱-کاربرد نور در الکترونیک

با اختراع لیزرهای نیمه هادی در سال ۱۹٦۲ نور وارد دنیای الکترونیک گردید. از آن تاریخ تا کنون ساخت لیزرهای نیمه هادی و یا همان لیزر های دیودی پیشرفت بسیاری نموده است و قطعه ای که در ابتدا در آزمایشگاه و در دمای بسیار پایین قابل استفاده بود، هم اکنون با قیمت بسیار پایین حتی در اسباب بازیها نیز یافت می شود. کابردهای نور در الکترونیک را می توان به چهار قسمت کلی تقسیم نمود:

۱- مخابرات نوری

۲- پردازنده های نوری

۳- حافظه های نوری

٤- سنسورهای نوری

به غیر از مخابرات نوری که با تفصیل بیشتری در مورد آن صحبت خواهد شد، توضیح کوتاهی در مورد بقیه کاربردها ارائه می شود. تحقیقات در زمینه پردازنده های نوری که در ابتدا تصور می شد انقلابی در زمینه پردازش دیجیتال ایجاد کنند، به دستاوردهای قابل توجهی منتهی نشد و به نظر می رسد که پردازنده های نوری نتوانند با پردازنده های معمول الکترونیکی به رقابت بپردازند. حافظه های نوری از جمله کاربردهایی از نور می باشد که برتریهایی نسبت به حافظه های معمول الکترونیکی دارد. به عنوان مثال چگالی ذخیره اطلاعات در حافظه های نوری که دیسکهای فشرده نوری (CD) از نمونه های آن می باشد، تقریبا ۲۰

برابر حافظه های RAM است. سنسورهای نوری نیز دارای کاربردهای بسیاری در شاخه های مختلف صنعت می باشند. از آنجا که تولید و تشخیص نور توسط قطعات الکترونیکی مانند LED و Photo Diode به سادگی میسر است، می توان سنسورهای مختلفی برای اندازه گیریهای ابعاد و ساختار اجسام و انجام تستهای غیر مخرب ساخت. اما مخابرات نوری یکی از زمینه هایی است، که برتری آن نسبت به سیستمهای مخابرات رادیویی به اثبات رسیده و کاربرد و تحقیق در این زمینه به سرعت در حال پیشرفت می باشد. مزایای زیر را می توان در مقایسه بین مخابرات فیبرنوری و مخابرات کابلی بر شمرد:

۱- پهنای باند بسیار زیاد.

۲- تلفات بسیار کم فیبرهای نوری

۳- نداشتن تداخل با امواج الکترومغناطیسی

٤- سبکی فیبر و راحتی نصب آن

٥- عدم همشنوایی بین فیبرهای مجاور هم

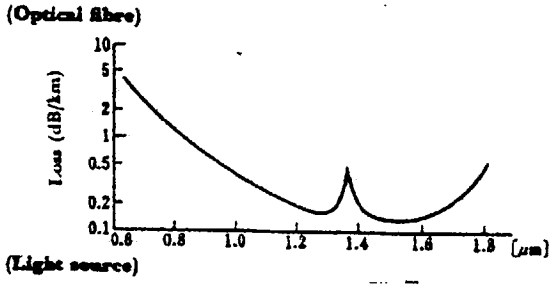
٦- قیمت ارزانتر فیبر و کل سیستم

با توجه به اینکه فرکانس نور مرئی در حدود 10^{14} Hz می باشد، پهنای باند گسترده ای را می توان تصور نمود. همچنین در یک فیبر نوری می توان چندین کانال را که هر کدام دارای پهنای باندی از مرتبه گیگا هرتز می باشند، به صورت WDM (Wavelength Division Multiplexing) منتقل نمود.

فیبر نوری نیز مانند هر محیط واسطه ای باعث تضعیف نور می گردد. امادر طول موجهای خاص مانند 1.55μm این تلفات به کمتر از 0.2db بر کیلومتر می رسد. این امر باعث می شود که در مسافتهای طولانی تکرار کننده های کمتری مورد نیاز باشد و به این ترتیب سیستم اقتصادی تر است. در شکل(۱-۱) تلفات فیبر برحسب طول موج قابل مشاهده است.

از آنجا که امواج الکترو مغناطیسی تأثیری بر روی نور ندارند، می توان از نور در محیطهای صنعتی که امواج الکترومغناطیسی قوی توسط موتورهای الکتریکی ایجاد می شود، برای انتقال اطلاعات استفاده نمود. همچنین امکان شنود فیبرهای نوری غیر ممکن است، در صورتیکه کابلهای مسی به راحتی قابل شنود می باشند.

ماده اولیه فیبرهای نوری سیلیکون است که از مس سبکتر بوده و حمل ونقل آن آسانتراست. همچنین قطر فیبرهای نوری در حدود چند صد میکرو متر است، که به این ترتیب می توان تعداد زیادی فیبر را در کنار هم قرار داد و قطر کابل حاصل به طور قابل ملاحظه ای



شکل(۱-۱)[۱]-تلفات فیبر نوری برحسب طول موج

کوچک می باشد.

امواج نوری بر روی یکدیگر تأثیری ندارند. لذا تعداد زیادی فیبر می توانند در کنار هم مورد استفاده قرار بگیرند بدون اینکه همشنوایی (Cross Talk) بین آنها روی دهد.

همانطور که گفته شد ماده سازنده فیبرهای نوری سیلیکون است که منبع آن ماسه است که به وفور و ارزانی در همه جا یافت می شود. لذا قیمت پایینتری نسبت به کابلهای مسی که ماده گرانتری نسبت به سیلیکون است، دارند. همچنین همانطور که بعداً اشاره خواهد شد بقیه ملزومات سیستم نیز قطعاتی نسبتاً ارزان می باشند، که باعث می شود سیستم با قیمت پایینتری تهیه شود.

۱-۲-سیستم مخابرات نوری

همانطور که اشاره شد، به خاطر مزیتهایی که مخابرات نوری داراست استفاده از آن از سال 1985 به طور گسترده از مخابرات مسافتهای بسیار زیاد (بین قاره ای) گرفته تا شبکه های LAN در حال گسترش می باشد. به طور کلی سیستم مخابره نوری را از لحاظ محیط انتقال به دو دسته می توان تقسیم نمود: ۱ - انتشار در فضای آزاد ۲ - انتشار در فیبر نوری.

ساده ترین نوع ارسال اطلاعات توسط نور، انتشار نور در فضای آزاد می باشد. در این حال نور از منبع نور جدا شده و پس از انتشار در هوا به گیرنده می رسد. از آنجا که فیبر نوری استفاده نشده است، هزینه سیستم پایینتر می باشد. اما این سیستم فقط در فواصل کم قابل استفاده است و بیشترین فاصله ای که ارسال و در یافت نور در فضای آزاد به صورت آزمایشی انجام گرفته در حدود 60km می باشد[۱] در این روش فرستنده و گیرنده باید

دارای دید مستقیم باشند. همچنین در گیرنده احتیاج به یک آیینه مقعر می باشد تا نور پخش شده را در نقطه ای متمرکز نماید. به علاوه مسیر نور باید عاری از اشیاء خارجی بوده و نورهای محیط نیز به گونه ای فیلتر گردد. در این نوع ارسال برای اینکه نور در فضا پخش نشود حتما باید از منبع لیزری استفاده نمود. با توجه به مشکلات بیان شده استفاده از فضای آزاد برای انتقال نوری اطلاعات محدود به فواصل کوتاه و شرایط خاص می باشد.

اولین فیبر نوری در دهه 60 ساخته شد.[۱] اما در آن هنگام تهیه سیلیکون با خلوص بالا ممکن نبود. زیرا فیبر نوری که از سیلیکون ساخته می شد دارای ذرات ناخالصی زیادی بود که سبب تضعیف شدید نور می شد. اما در دهه 70 با تهیه سیلیکون با خلوص بالا ساخت فیبرهای کم اتلاف ممکن شد و تقریباً مخابرات نوری از آن زمان آغاز گردید.

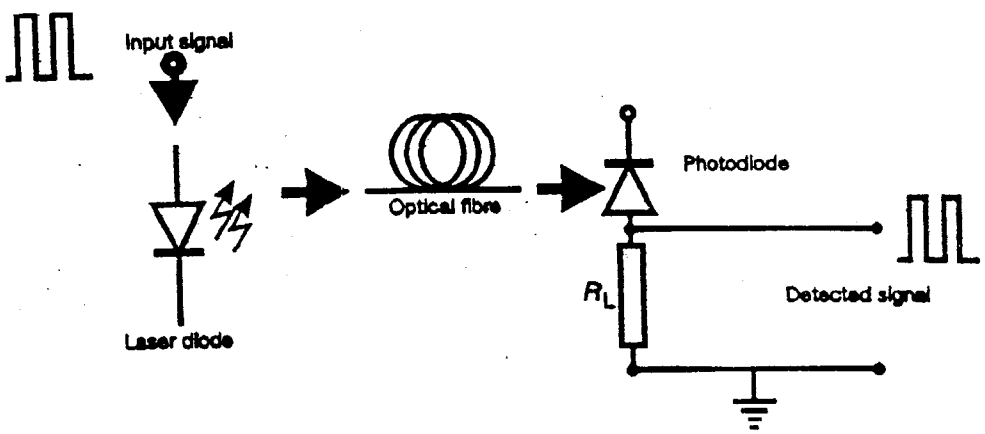
یک سیستم نوری به طور کلی از سه جزء تشکیل شده است:

۱- فرستنده که در واقع منبع نور می باشد. این منبع می تواند LED باشد که نور معمولی تولید می کند و یا می تواند دیود لیزری باشد که نور لیزر تولید می کند.

۲- محیط انتقال که همان فیبر نوری می باشد.

۳- گیرنده که یک فوتو دیود می باشد.

همانطور که ملاحظه می شود اجزاء لازم به سادگی و ارزانی قابل حصولند و لذا قیمت سیستم پایین می باشد. در شکل (۱-۲) کلیات یک سیستم مخابرات نوری مشاهده می شود.



شکل(۱-۲)[۵] ساختار سیستم مخابرات فیبر نوری

سه جزء اشاره شده در بالا حداقل ملزومات می باشند. در صورتیکه مسافت بسیار

طولانی باشد، لازم است تا افت توان نور در مسیر جبران شود. این جبران توسط تکرار کننده ها که وظیفه تقویت نور را دارند می انجامد. همچنین در گیرنده ها برای بالا بردن حساسیت گیرنده و در واقع کاهش نسبت سیگنال به نویز از تقویت کننده های نوری استفاده می شود. در سیستمهای قدیمی جهت تقویت نور، ابتدا نور را به سیگنال الکتریکی تبدیل نموده و سپس دوباره آنرا به نور تبدیل می کردند. به این ترتیب تکرار کننده دارای اجزاء نوری والکتریکی متنوعی می باشد. اما این روش در مقایسه با تقویت مستقیم نور بسیار ضعیف و گران می‌باشد. زیرا علاوه بر قطعات زیاد مورد نزوم (از فوتو دیود گرفته تا منبع نور) تکرار کننده با توجه به نوع مدولاسیون ساخته می شود و با تغییر نوع مدولاسیون دیگر قابل استفاده نمی باشد. اما در تقویت مستقیم نور، نور وارد قطعه ای واحد شده و به صورت تقویت شده از آن خارج می شود. علاوه بر سادگی و کوچکی تقویت کننده، نوع مدولاسیون تأثیری بر تقویت نور ندارد. تقویت مستقیم نور به دو شکل ممکن است :

۱- فیبرهای تقویت کننده.

۲- تقویت کننده های نیمه هادی

۱-۳-فیبر های تقویت کننده

پیدایش فیبرهای نوری تقویت کننده به اواسط دهه 60 باز می گردد که با استفاده از شیشه سیلیکونی ناخالص شده با عناصر کمیاب (مانند اربیوم) نوسان لیزری بوجود آمد. این نوع تقویت کننده ها در واقع همان فیبر نوری می باشند. که با یونهایی نظیر Er^{3+} یا Nd^{3+} ناخالص گشته اند[۱]. وجود این یونها ترازهای انرژی را فعال می کند به طوریکه با ایجاد وارونگی تقویت نور را ممکن می سازد. بهره در واحد طول فیبرهای تقویت کننده زیاد نیست وبنابراین طول زیادی از آن (در حدود 100 متر) مورد استفاده قرار می گیرد. همچنین پمپ (منبع تغذیه) استفاده شده نوری می باشد که برای این منظور از دیودهای لیزری که در طول موج پایینتری کار می کنند استفاده می شود. از مزایای فیبرهای تقویت کننده راحتی کوپل شدن آنها با فیبرهای نوری را می توان نام برد.