دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی فتونیک

عنوان:

شبیه سازی مبدل های طول موج در شبکه های مخابراتی فیبر نوری

توسط:

سعید متعبد

استاد راهنما:

دکتر سعید مظفری

شهریورسال 1388

بسم الله الرحمن الرحيم

به نام خدا

دانشگاه سمنان

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

صورتجلسه دفاعیه پایان نامه کارشناسی ارشد

پایان نامه آقای سعید متعبد برای اخذ کارشناسی ارشد مهندسی فتونیک

تحت عنوان: شبیه سازی مبدل های طول موج در شبکه های مخابراتی فیبر نوری

در جلسه مورخ ..... بررسی و با نمره ..... مورد تائید قرار گرفت.

هیئت داوران:

استاد راهنما: دکتر سعید مظفری امضاء .....

استاد داور: دکتر علی اصغر اروجی امضاء .....

استاد داور: دکتر ابراهیم عطاران کاخکی امضاء .....

مسئول تحصیلات تکمیلی: ..... امضاء .....

شبیه سازی مبدل های طول موج در شبکه های مخابراتی فیبر نوری

Simulation of wavelength converters in fiber optic communication networks

چکیده:

مبدل های طول موج یکی از اجزای اصلی شبکه های WDM (Wavelength division (multiplexed network می‌باشند. وظیفه اصلی این مبدل ها تغییر طول موج اطلاعات ارسالی یا به عبارت دیگر تغییر کانال اطلاعات ارسالی می‌باشد. در این میان مبدل های طول موجی که از SOA ها (Semiconductor optical amplifier) ها استفاده می‌کنند، یکی از بهترین گزینه ها برای تبدیل طول موج در شبکه های WDM می‌باشند. با استفاده از خواص غیر خطی SOAها، می‌توان به سه روش اصلی *بهره متقاطع*[1]، *فاز متقاطع*[2]، و *آمیختگی طول موجی*[3]، یک مبدل طول موج ساخت. در این بین، روش بهره متقاطع ساده ترین و قابل لمس ترین روش است که نتایج آزمایشگاهی قابل قبولی نیز داشته است[1]. همچنین روش فاز متقاطع بهترین روش با بهترین بازده تبدیل می‌باشد[2]. در این پایان نامه، ابتدا مروری کلی بر تقویت کننده های نیمه هادی نوری یا همان SOAها داریم. سپس بخش کوچکی به بررسی تداخل سنج های مختلف اختصاص می‌یابد که از آنها در بخش های بعدی استفاده خواهد شد. سپس مبدل های طول موج رایج امروزی که به روش Optoelectronic کار می‌کنند بررسی می‌شوند. در ادامه اصول کلی تبدیل طول موج با استفاده از مبدل های طول موج تمام نوری تشریح می‌شود. در بخش بعد سعی می‌شود که با استفاده از فرمولبندی ریاضی SOA ها مقداری اطلاعات خود را نسبت به عملکرد مبدل های طول موج تمام نوری و پارامترهای موثر بر عملکرد آنها افزایش دهیم. سپس در بخش اصلی این پایان نامه دو نوع از مبدل های طول موج تمام نوری را شبیه سازی می‌کنیم. برای این کار ابتدا

[1] Cross gain modulation
[2] Cross phase modulation
[3] Four wave mixing

به معرفی اجمالی و اصول کلی کار نرم افزار Opti system می‌پردازیم. سپس با استفاده از این نرم افزار، دو نوع مبدل طول موج که یکی به روش بهره متقاطع و دیگری به روش فاز متقاطع عمل می‌کنند را شبیه سازی می‌کنیم و در هر بخش با استفاده از این نرم افزار نتایج را بهینه سازی می‌کنیم. همچنین برای اطمینان بیشتر از نتایج بدست آمده، آنها را با نتایج یک کار آزمایشگاهی که توسط آقای Shaochun cao در سال 2003 انجام شده است، مقایسه می‌کنیم.

کلیدواژه:

مبدل طول موج، روش فاز متقاطع، روش بهره متقاطع، تقویت کننده های نوری نیمه هادی

فهرست مطالب:

مقدمه..... 1

فصل 1. مبانی تئوری مبدل های طول موج و انواع آنها..... 4

1.1. تقویت کننده‌های نیمه‌هادی نوری..... 4

1.2. تداخل‌سنج‌ها..... 8

1.2.1. تداخل‌سنج ماخ- زندر 9

1.2.2. تداخل‌سنج مایکلسون 10

1.2.3. تداخل‌سنج آیینه حلقوی غیرخطی 11

1.3. مبدل‌های طول موج Optoelectronic 14

1.4. مبدل‌های نوری طول موج به روش قطع متناوب 16

1.4.1. روش بهره متقاطع در تقویت کننده‌های نوری نیمه‌هادی 17

1.4.2. روش فاز متقاطع در تقویت کننده‌های نوری نیم‌هادی 22

1.4.3. روش آینه‌های حلقوی غیرخطی 26

1.5. مبدل‌های طول موج به روش آمیختگی طول موج‌ها 29

فصل 2. تئوری و فرمول های ریاضی شبیه سازی مبدل های طول موج 33

2.1. معادلات نرخ چگالی حامل ها 34

2.2. معادلات بهره اپتیکی و ضریب شکست نور 36

فصل3. معرفی نرم افزار Opti System 40

فصل4. طراحی و شبیه سازی مبدل های طول موج 47

4.1. شبیه سازی مبدل طول موج به روش بهره متقاطع 48

4.2. شبیه سازی مبدل طول موج به روش فاز متقاطع 56

نتیجه گیری 67

فهرست منابع 69

فهرست جداول:

جدول 4.1. مشخصات فنی SOA های بکارگرفته شده در شبیه سازی ها 58

فهرست اشکال:

1.1. برش عرضی از یک SOA که در آن ناحیه فعال توسط لایه های p-Type و n-Type محدود شده است 5

1.2. تداخل‌سنج ماخ- زندر 10

1.3. تداخل‌سنج مایکلسون 11

1.4. تداخل سنج کلاسیک سگنک 11

1.5. تداخل سنج آیینه حلقوی غیر خطی 13

1.6. اثر حفره‌های سوخته طیفی (spectral hole burning) 18

1.7. روش بهره متقاطع در تقویت کننده‌های نوری نیمه‌هادی برای تبدیل طول موج 19

1.8. نور اطلاعات و هدف از دو سوی مقابل وارد می‌شوند 20

1.9. استفاده از تداخل‌سنج نامتقارن ماخ زندر برای تبدیل طول موج 23

1.10. استفاده از تداخل‌سنج متقارن ماخ زندر برای تبدیل طول موج 24

1.11. استفاده از تداخل‌سنج مایکلسون برای تبدیل طول موج 25

1.12. روش آینه‌های حلقوی غیرخطی برای تبدیل طول موج 27

1.13. روش آینه‌های حلقوی غیرخطی برای تبدیل طول موج با استفاده از با استفاده از SOA 28

1.14.شکل کلی آمیزش چهار موج در نمودار فرکانس 30

3.1. نمای کلی نرم افزار 42

3.2. اضافه نمودن یک لیزر CW به پنجره اصلی 43

3.3. پارامتر های مختلف لیزر CW 44

3.4. نحوه اتصال دو المان به یکدیگر 45

3.5. نمای کلی یک مبدل طول موج بهره متقاطع 45

3.6. نمایش دو عدد از پنجره های visualizer 46

4.1. المانهای استفاده شده در شبیه سازی مبدل طول موج به روش XGM 48

4.2. تغییرات توان موج خروجی نسبت به توان موج ورودی. 49

4.3. نمودار تغییر توان موج خروجی نسبت به توان موج ورودی. منحنی های مختلف بر حسب تغییرات توان لیزر موج پیوسته رسم شده اند. 50

4.4. تغییرات توان نوری موج خروجی نسبت به تغییرات شدت جریان بایاس SOA. 51

4.5. سیگنال ورودی توسط یک مولد پالس گوسی در طول موج 1556nm، که معادل بیت 0000000010000 می‌باشد. 52

4.6. سیگنال تبدیل شده شکل 4.5 که اکنون در طول موج 1551nm قرار دارد. 53

4.7. یک سیگنال پله ای تصادفی در طول موج 1556nm. 54

4.8. سیگنال پله ای شکل 4.7 پس از تبدیل. طول موج کنونی سیگنال 1551nm است. 54

4.9. بزرگنمایی شکل 4.7 در محدوده 4ns الی 7ns 55

4.10. بزرگنمایی شکل 4.8 در محدوده 4ns الی 7ns 55

4.11. نمای کلی یک مبدل طول موج به روش فاز متقاطع 57

4.12. تغییرات توان خروجی نسبت به تغییرات جریان بایاس SOA2. 59

4.13. تغییرات توان خروجی نسبت به تغییرات جریان بایاس SOA2 برگرفته از مرجع 3. 60

4.14. تغییرات توان خروجی نسبت به شدت جریان بایاس SOA2. در این حالت جریان بایاس SOA1 برابر 500mAو طول کاواک ها1200µm است. سیگنال اطلاعات نیز مقدار 0 دارد. 61

4.15.تغییرات توان خروجی نسبت به تغییرات طول کاواک SOA2. در این حالت شدت جریان بایاس SOA1 ، 500mAو برای SOA2برابر 216mA فرض شده است. طول کاواک SOA1نیز 1200µm فرض شده است. 62

4.16. تغییرات توان خروجی به توان ورودی 64

4.17. سیگنال قبل از تبدیل در طول موج 1556nm 65

4.18. سیگنال بعد از تبدیل در طول موج 1551nm 65

مقدمه

با افزایش سریع ارتباطات جهانی و گستردگی روزافزون تقاضا برای آنها، خصوصاً در زمینه اینترنت، لزوم توجه به شبکه‌های مخابراتی و انواع آن، بیش از پیش مشهود است. این مسأله محققین را تشویق می‌کند که کار بر روی شبکه‌های فیبر نوری را افزایش دهند. به طور نمونه این شبکه‌ها دارای پهنای باندی حدود 50THZ (در حدّ تئوری) هستند[1]. برای استفاده از این ظرفیت، شبکه‌های DWDM (Dense Wavelength division Multiplexing) و همچنین تقویت کننده‌های نوری باید مورد استفاده قرار گیرند تا بتوان ظرفیت انتقال شبکه‌ها را تا حدّ Terabit/sec افزایش داد.

در حال حاضر، سیستم‌هایی با قابلیت حمل 128 طول موج در یک فیبر (128 کانال مخابراتی) به صورت تجاری طراحی شده و مورد استفاده قرار می‌گیرند. این در حالی است که از لحاظ تئوری این عدد می‌تواند به بیش از 1000 کانال در یک فیبر نیز افزایش یابد.

DWDMها و تقویت‌کننده‌های نوری برای مقاصدی چون سوئیچینگ و مسیریابی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این میان با گسترش شبکه‌های فیبر نوری، WLCها (Wavelength Converter) جنبه‌های جدیدی را در این زمینه به وجود آورده‌اند.

WLCها با قدرت تغییر طول موج از یک کانال مخابراتی به کانال دیگر می‌توانند اطلاعات رادر میان کانال‌های مختلف منتقل کنند. با این روش، از تداخل اطلاعات با یکدیگر جلوگیری می‌شود و ظرفیت شبکه افزایش می‌یابد[2].

مبدل‌های طول موج دارای انواع مختلفی هستند که به صورت‌های گوناگون دسته‌بندی می‌شوند. ولی جدا از نوع دسته‌بندی، می‌توان برخی از ویژگی‌های مثبت آنها را به صورت زیر نام برد:

- بازدهی تبدیل خوب
- عدم حساسیت نسبت به نوع پلاریزاسیون نور ورودی
- نسبت سیگنال به نویز بالا (SNR)
- Chirpپائین
- سرعت بالا برای تولید سیگنال خروجی
- هزینه قابل قبول

البته آنچه مسلم است تمام این ویژگی‌ها را نمی‌توان همزمان جمع کرد ولی بسته به نوع کاربرد، می‌توان از تعدادی از آنها بهره جست.

به دلیل استفادهٔ مکرر از تقویت کننده‌های نیمه‌هادی نوری و همچنین تداخل سنج‌ها در طراحی مبدل‌های طول موج، ابتدا به مرور گذرای این دو مطلب می‌پردازیم. سپس به انواع روشهای تبدیل طول موج که شامل روش اپتوالکترونیکی، روش قطع متناوب و روش ترکیب طول موجی می‌شوند، اشاره می‌کنیم.

فصل 1. مبانی تئوری مبدل های طول موج و انواع آنها

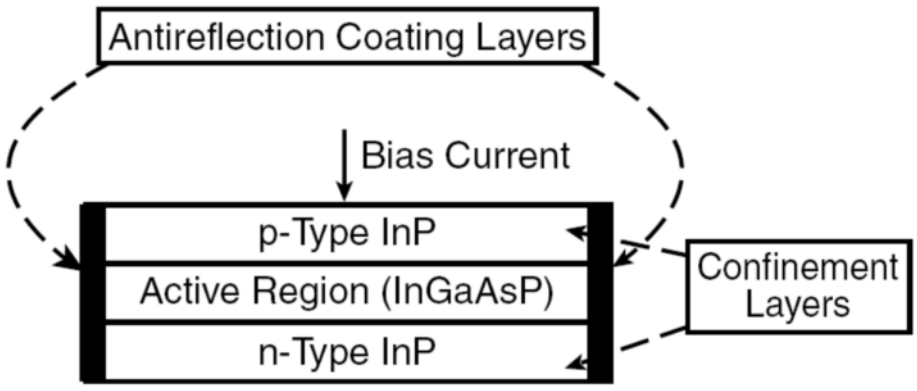
1.1. تقویت کننده‌های نیمه‌هادی نوری

Semiconductor Optical Amplifier (SOA)

تقویت کننده های نیمه هادی نوری، SOA ها به طور کلی برای تقویت سیگنال‌های نوری، در شبکه‌های مخابراتی متشکل از فیبرهای نوری به کار می‌روند. البته کاربرد آنها محدود به تقویت سیگنال نمی‌شود بلکه با استفاده از اثرات غیر خطی در آنها، برای عملیات مختلف دیگری نظیر سوئیچینگ، ترمیم سیگنال‌ها و تبدیل طول موج که مورد نظر ما است، بکار می‌روند.

SOAها از آلیاژهای عناصر گروه IIIو V (سه و پنج) نظیر گالیوم GA، ایندیم In از گروه سه و آرسنیک As و فسفر P از گروه پنج ساخته می‌شوند. برای طول موج‌های مناسب نظیر طول

موج 1300nm و 1550nm مخلوطی از آلیاژهای ایندیم گالیوم آرسنیک فسفر (InGaAsP) در ناحیه فعال به کار گرفته می‌شوند. ترکیبات گروه III و V دارای انرژی باند نوار[1] مستقیم هستند که الکترون‌ها و حفره‌ها در ناحیهٔ فعال به طور مستقیم باز ترکیب می‌شوند. ناحیه فعال به وسیلهٔ لایه‌های p-Type و n-Type محدود شده است که در شکل 1 مشاهده می‌شود. نوسان در ناحیه فعال شکل می‌گیرد. این ناحیه به گونه‌ای طراحی شده است که دارای انرژی باند نوار متناسب با طول موج مورد نظر دستگاه باشد. برای شروع کار SOA، ابتدا یک جریان خارجی شدید به ناحیه فعال تزریق می‌شود. بدین وسیله چگالی جمعیت در تراز برانگیخته بیش از چگالی در تراز پایه می‌شود و در نتیجه چگالی معکوس جمعیت[2] حاصل می‌شود. هنگامی‌که چگالی معکوس جمعیت حاصل می‌شود، ناحیه فعال به عنوان یک تقویت کنندهٔ نوری عمل می‌کند[3]. بدین ترتیب که الکترون‌های تراز برانگیخته می‌توانند با گسیل یک فوتون به تراز پایه بازگردند که چنانچه این گسیل به علّت یک تحریک خارجی باشد به گسیل القایی معروف است.



شکل1.1. برش عرضی از یک SOA که در آن ناحیه فعال توسط لایه های p-Type و n-Type محدود شده است.

[1] Direct energy gap
[2] Population inversion

چنانچه یک فوتون نوری با انرژی مناسب به یک الکترون برانگیخته برخورد کند این الکترون تحریک می‌شود که به تراز پایه بازگردد که در حین این گذار یک فوتون اضافی گسیل می‌شود؛ این فوتون دارای انرژی مشابه فوتون برخوردی اول می‌باشد. همچنین فوتون تابشی و فوتون برخوردی دارای فاز مشابه نیز هستند و به این گسیل، گسیل القایی گفته می‌شود.

برخی SOA ها مشابه لیزرهایی که بر اساس کاواک فابری پرو[3] عمل می‌کنند، طراحی و ساخته می‌شوند. در این لیزرها، نور توسط دو آیینه درون یک کاواک محدود می‌شود. همچنین عمل پمپ توسط یک جریان خارجی قوی صورت می‌گیرد تا چگالی معکوس جمعیت حاصل شود.

از آنجایی که SOA ها نیز مشابه لیزرها عمل می‌کنند برای اینکه فقط نورهای ورودی تقویت شوند، باید از اتفاق افتادن عمل لیزینگ درون SOA ها جلوگیری کرد. برای این منظور لازم است که جریان بایاس را دقیقاً در زیر آستانه لیزینگ تنظیم کرد. همچنین کریستال‌های انتهایی کاولک SOA را نیمه بازتابی[4] انتخاب کرد. به طور طبیعی ضریب انعکاس حدود 32٪ می‌باشد که می‌توان این مقدار را به وسیله افزودن لایه‌های انعکاسی و ضدانعکاسی بیشتر یا کمتر کرد. وقتی یک نور ورودی وارد کاواک می‌شود میان آیینه ها رفت و برگشت انجام می‌دهد و در هر رفت و برگشت مقداری تقویت می‌گردد و شدت آن افزایش می‌یابد تا اینکه شدت به میزان مورد نظر برسد و از کاواک خارج گردد.

[3] Fabry-Prot (FP)
[4] Partially Reflective

ساخت کاواک فابری پرو چندان مشکل‌ساز نیست. ولی وابستگی بهره[5] به دما باعث می‌گردد تا با افزایش دما مشخصات کاواک تغییر کند و در نتیجه برای بهره بردن از کاواک نیازمند دمای ثابت درون کاواک باشیم.

یک نمونه کاواک ساخته شده و آزمایش شده عبارت است از کاواکی به طول $250\mu m$ با پهنای باند $10\ GHZ$ و بهرهٔ $30dB$ با ضریب انعکاس 3%. [1]

نوع دیگری از SOA ها نیز قابل بررسی می‌باشند. در این نوع که به TWAها (Traveling Wave Amplifier) معروفند نور به جای بازتاب در انتهای کاواک به کاواک بعدی وارد می‌شود؛ بدین ترتیب که انتهای هر کاواک با لایه‌ای با ضریب انعکاس 10^{-4} پوشانده شده است. بدین ترتیب هیچ نور بازتابی درون کاواک نخواهیم داشت و نور به طور کلی وارد مرحلهٔ بعدی یا کاواک بعدی می‌گردد و در گذار از هر کاواک مقداری تقویت می‌شود. [1]

این نوع از SOAها به علت پایین بودن نویز سیگنال خروجی و توان اشباع بالای سیگنال مورد توجه می‌باشند. همچنین عدم بستگی این نوع به پلاریزاسیون نور ورودی و پهنای باندی در حدود $5THZ$ از مشخصه‌های خوب دیگر این نوع است. برای طراحی یک TWA مناسب نکات زیر مدنظر است:

1. طراحی باید برای سیگنال‌های بسیار کوچک نیز مناسب باشد که این سیگنال‌ها نیز تقویت شوند.
2. انتهای کاواک باید با لایهٔ ضدانعکاسی پوشانده شود که هرچه این لایه بهتر باشد کیفیت TWA افزایش می‌یابد.

[5] Gain

3. درون بهره باید از گسیل‌های خودبخودی هرچه بیشتر جلوگیری شود. زیرا هر فوتون خودبخودی در مراحل بعدی تقویت می‌گردد.

مشابه روش قبل، چگالی جمعیت معکوس به وسیله یک جریان خارجی به وجود می‌آید. وقتی یک سیگنال خارجی وارد ناحیهٔ فعال SOA می‌گردد، طبق رابطهٔ زیر تقویت می‌شود که در این رابطه L طول ناحیه فعال است:

معادله 1
$$G = \exp[\Gamma(g_m - \alpha)L] = \exp\,[g(z)L]$$

که در این رابطه Γ عبارت است از ضریب محدود شدن نور درون کاواک و g_m ضریب بهره ماده و α ضریب جذب ماده می‌باشد و g(z) به طول کلّی تمام عوامل را برای بهره به ازای واحد طول در بردارد[4].

1.2. تداخل‌سنج‌ها

Interferometers

تداخل‌سنج‌ها یک وسیلهٔ اپتیکی هستند که نور را به دو شاخه تقسیم می‌کنند و آنها را از دو مسیر نابرابر نوری عبور می‌دهند؛ سپس آنها را باهم ترکیب می‌کنند و هم‌افزایی (Superposition) شان را اندازه‌گیری می‌کنند. سه نوع از تداخل‌سنج‌ها در مبدّل‌های طول موج به کار می‌روند. ماخ- زندر (Mach-Zehnder)، مایکلسون (Michelson)و آیینه حلقوی غیرخطی NOLM (Nonlinear-Optical-Loop-Mirror).

1.2.1تداخل‌سنج ماخ- زندر

Mach-Zehnder Interferometer (MZI)

شکل کلّی تداخل‌سنج ماخ- زندر در شکل 2 آمده است. سیگنال نوری ورودی به وسیلهٔ یک شکافنده (Splitter) به دو شاخه تقسیم می‌شود و به درون شاخه‌های تداخل‌سنج وارد می‌گردد. پس از عبور از شاخه‌ها مجدداً باز ترکیب می‌شود و نور خروجی را تشکیل می‌دهد. اگر دو شاخه متقارن باشند و اختلافی با یکدیگر نداشته باشند، هیچ‌گونه اختلاف فازی در نور خروجی مشاهده نمی‌گردد و دو موج نوری خروجی به صورت همساز ترکیب می‌شوند. چنانچه یک اختلاف فاز بین دو شاخهٔ 1 و 2 اتفاق بیفتد، نور خروجی بستگی به اختلاف فاز دو شاخه پیدا می‌کند تا جایی که دو نور یکدیگر را خنثی می‌کنند وقتی اختلاف فاز بین آنها به مقدار 180 برسد[5]. روش‌های بسیاری برای ایجاد اختلاف فاز بین دو شاخه وجود دارد. برخی از آنها عبارتند از استفاده از شاخه‌های نامتقارن در تداخل‌سنج، یا تغییر ضریب شکست نور درون دو شاخه که به هر صورت باعث تغییر مسیر نوری (Optical Path) می‌گردد. مسیر نوری طبق رابطهٔ زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Optical Path} = n\,d$$

که n ضریب شکست نور درون محیط و d طول محیط می‌باشد.