



دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

گروه مهندسی الکترونیک

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی الکترونیک گرایش طراحی مدارات مجتمع نوری

عنوان

تحلیل و شبیه سازی سوئیچینگ تمام نوری سرعت بالا در نقاط کوانتومی نیمه هادی

اساتید راهنما

دکتر رضا یدی پور

دکتر کریم عباسیان

پژوهشگر

فرزین علیمحمدی

تاریخ ارائه

شهریور ۱۳۹۳

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

نام خانوادگی دانشجو: علیمحمدی	نام: فرزین
عنوان پایان نامه: تحلیل و شبیه سازی سوئیچینگ تمام نوری سرعت بالا در نقاط کوانتومی نیمه هادی	
استاد راهنمای اول: دکتر رضا یدی پور	
استاد راهنمای دوم: دکتر کریم عباسیان	
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد	رشته: مهندسی برق، الکترونیک
گرایش: طراحی مدارات مجتمع نوری	دانشکده: مهندسی برق و کامپیوتر
دانشگاه: دانشگاه تبریز	تاریخ فارغ التحصیلی: شهریور ۱۳۹۳
تعداد صفحات: ۸۰	
کلیدواژه ها: نقاط کوانتومی، سوئیچینگ بهره، تقویت کننده ی نوری نیمه هادی، اثر محصور کوانتومی اشتارک ، میدان تراهرتز	
چکیده:	
<p>استفاده از موجهای تراهرتز علاوه بر مزیت های منحصر بفردی که در مخابرات نوری، کاربردهای حسگری و تصویربرداری و همچنین اپتوالکترونیک پرسرعت دارند، اخیراً در نسل جدیدی از کاربردها همانند دستکاری پدیده های نوری در ساختارهای حالت جامد وارد شده اند که نوید سوئیچینگ در مقیاس فمتوثانیه را در ساختارهای حالت جامد می دهند. در این پایان نامه سعی بر این بوده است که سوئیچینگ پر سرعت تمام نوری در ادوات مبتنی بر نقاط کوانتومی نیمه هادی مورد بررسی قرار گرفته و روشی نو جهت سوئیچینگ بهره با استفاده از پالس تراهرتز در تقویت کننده های نوری نیمه هادی پیشنهاد گردد که علاوه بر کاربردهای فراوانی که می تواند در شبکه های مخابرات نوری داشته باشد مزیت های دیگری همچون کاهش اثر الگو را با خود به همراه دارد. بر اساس مدلسازی عددی، دینامیک آنی بهره در یک تقویت کننده ی نوری نیمه هادی نقطه کوانتومی به علت مدولاسیون پتانسیل کوانتومی در نقاط کوانتومی با اعمال میدان الکتریکی تراهرتز توصیف گردیده و پدیده ی کلمپینگ بهره مورد بحث قرار گرفته است. این نوع مکانیزم سوئیچینگ بهره پیشنهاد شده، نوید بخش تبدیل طول موج از حوزه ی تراهرتز به حوزه ی طول موج نوری برای سناریوهای مخابرات تراهرتز می باشد.</p>	

## فهرست مطالب

پیشگفتار .....	۱
فصل اول: پیشینه تحقیق و بررسی منابع مورد مطالعه .....	۴
۱-۱ مقدمه .....	۴
۱-۲ سوئیچینگ تمام نوری .....	۷
۱-۳ حوزه های سوئیچینگ نوری .....	۷
۱-۳-۱ سوئیچینگ دامنه .....	۸
۱-۳-۲ سوئیچینگ پلاریزاسیون .....	۹
۱-۴ سوئیچینگ تمام نوری مبتنی بر نقاط کوانتومی نیمه هادی .....	۱۱
۱-۴-۱ روش استرانسکی- کراستانو .....	۱۳
۱-۴-۲ سوئیچینگ تمام نوری مبتنی بر نقاط کوانتومی در کاواک عمودی .....	۱۵
۱-۴-۳ سوئیچینگ بسیار سریع نوری در QD-SOA .....	۱۹
۱-۵ سوئیچینگ بسیار سریع تمام نوری در نقاط کوانتومی بوسیله پالس های تراهرتز .....	۲۱
۱-۵-۱ پالس تراهرتز به عنوان سیگنال سوئیچینگ .....	۲۱
۱-۵-۲ مدولاسیون الکترو-جذبی در نقاط کوانتومی نیمه هادی .....	۲۲
۱-۶ خواص الکتریکی- نوری نیمه هادی ها .....	۳۰
۱-۶-۱ اثر فرانز- کلدیش .....	۳۰
۱-۶-۲ اثر محصور کوانتومی اشتارک (QCSE) .....	۳۶
۱-۸ فیزیک پدیده الکتروجدبی در ساختارهای چاه پتانسیل .....	۳۷
۱-۸-۱ میدان الکتریکی موازی با لایه ها .....	۳۷
۱-۸-۲ میدان الکتریکی عمود بر لایه ها .....	۳۹
فصل دوم: مواد و روشهای مورد استفاده در تحقیق .....	۴۳
۱-۲ مقدمه .....	۴۳
۲-۲ نحوه ایجاد پالس تراهرتز .....	۴۳
۲-۲-۱ آنتن فتوکنداکتیو .....	۴۴
۲-۲-۳ متدهای شبیه سازی QD-SOA .....	۵۲
۲-۳-۱ معادلات انتشار سیگنال نوری و معادلات نرخ دینامیک حامل ها .....	۵۷
۲-۴ روش حل عددی معادلات نرخ .....	۶۴

۶۴	..... ۱-۴-۲ روش عددی تفاضل محدود
۶۷	..... فصل سوم: نتایج تحقیق و طرح های پیشنهادی
۶۷	..... ۱-۳ ساختار مورد بررسی QD-SOA
۶۸	..... ۲-۳ تغییرات توابع موج الکترون و حفره
۷۰	..... ۳-۳ طیف شدت ASE
۷۱	..... ۴-۳ تغییرات زمانی بهره
۷۳	..... ۱-۴-۳ تغییرات زمانی بهره در حضور پالس تراهرتز
۷۶	..... ۵-۳ جمع بندی و پیشنهادات
۷۷	..... فهرست مراجع

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: شماتیک یک سوئیچ تمام نوری دامنه. پالس کنترلی سوئیچ را با تغییر میزان عبور ماده ی سوئیچینگ از حالت روشن به خاموش در می آورد. ۸.....
- شکل ۱-۲: شماتیک یک سوئیچ پلاریزاسیون. پالس کنترلی حالت سوئیچ را با تغییر در پلاریزاسیون سیگنال دچار تغییر می کند [۳]. ۱۰.....
- شکل ۱-۳: مقایسه چگالی ترازها به صورت تابعی از انرژی در (a). مواد بالک (b). چاه کوانتومی (c). سیم کوانتومی (d). نقطه کوانتومی. ۱۲.....
- شکل ۱-۴: (a) نمایش شماتیک مراحل رشد روش استرانسکی- کراستانو و (b). تصویر. ۱۴.....
- STM(Scannig Tunnel Microscope) نقاط کوانتومی ایندیم آرسناید(InAs) بر روی بستر گالیم آرسناید(GaAs) [۱۳]. ۱۴.....
- شکل ۱-۵: نمایش شماتیک سوئیچ تمام نوری متشکل از نقاط کوانتومی به عنوان ناحیه غیر خطی [۱۴]. ۱۶.....
- شکل ۱-۶: طیف انعکاس کاواک با انعکاس صفر در مُد رزونانس کاواک. طیف جذب تراز پایه (GS) نقاط کوانتومی (دایره های توپر) و تراز برانگیخته (ES) (مربع های توپر) [۱۴]. ۱۶.....
- شکل ۱-۷: نمایش شروع ناحیه غیر خطی در ساختار کاواک بوسیله ی انعکاس آینه پشت توسط یک خط عمودی. و انعکاس تفاضلی کاواک با  $\Gamma=1 \times 10^{-4}$  (مثلاً های توپر) و  $\Gamma=3 \times 10^{-4}$  (دایره های توخالی) و  $\Gamma=1 \times 10^{-4}$  (مربع توپر). شکل کوچک نشانگر تغییر ضریب شکست مطابق با رابطه کرامرز- کرونیگ [۱۴]. ۱۸.....
- شکل ۱-۸: (a) دیاگرام ساختار باندهای نقطه کوانتومی (فقط گذارهای بین باندهای الکترون ها به نمایش گذاشته شده است). (b) بهره مُدال و ضریب شکست در QD-SOA بر حسب تابعی از چگالی کلی حاملها. (c) دینامیک حاملها در SOA در حضور قطار تصادفی پالس (۱۱۰۱۰۱۱۱۰۱) [۱۸]. ۲۰.....
- شکل ۱-۹: نمایش اثر QCSE: اعمال میدان الکتریکی E به یک ساختار پتانسیلی مستطیلی شکل موجب کاهش انرژی گذار نوری و همچنین کاهش همپوشانی توابع موج  $\Delta M$ . مقدار  $M^2$  نشانگر احتمال گذار نوری و در نتیجه ضریب جذب نوری است [۲]. ۲۲.....
- شکل ۱-۱۰: توابع موج محاسبه شده برای تراز GS الکترون و حفره در نقطه کوانتومی دیسک شکل  $In_{0.5}Ga_{0.5}As/GaAs$  در عدم حضور (a,b) و در حضور (c,d) میدان الکتریکی اعمالی در صفحه نقطه کوانتومی. شدت میدان الکتریکی برابر با  $100 \text{ kV/cm}$  [۲]. ۲۳.....

- شکل ۱-۱۱: Stark shift محاسبه شده و مقادیر  $M$  و  $M^2$  بر حسب تابعی از میدان الکتریکی اعمالی در نقطه کوانتومی دیسک شکل  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{GaAs}$  [۲] ..... ۲۴
- شکل ۱-۱۲: میدان الکتریکی در فضای آزاد بر حسب تابعی از زمان با شدتی برابر  $220 \text{ kV/cm}$  [۲] ..... ۲۵
- شکل ۱-۱۳: مدولاسیون انعکاس  $\Delta R / R$  سیگنال پروب در طول موج  $1040 \text{ nm}$  تحت تأثیر پالس تراهرتز. منحنی خط چین- وابستگی زمانی اندازه میدان الکتریکی احساس شده در نقاط کوانتومی به شکل پالس تراهرتز. شکل کوچک- طیف شدت سیگنال پروب نوری در حضور و عدم حضور میدان الکتریکی پالس تراهرتز روی نقاط کوانتومی [۲] ..... ۲۶
- شکل ۱-۱۴: مدولاسیون زمانی انعکاس سیگنال پروب نوری در نمونه مبتنی بر نقاط کوانتومی تحت تأثیر پالسهای تراهرتز با شدت میدانهای متفاوت [۲] ..... ۲۷
- شکل ۱-۱۵: مقدار پیک  $\Delta R / R$  سیگنال ها بر حسب تابعی از پیک میدان الکتریکی تراهرتز روی نقاط کوانتومی [۲] ..... ۲۸
- شکل ۱-۱۶: مدولاسیون زمانی انعکاس  $\Delta R / R$  سیگنال پروب نوری ایجاد شده بوسیله ی انعکاس های متعدد پالس تراهرتز در نمونه مبتنی بر نقطه کوانتومی. شکل کوچک- دامنه طیف فوریه اولین مدولاسیون  $\Delta R / R$  حوالی  $0 \text{ ps}$  [۲] ..... ۲۹
- شکل ۱-۱۷: جذب زیر گاف انرژی در یک نیمه هادی تحت میدان الکتریکی [۲۳] ..... ۳۱
- شکل ۱-۱۸: جذب محاسبه شده حامل آزاد در میدان صفر (a) و در میدان  $E_0 = 10^5 \text{ V/cm}$  (b) [۲۳] ..... ۳۴
- شکل ۱-۱۹: اثر اعمال میدان الکتریکی روی ترازهای انرژی یک نیم رسانا. میدان الکتریکی در راستای  $z$  ترازهای انرژی را مورب می کند. در (a)  $E_0=0$  و در (b)  $E_0$  دارای مقدار متناهی است [۲۳] ..... ۳۶
- شکل ۱-۲۰: اثر میدان الکتریکی بر اکسایتونهای چاه کوانتومی برای حالت میدان الکتریکی به صورت موازی با لایه ها در حضور و عدم حضور میدان [۲۰] ..... ۳۷
- شکل ۱-۲۱: طیف جذب یک نمونه مبتنی بر چاه کوانتومی در دمای اتاق با میدان های الکتریکی متفاوت اعمالی به ساختار در صفحه لایه ها [۲۰] ..... ۳۸
- شکل ۱-۲۲: طیف جذب برای میدانهای الکتریکی که بصورت عمود بر لایه ها اعمال می گردند. این طیف ها به صورت عمودی متناسب با ولتاژ اعمالی دچار انتقال شده اند [۲۰] ..... ۳۹

شکل ۱-۲۳: توابع موج الکترون و حفره برای چند تراز ابتدایی در یک چاه کوانتومی نا محدود. در عدم حضور میدان توابع موج سینوسی بوده و در حضور میدان به صورت توابع ایری مشاهده می گردند [۲۰]. ..... ۴۰

شکل ۲-۱: (a) آنتن فتوکنداکتیو تابش کننده. (b). آنتن آشکارساز فتوکنداکتیو [۲۶]. ..... ۴۴

شکل ۲-۲: پارامترهای هندسی آنتن [۲۷]. ..... ۴۵

شکل ۲-۳: سوئیچ فتوکنداکتیو [۲۷]. ..... ۴۶

شکل ۲-۴: تابش دو قطبی الکتریکی از یک آنتن فتوکنداکتیو [۲۵]. ..... ۴۶

شکل ۲-۵: جریان نوری و میدان الکتریکی برحسب زمان در آنتن فتوکنداکتیو [۲۷]. ..... ۵۱

شکل ۲-۶: گروه بندی دسته نقطه کوانتومی پهن شده به صورت غیر همگن و توزیع مد فوتون مربوطه [۳۰]. ..... ۵۴

شکل ۲-۷: ساختار بانندی یک گروه از نقاط کوانتومی با ترازهای انرژی مشخص شده [۳۰]. ..... ۵۴

شکل ۲-۸: طیف بهره مُدال محاسبه شده برای FWHM های متفاوت پهن شدگی غیرهمگن در چگالی جریان تزریقی  $1 \text{ kA/cm}^2$  [۱۱]. ..... ۶۱

شکل ۲-۹: کاهش بهره نسبت بهره سیگنال کوچک SOA برای انرژی های متفاوت پالس پمپ ورودی در FWHM های متفاوت پهن شدگی غیرهمگن [۳۳]. ..... ۶۱

شکل ۲-۱۰: کاهش بهره نسبت بهره سیگنال کوچک SOA برای انرژی های متفاوت پالس پمپ ورودی [۳۳]. ..... ۶۲

شکل ۲-۱۱: تغییرات زمانی محاسبه شده برای بهره و فاز در سه FWHM متفاوت [۳۳]. ..... ۶۳

شکل ۳-۱: ساختار مورد بررسی برای یک QD-SOA با نقاط کوانتومی InAs/GaAs هرمی شکل. شکل پالس تراهرتز به عنوان سیگنال سوئیچینگ و قطار پالس نوری به عنوان ورودی نیز در شکل نشان داده شده اند. ..... ۶۷

شکل ۳-۲: توابع موج محاسبه شده برای الکترون و حفره تراز پایه نقطه کوانتومی. دوشکل سمت چپ (راست) نشانگر تابع موج الکترون (حفره) در عدم حضور و حضور میدان الکتریکی تراهرتز. ..... ۶۸

شکل ۳-۳: مقادیر انتگرال همپوشانی توابع موج،  $M$ . ..... ۶۹

شکل ۳-۴: طیف شدت ASE محاسبه شده در QD-SOA و محل قرارگیری ترازهای پایه و تحریک شده در نقاط کوانتومی. ..... ۷۰

شکل ۳-۵: نحوه تغییرات بهره به هنگام اعمال پالس ورودی با عرض  $1 \text{ ps}$  با توان  $1 \text{ mW}$  در چگالی جریان  $5 \text{ kA/cm}^2$  در غیاب پالس تراهرتز. ..... ۷۱

- شکل ۳-۶: نحوه تغییرات بهره به هنگام اعمال پالس ورودی با عرض ۱ ps با توان ۱ mW در چگالی جریان  $3/75 \text{ kA/cm}^2$  در غیاب پالس تراهرتز. .... ۷۱
- شکل ۳-۷: نحوه تغییرات بهره به هنگام اعمال پالس ورودی با عرض ۱ ps با توان ۱ mW در چگالی جریان  $2/5 \text{ kA/cm}^2$  در غیاب پالس تراهرتز. .... ۷۲
- شکل ۳-۸: نحوه تغییرات بهره به هنگام اعمال پالس ورودی با عرض ۱ ps با توان ۱ mW در چگالی جریان  $1/5 \text{ kA/cm}^2$  در غیاب پالس تراهرتز. .... ۷۲
- شکل ۳-۶: تغییرات بهره در QD-SOA به هنگام اعمال فقط پالس نوری ورودی ( منحنی خط چین ) و به هنگام حضور پالس تراهرتز ( منحنی نقطه خط ) و به هنگام حضور هر دو پالس ( منحنی ) ..... ۷۳
- شکل ۳-۷: تغییرات بهره QD-SOA به هنگام اعمال قطاری از پالس های تراهرتز بدون هیچگونه ورودی نوری. شکل کوچک نشانگر الکوی قطار پالس تراهرتز می باشد. .... ۷۴
- شکل ۳-۸: بهره بر حسب تابعی از شدت میدان الکتریکی پالس تراهرتز با توانهای موج پیوسته (CW) متفاوت به عنوان سیگنال نوری ورودی. .... ۷۵

## فهرست جداول

- جدول ۲-۱: مقادیر استفاده شده برای شبیه سازی معادله ۲-۱۳ [۳]. .... ۵۱
- جدول ۲-۲: مقادیر متغیرهای استفاده شده در شبیه سازی [۹ و ۱۰]. .... ۶۰

## پیشگفتار

افزایش روز افزون تقاضا برای ایجاد ظرفیت بیشتر در شبکه های ارتباطی موجب علاقه مندی بیشتر پژوهشگران برای استفاده از ادوات نوری در سرعت های بسیار بالا برای پردازش نوری گشته است و این امر جز با استفاده از ادوات بسیار سریع و تماماً نوری امکان پذیر نمی باشد. از طرفی دیگر استفاده از موجهای تراهرتز علاوه بر مزیت های منحصر بفردی که در مخابرات نوری، کاربردهای حسگری و تصویربرداری و همچنین اپتوالکترونیک پرسرعت دارند، اخیراً در نسل جدیدی از کاربردها همانند دستکاری پدیده های نوری در ساختارهای حالت جامد وارد شده اند که نوید سوئیچینگ در مقیاس فمتوثانیه را در ساختارهای حالت جامد می دهند.

در این پایان نامه سعی بر این بوده است تا سوئیچینگ پرسرعت در ادوات نوری مبتنی بر نقاط کوانتومی نیمه هادی مورد بررسی قرار گرفته و طرح های جدیدی برای این منظور در این ساختارها ارائه گردد. در فصل اول به بررسی سوئیچینگ تمام نوری در ساختارهای نیمه هادی مبتنی بر نقاط کوانتومی پرداخته و فیزیک حاکم بر این ساختارها مورد بررسی قرار می گیرد. در ادامه فصل، سوئیچینگ تمام نوری در نقاط کوانتومی نیمه هادی بوسیله ی میدان الکتریکی یک پالس تراهرتز به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته و پدیده های اپتوالکترونیکی مرتبط با این نوع سوئیچینگ و روابط حاکم بر آنها معرفی می گردند.

در ابتدای فصل دوم به نحوه ایجاد یک پالس تراهرتز برای بهره گیری در سوئیچینگ بهره یک تقویت کننده ی نوری نیمه هادی مبتنی بر نقاط کوانتومی (QD-SOA) پرداخته و با بررسی ادوات تولید کننده ی پالس تراهرتز و فیزیک حاکم بر این نوع ادوات به روابطی برای میدان الکتریکی پالس تراهرتز دست خواهیم یافت. سپس متدهای شبیه سازی یک QD-SOA را بیان کرده و به ارائه معادلات انتشار سیگنال نوری و معادلات نرخ دینامیک حاملها برای شبیه سازی این نوع ادوات می پردازیم و چند نمونه از نتایج این نوع شبیه سازی را مورد بررسی قرار می دهیم. در پایان این فصل نیز به نحوه حل عددی معادلات انتشار و معادلات نرخ خواهیم پرداخت.

فصل سوم را با ارائه ساختار مورد بررسی برای عمل سوئیچینگ بسیار سریع تمام نوری آغاز کرده و تاثیر اعمال میدان الکتریکی تراهرتز بر روی توابع موج الکترون و حفره نقطه کوانتومی در شدت میدان های مختلف بیان می گردد. در ادامه تغییرات بهره QD-SOA در حضور پالس تراهرتز و همچنین اعمال سیگنال نوری به عنوان پالس ورودی مورد مطالعه قرار گرفته و سوئیچینگ تمام نوری بهره در این نوع ادوات ارائه می گردد. نهایتاً، در بخش جمع

بندی و پیشنهادات به کاربردهای موج تراهرتز به عنوان سیگنال سوئیچینگ در ادوات نوری و تأثیر پذیری خواص اپتوالکترونیکی آنان می پردازیم.

فصل اول

پیشینه تحقیق

و بررسی منابع مورد مطالعه

## فصل اول

## ۱-۱ مقدمه

به طور کلی در یک سیستم اطلاعات سه وظیفه مهم و اساسی باید به اجرا درآیند؛ انتقال، ذخیره و پردازش اطلاعات. فناوری نوری تا بحال فعالیت چشمگیری در دو مورد اول کرده است. حال تلاش ها به سمت جایگزینی اپتیک با الکترونیک در پردازش اطلاعات منعطف شده است. احتمالاً این امر ابتدا در برخی از بخش های بخصوص سیستم های مخابراتی بسیار سریع<sup>۱</sup> اتفاق خواهد افتاد زیرا در این حوزه از فناوری نوری، بسیاری از فناوری های پیشرفته پرسرعت اپتوالکترونیک مورد استفاده قرار می گیرند و نیاز اساسی برای پردازش سریع در آن احساس می شود. امروزه تقاضای نامحدودی برای ظرفیت در انتقال داده ها وجود دارد و این ظرفیت یا همان پهنای باند به مقدار زیادی در مخابرات فیبر نوری موجود می باشد [۱].

در پنجره طول موج مخابراتی، بین  $1/3$  و  $1/5 \mu\text{m}$ ، پهنای باند  $40 \text{ THz}$  در یک فیبر تنها، یا ظرفیت انتقال داده ای موجود است که برای تمام افراد روی کره ی زمین این امکان را فراهم می آورد که به طور همزمان به مکالمه ی تلفنی بپردازند. اگرچه، بخاطر محدودیت هایی که هم در حوزه الکترونیک و هم در حوزه اپتوالکترونیک تحمیل می گردد، امروزه فقط قسمت کوچکی از این پهنای باند در دسترس می باشد.

چالش اساسی امروزه برای استفاده از پهنای باند در دسترس فیبر نوری می باشد. یکی از راهها، افزایش سرعت عملکرد المانهای اساسی پردازش سیگنال یا همان سوئیچ ها می باشد. برای تحقق این امر ما به یک دید واضح و روشن نسبت به فیزیک این نوع المانها نیازمندیم. فناوری اطلاعات به صورت گسترده ای از دو ذره بنیادی به نام های فوتون و الکترون استفاده می کند. الکترون، فرمیون<sup>۲</sup> بوده و دارای بار الکتریکی می باشد. فوتون، بوزون<sup>۳</sup> بوده و ذره ای بدون بار است. الکترون ها بصورت قوی با فوتون ها دچار اندرکنش می شوند. فوتون ها با یکدیگر اندرکنش نمی کنند. این خصوصیات الکترون را برای پردازش اطلاعات و فوتون را برای انتقال اطلاعات مناسب

<sup>۱</sup> Ultra-high-speed communication systems

<sup>۲</sup> Fermion

<sup>۳</sup> Boson

می‌کند. بنابراین، امروزه الکترون‌ها در سوئیچ‌ها، معمولاً به فرم ادوات نیمه هادی مثل ترانزیستورهای دوقطبی<sup>۱</sup> و ترانزیستورهای اثر میدانی<sup>۲</sup>، استفاده می‌گردند [۱].

در این قسمت بهتر است منظور خود را از سوئیچینگ و لفظ بسیار سریع بیان کنیم. بسیار سریع یک عبارت نسبی بوده و در مقایسه با ادوات سریع در حوزه الکترونیک مانند ترانزیستورهای اثر میدانی نیمه هادی-فلز<sup>۳</sup> (MESFETS) و یا ترانزیستورهای الکترونی با قابلیت تحرک پذیری بالا<sup>۴</sup> (HEMTS)، که برای کاربردهای میکروویو با زمان‌های سوئیچینگ در حدود ۱۰ ps، طراحی شده‌اند، صورت می‌گیرد. اگرچه، مشکل اساسی در الکترونیک این است که الکترون‌ها بشدت اندرکنش‌گر هستند و قبل از اینکه یک الکترون به گیت ترانزیستور برای تحت تأثیر قرار دادن الکترون‌های گیت برسد باید با تمام الکترون‌های نزدیک گیت یا به عبارتی دیگر، با محیط اطراف نیز وارد اندرکنش شده و همین موجب کاهش سرعت و متعاقباً کاهش پهنای باند می‌گردد. زمان‌های موثر سوئیچینگ کمتر از ۵۰۰ ps می‌توانند صفت پرسرعت<sup>۵</sup> را به خود اطلاق کنند و به زمان‌های کمتر از ۱۰ ps سوئیچینگ بسیار سریع<sup>۶</sup> گفته می‌شود [۱]. عمل سوئیچینگ نیز به عملی اطلاق می‌گردد که طی آن یک سیگنال، سیگنالی دیگر را به نحوی دچار تغییر می‌کند. عملیات سوئیچینگ منطقی متنوعی همچون AND، OR، NAND وجود دارند. یک سیستم اطلاعاتی مانند یک کامپیوتر یا یک سیستم مخابراتی عموماً از مجموعه‌ای از این سوئیچ‌ها تشکیل شده است.

همانگونه که ذکر شد، رشد پیوسته تقاضا برای پهنای باند بیشتر در سیستم‌های مخابراتی به زودی احتیاج برای عملکرد ادوات نوری، در سرعت‌هایی فراتر از ۱۰۰ Gb/s فراهم می‌آورد و این امر جز با معرفی ادوات تماماً نوری سرعت بالا تحقق نمی‌پذیرد. علت این است که ادوات موجود در حوزه اپتوالکترونیک و الکترونیک قدرت عملکرد در چنین سرعت‌هایی را، به خاطر طول عمر و زمان انتقال بالای الکترون در مواد نیمه هادی مرسوم، ندارند. در حوزه اپتوالکترونیک نیز برای پشتیبانی از نرخ‌های داده بسیار بالا، زمان‌های سوئیچینگ در مقیاس‌هایی کمتر از یک پیکو ثانیه از هر یک از این ادوات نوری انتظار می‌رود. بنابراین، فهم پروسه‌های اساسی در نیمه هادی‌ها

<sup>۱</sup> Bipolar transistors

<sup>۲</sup> Field-effect transistors

<sup>۳</sup> Metal-semiconductor field-effect transistors

<sup>۴</sup> High-electron-mobility transistors

<sup>۵</sup> High speed

<sup>۶</sup> Ultra-fast switching

در مقیاس های زمانی بسیار سریع به همراه پیشنهاد طرح های بدیع در حوزه مدولاسیون پرسرعت، امری مهم به شمار می آید که منجر به تحقق سوئیچینگ بسیار سریع در ادوات اپتوالکترونیک می گردد [۲].

## ۱-۲ سوئیچینگ تمام نوری

در این بخش ابتدا یک تعریف کلی از سوئیچینگ تمام نوری برای درک بهتر ارائه می‌گردد. سوئیچ تمام نوری امکان کنترل یک سیگنال نوری بوسیله ی سیگنال نوری دیگر را فراهم می‌سازد. در واقع کنترل نور با نور در یک سوئیچ تمام نوری تحقق می‌پذیرد. تا به حال ساختارهای متفاوتی مبتنی بر مواد گوناگون برای تحقق سوئیچینگ تمام نوری ارائه شده است. در ادامه این پایان نامه ابتدا به بررسی چند نمونه از سوئیچ های تمام نوری می‌پردازیم و سپس به تفصیل در مورد سوئیچ هایی با ساختارهای مبتنی بر نقاط کوانتومی نیمه هادی خواهیم پرداخت.

## ۱-۳ حوزه های سوئیچینگ نوری

اساساً، سوئیچینگ نوری می‌تواند در سه حوزه ی فضایی، طول موج و زمان صورت پذیرد. اگرچه، بیشترین پیشرفت در سوئیچینگ نوری در حوزه ی فضایی، جایی که سیگنال نوری از پورت های ورودی به پورت های خروجی سوئیچ می‌شوند، صورت پذیرفته است. در رفرنس های موجود، برداشت های متفاوتی از سوئیچینگ در حوزه طول موج انجام می‌پذیرد. به طور کلی سه پروسه اساسی در مواجهه با طول موج در شبکه های نوری مالتی پلکسینگ تقسیم طول موج (WDM)<sup>۱</sup> وجود دارد. اولین پروسه، جدا کردن یک طول موج یا انتخاب آن است که بوسیله ی دمالتی پلکسرها و یا فیلترها صورت می‌پذیرد. پروسه دوم ترکیب طول موج و یا گروه بندی آن می‌باشد. این عمل بوسیله مالتی پلکسرها و یا ترکیب کننده های پسیو<sup>۲</sup> انجام می‌گردد. پروسه سوم، که بیشتر در شبکه های مخابراتی نوری مد نظر می‌باشد، تبدیل طول موج<sup>۳</sup> است. در این پروسه طول موج حامل سیگنال به طول موجی دیگر تبدیل (سوئیچ) می‌گردد. در طول سالهای اخیر پیشرفت فراوانی در حوزه تبدیل طول موج صورت گرفته است. در آینده پیشرفت بلوک های سوئیچینگ تنظیم پذیر<sup>۴</sup> تجاری، قابلیت سوئیچ (تبدیل) همزمان چند طول موج را فراهم خواهد آورد. سوئیچینگ در حوزه زمان هنوز آسان و همچنین آماده برای گسترش تجاری نمی‌باشد. این نوع از سوئیچینگ، نیازمند بافرها و حافظه های نوری، همزمان سازی نوری<sup>۵</sup>، و همچنین قابلیت انجام بسیاری از عملیات منطقی<sup>۶</sup> در

<sup>۱</sup> Wavelength division multiplexing (WDM)

<sup>۲</sup> Passive Combiners

<sup>۳</sup> Wavelength Conversion

<sup>۴</sup> Tunable switching blocks

<sup>۵</sup> Optical synchronization

<sup>۶</sup> Logical operations

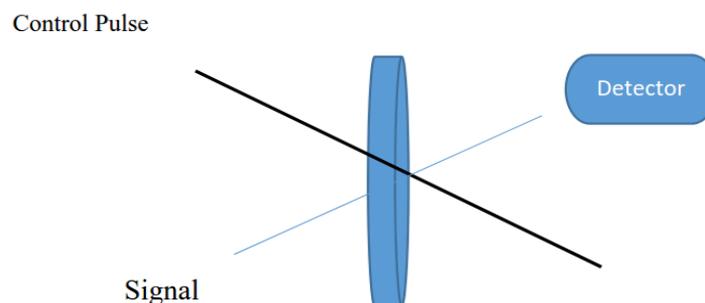
حوزه ی نور می باشد. اگرچه، مالتی پلکسینگ و دی مالتی پلکسینگ نوری تقسیم زمانی<sup>۱</sup> با نرخ بیت بالا امروزه تحقق یافته اند [۳].

علاوه بر حوزه های ذکر شده در سوئیچینگ نوری، می توان به مکانیزم های دیگری همچون سوئیچینگ دامنه، سوئیچینگ پلاریزاسیون و یا سوئیچینگ خواص نوری ساختارهای مبتنی بر مواد نیمه هادی همچون سوئیچینگ بهره یا مدولاسیون جذب نوری ساختار نیمه هادی (سوئیچینگ جذب نوری) که در حوزه سوئیچینگ نوری جای می گیرند، اشاره کرد.

در ادامه به بررسی نمونه هایی از حوزه های ذکر شده در سوئیچینگ نوری، همچون سوئیچینگ فضایی، سوئیچینگ دامنه و فاز، و مدولاسیون جذب در ساختارهای نیمه هادی خواهیم پرداخت. تمرکز اصلی این پایان نامه بیشتر بر روی سوئیچینگ بهره در ساختارهای نیمه هادی مبتنی بر نقاط کوانتومی خواهد بود.

### ۱-۳-۱ سوئیچینگ دامنه

سوئیچ های دامنه یکی از معمول ترین مثال های سوئیچینگ تمام نوری می باشند. نمونه ای از ساختار این نوع سوئیچ در شکل ۱-۱ به نمایش درآمده است. پالس های کنترل و سیگنال در سطح ماده ی سوئیچینگ نیمه هادی به صورت فضایی همپوشانی دارند. پالس کنترل تغییر در دامنه پالس سیگنال را بوسیله تغییر در مقدار جذب ماده ی نیمه هادی اعمال می کند. آشکار سازی تغییر ایجاد شده پس از ماده ی نیمه هادی در حقیقت تفاوت بین حالت روشن و خاموش<sup>۲</sup> این نوع سوئیچ می باشد [۴].



شکل ۱-۱: شماتیک یک سوئیچ تمام نوری دامنه. پالس کنترلی سوئیچ را با تغییر میزان عبور ماده ی سوئیچینگ از حالت روشن به خاموش در می آورد.

<sup>۱</sup> Optical time division multiplexing and demultiplexing

<sup>۲</sup> On and off state

اثر محصور کوانتومی اشتارک (QCSE) یکی از مکانیزمهای بکارگرفته شده در این نوع سوئیچ ها می باشد [۷-۵] که در ادامه این پایان نامه به تفصیل در مورد این اثر خواهیم پرداخت. در این نوع سوئیچ ها عموماً نمونه های مبتنی بر چاهای کوانتومی چندگانه در معرض میدان های الکتریکی استاتیک، بوسیله ی مدارهای خارجی و یا ایجاد شده به صورت داخلی (ساختارهای p-i-n)، قرار می گیرند. پالس های سیگنال و کنترل بر روی طول موج رزونانس حفره سنگین شیفت قرمز<sup>۱</sup> یافته تنظیم شده اند. در حالت خاموش سوئیچ، سیگنال با مقدار بسیار بالایی در عدم حضور پالس کنترلی جذب ماده ی نیمه هادی می گردد. هنگامی که سیگنال کنترلی اعمال می شود، این سیگنال الکترون و حفره ها را به درون چاههای کوانتومی هدایت می کند. سپس حاملان بار از داخل چاهها بوسیله ی تونل زنی یا تحریک گرمایی فرار کرده و الکترون ها و حفره ها به نواحی n و p، به دلیل میدان الکتریکی موجود هدایت می شوند. الکترون و حفره جدا شده از هم ایجاد یک میدان الکتریکی داخلی می کنند که به نوبه ی خود موجب کاهش QCSE می گردد و موجب شیفت آبی رزونانس جذب در ماده ی نیمه هادی می گردد. در نتیجه این شیفت آبی، عبور پالس سیگنال افزایش یافته و حالت روشن سوئیچ را نتیجه می دهد. توجه به این نکته ضروری است که تلاش اندکی برای بهبود و گسترش این نوع سوئیچ ذکر شده صورت گرفته است.

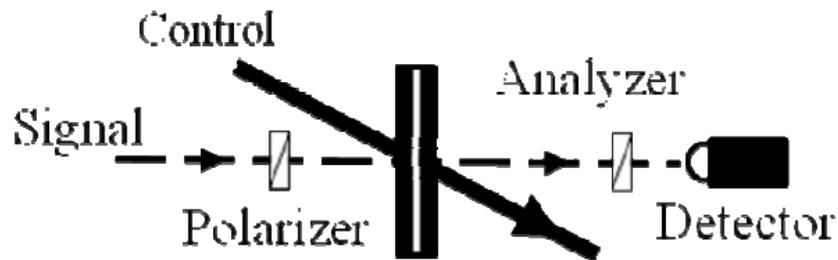
سوئیچ های دامنه، عموماً از طرح های تحریک رزونانت بهره می گیرند. در نتیجه، انرژی های سوئیچینگ در این نوع سوئیچ ها در مقایسه با سوئیچ های پلاریزاسیون، که از طرح های تحریک زیر رزونانت استفاده می کنند کمتر است [۴].

### ۱-۳-۲ سوئیچینگ پلاریزاسیون

اساس عملکرد سوئیچ های پلاریزاسیون بسیار شبیه به سوئیچ های دامنه می باشد که پلاریزاسیون سیگنال بجای دامنه آن دستخوش تغییر می گردد. تنها تفاوت در طراحی این نوع سوئیچ استفاده از یک جفت پلاریزر-آنالایزر<sup>۲</sup> می باشد که در شکل ۱-۲ به نمایش درآمده است.

<sup>۱</sup> Red-shift

<sup>۲</sup> Polarizer-Analyzer



شکل ۱-۲: شماتیک یک سوئیچ پلاریزاسیون. پالس کنترلی حالت سوئیچ را با تغییر در پلاریزاسیون سیگنال دچار تغییر می‌کند [۳].

پالس سیگنال ابتدا در طول مسیر پس از عبور از پلاریزر، دارای پلاریزاسیون خطی می‌گردد. سپس این سیگنال (در عدم حضور پالس کنترلی) بعد از عبور از ماده ی سوئیچینگ (چاه های کوانتومی چند گانه ) در مواجهه با آنالایزر، متوقف گشته و عبور نخواهد کرد. بنابراین، هیچگونه سیگنالی یا حداقل مقدار اندکی در آشکار ساز آشکاسازی خواهد شد که حالت خاموش سوئیچ را موجب می‌گردد. هنگامی که سیگنال کنترلی به ماده ی سوئیچینگ اعمال گردد موجب ایجاد خواص غیرخطی در این ماده می‌شود. سیگنال دارای پلاریزاسیون خطی از ترکیب سیگنال های با پلاریزاسیون دایروی بوجود می‌آید. هر کدام از پلاریزاسیون های دایروی (راستگرد و چپ گرد) تاثیر متفاوتی روی غیر خطیت ساختار خواهند داشت و در نتیجه پلاریزاسیون خطی سیگنال دچار مدولاسیون خواهد شد (پلاریزاسیون چرخیده و به شکل بیضوی در خواهد آمد). بنابراین، مقدار بیشتری از پالس سیگنال از آنالایزر عبور کرده و حالت روشن سوئیچ را موجب می‌گردد [۴]. در ادامه به سوئیچینگ نوری در ساختارهای مبتنی بر نقاط کوانتومی نیمه هادی متمرکز می‌شویم.

## ۱-۴ سوئیچینگ تمام نوری مبتنی بر نقاط کوانتومی نیمه هادی

امروزه ادوات نوری مبتنی بر مواد نیمه هادی نقش مهمی را در شبکه های مخابراتی نوری ایفا می کنند. از این دست ادوات می توان به لیزرهای نیمه هادی به عنوان فرستنده و آشکارسازهای نوری به عنوان گیرنده و همچنین تقویت کننده های نوری مبتنی بر نیمه هادی ها در طول خط انتقال یاد کرد.

ناحیه فعال<sup>۱</sup> به عنوان هسته ی تشکیل دهنده ی هر یک از ادوات نوری شاهد تحول چشمگیری در طول زمان، به علت پیشرفت در عرصه تکنیک های رشد لایه نازک مواد نیمه هادی، بوده است. روند این تکامل با شروع از ادوات بالک<sup>۲</sup> به ادوات چاه کوانتومی<sup>۳</sup> و سپس به ادوات مبتنی بر نقاط کوانتومی<sup>۴</sup> رسیده است که در ناحیه فعال خود از موادی در مقیاس نانو با این نوع ساختارها استفاده می کنند. در ادوات بالک الکترون ها و حفره ها می توانند داخل نیمه هادی حرکتی آزادانه در تمامی جهات داشته باشند. با کاهش بعد ناحیه فعال در یک راستا کمتر از طول موج دوبروی الکترون ها و حفره ها، حاملان بار در این راستا محدود شده و ترازهای محدود کوانتیزه را اشغال می کنند [۸]. عمل کاهش بعد به راحتی با قراردادن یک لایه نازک نیمه هادی با باند ممنوعه کوچکتر در بین دو لایه از نیمه هادی با باند ممنوعه بیشتر امکان پذیر می شود. کاهش بعد بیشتر نیز با روشهای رشد خاص لایه نازک مواد نیمه هادی انجام می پذیرد. یکی از این روشها، روش استرانسکی-کراستانو<sup>۵</sup> می باشد که منجر به ایجاد جزیره هایی از نیمه هادی یا همان نقاط کوانتومی بر روی بستر مورد نظر می گردد. این جزایر، الکترون ها و حفره ها را در هر سه بعد محدود می نماید؛ یعنی اینکه الکترون داخل نقطه کوانتومی در هر سه راستا سد پتانسیلی را مقابل خود تجربه می کند. نتیجه مستقیم کاهش بعد، تغییر در چگالی ترازهای انرژی در نزدیکی اکستریم ساختار بانندی نیمه هادی است [۸]. همانطور که در شکل ۱-۳ مشاهده می شود چگالی ترازها در مواد بالک تابعیت مرتبه دوم از خود نشان می دهد، در صورتی که در مورد ساختارهای چاه کوانتومی رفتار چگالی ترازها پله ای و در مورد نقاط کوانتومی چگالی ترازها به صورت تابع دلتا در ترازهای انرژی مجاز توزیع شده اند.

<sup>۱</sup> Active medium

<sup>۲</sup> Bulk devices

<sup>۳</sup> Quantum well (QW) devices

<sup>۴</sup> Quantum dot (QD) devices

<sup>۵</sup> Stranski-Krastanow