حمد و سپاس خداوند متعال را که گوهر علم و عشق را در ما به ودیعه نهاد و از دریای معرفت خود قطراتی را به ما ارزانی داشت. حمد و سپاس خدایی را که به قلم و آنچه می نویسد قسم یاد کرد.

۱۱۸۲۹۰

۸۷/۱/۱۸۵۷۲
۸۷/۱۳۱

T.M.U.
دانشگاه تربیت مدرّس
دانشکده فنی و مهندسی

رساله دوره دکتری مهندسی برق– الکترونیک

آنالیز و طراحی یک قطعه سوییچ نوری مبتنی بر کریستال‌های فوتونی

محمد علی منصوری بیرجندی

۱۳۸۸ /۱/ ۱۸

استاد راهنما:

دکتر محمد کاظم مروج فرشی

استاد مشاور:

دکتر علی رستمی

زمستان ۱۳۸۷

۱۱۵۴۹۰

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از رساله دکتری

آقای محمدعلی منصوری بیرجندی رساله ۲۴ واحدی خود را **با عنوان آنا لیزوطراحی یك قطعه سوئیچ نوری مبتنی برکریستالهای فوتونی** در تاریخ ۱۳۸۷/۱۲/۱۱ 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 محمدکاظم مروج فرشی	استاد	
استاد مشاور	دکتر علی رستمی	استاد	
استاد ناظر	دکتر عبدالرضا نبوی لیشی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر وحید احمدی	استاد	
استاد ناظر	دکتر نصرت اله گرانپایه	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر جلیل راشد محصل	استاد	
نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر عبدالرضا نبوی لیشی	دانشیار	

آیین نامه 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 هیات علمی، دانشجویان، دانش آموختگان 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- حق نشر و تکثیر پایان‌نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه است ولی حقوق معنوی پدیدآوردگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه/ 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 مسولیت علمی مستخرج از پایان‌نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو است.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی 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 نرم‌افزار و یا آثار ویژه حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده‌ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده‌ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین نامه‌های مصوب انجام شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته‌ها 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 ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۷/۴/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/۴/۲۳ در هیات رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم الاجرا 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 مهندسی** دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای **دکتر محمد کاظم مروج فرشی**، مشاوره جناب آقای **دکتر علی رستمی** 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 علی منصوری بیرجندی** دانشجوی رشته **الکترونیک** مقطع **دکتری** تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: **محمد علی منصوری بیرجندی**

تاریخ و امضا: **۱۳۸۷/۱۲/۱۱**

این رساله طی قرارداد شماره ۵۰۰/۶۲۸۹/ت، مورخ ۱۳۸۵/۵/۱۴ کد TMU-85-05-35 ثبت شده در دانشگاه تربیت مدرس، از طرف **مرکز تحقیقات مخابرات ایران** حمایت مالی شده است. بدین وسیله از همکاری آن مرکز تقدیر و تشکر می‌شود.

تقدیم

تقدیم به روح پاک برادرم **دکتر محمدناصر منصوری و خانواده‌اش**؛ یادشان گرامی باد.

تقدیم به **همسر عزیزم**
که با صبر و بردباری‌اش، این راه را برایم هموار ساخت و من این عرصه را مدیون اویم.

و تقدیم به گل‌های زندگیم **سعید و سروش**.

تشکر و قدردانی

باسپاس فراوان از :

استاد عزیز و فرزانه، جناب آقای **پروفسور محمدکاظم مروج فرشی** که نه تنها در مراحل مختلف با صبر و حوصله، من را از راهنمایی‌های خود بهره‌مند ساختند، بلکه همواره معلم اخلاق من نیز بوده‌اند. بزرگواری ایشان را ارج می‌نهم.

با تشکر از:

استاد دلسوز و فرهیخته، جناب آقای **پروفسور علی رستمی** که همواره از مشاوره ایشان بهره فراوان بردم و دلسوزانه من را در انجام این رساله راهنمایی نموده‌اند.

با سپاس از اساتید محترم گروه الکترونیک:

آقایان **پروفسور وحید احمدی** و **دکتر عبدالرضا نبوی** که آن چه آموخته‌ام را مدیونشان هستم.

و با تشکر از اساتید ارجمند مدعو:

آقایان **پروفسور جلیل راشد محصل** و **دکتر نصرت‌ا... گرانپایه** که زحمت تصحیح و داوری این رساله را به عهده گرفتند.

سوگند نامه دانش آموختگان دانشگاه تربیت مدرس

بسم الله الرحمن الرحیم

کُونُوا رَبّانیینَ 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 عَلّمتَنی، 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).

816722003

چکیده

در این رساله، با استفاده از کریستال‌های فوتونی[1] دو بعدی، نحوه طراحی و دست‌یابی به یکی از اساسی-ترین عناصر مدارهای مجتمع نوری یعنی سوییچ تمام‌نوری[2] بررسی شده است. با بکارگیری آرایه‌ای از تشدیدکننده‌های حلقوی[3] غیرخطی که به بازوی بالایی یک تداخل‌سنج ماخ-زندر[4] کوپل شده است، یک ساختار سوییچ تمام‌نوری پیشنهاد شده است که قابلیت مدیریت توان سوییچینگ با شدت آستانه و زمان سوییچینگ خیلی‌کم را دارا است؛ واجد شرایط مجتمع‌شدن بصورت تمام‌نوری بوده؛ و قابلیت طراحی در فرکانس‌های مختلف از جمله سیستم‌های WDM را نیز دارد. با استفاده از آرایه۳×۵ نشان دادیم که امکان طراحی یک قطعه سوییچ نوری با شدت آستانه[5] خیلی کم در حدود $15\ mW/m^2$ و پنجره‌های سوییچینگ ۳۵ ps وجود دارد. به کمک آرایه‌های $m\times1$، (m=۱،۳ و۵)، پنجره‌های سوییچینگ کمتر از ۱۰ps البته با هزینه آستانه‌های سوییچینگ بیشتر، در محدوده ۳۷ تا $55\ mW/m^2$ بدست آوردیم. تمام ساختار، بر اساس کریستال فوتونی با شبکه مربعی و ثابت شبکه a=۶۰۰nm و میله‌هایی[6] با شعاع r=۹۰nm در بستر هوا شکل گرفته‌اند. ضریب شکست[7] خطی میله‌ها مشابه ماده $Si_{0.75}Ge_{0.25}$ یعنی ۳/۶ =n_1 است. میله‌های غیرخطی از جنس SiO_2 با ضریب شکست خطی n_0=۱/۴ و ضریب غیرخطی کر[8] $n_2=10^{-14}\ m^2/W$ درنظر گرفته شده‌اند. حلقه‌های غیرخطی طوری طراحی شده‌اند که طول موج تشدید[9] آنها برابر λ_0=۱۵۵۰nm باشد.

در ادامه، اثرات تغییر ابعاد تشدیدکننده‌های حلقوی و چیدمان آن‌ها بر روی پارامترهای سوییچینگ بررسی شده است. از روی نتایج این شبیه‌سازی‌ها، تکنیکی برای مدیریت شدت آستانه و زمان پنجره سوییچینگ معرفی شده است. در پایان تاثیر اثر اشباع غیرخطی، تلفات و تغییر پارامترهای غیرخطی بر روی پارامترهای سوییچینگ بیان شده است. روش تحلیل و شبیه‌سازی مبتنی بر روش‌های عددی تفاضل محدود در حوزه زمان[10] و روش بسط امواج تخت[11] است.

کلید واژه: کریستال‌های فوتونی، سوییچ تمام نوری، تشدیدکننده‌های حلقوی، تداخل‌سنج ماخ-زندر

---

[1] - Photonic crystals
[2] -all-optical
[3] -ring resonators
[4] -Mach-Zehnder Interferometer: MZI
[5] -threshold intensity
[6] -rods
[7] -refraction index
[8] -Kerr
[9] -resonance
[10] -Finite Difference Time Domain: FDTD
[11] -Plane wave expansion: PWE

فهرست مطالب

عنوان | صفحه

فهرست علایم و نشانه‌ها ..... ج
فهرست جدول‌ها ..... د
فهرست شکل‌ها ..... ه

فصل ۱- مقدمه ۱
۱-۱- پیشگفتار ۱
۱-۲- انگیزش ۱
۱-۳- تاریخچه ۲
۱-۴- دست‌آوردهای جدید ۷
۱-۵- مرور اجمالی بر رساله ۷

فصل ۲- مروری بر کریستال‌های فوتونی و ابزار محاسباتی ۹
۲-۱- مقدمه ۹
۲-۲- مقدمه ای بر معادلات ماکسول ۹
۲-۳- مواد غیرخطی ۱۱
۲-۴- محاسبه ساختار باند به روش بسط امواج تخت (PWE) ۱۲
۲-۵- تحلیل انتشار نور به روش تفاضل محدود در حوزه زمان (FDTD) ۱۴
۲-۶- مروری بر کریستال‌های فوتونی و خواص آن ۱۷
۲-۶-۱- انواع کریستال‌های فوتونی ۱۷
۲-۶-۲- پارامترهای مهم در عملکرد کریستالهای فوتونی ۱۹
۲-۷- مقایسه باند فرکانسی کریستالهای فوتونی دوبعدی ۲۰
۲-۸- نقص در کریستال فوتونی ۲۳
۲-۸-۱- کاواک کریستال فوتونی ۲۴
۲-۸-۲- موجبر کریستال فوتونی ۲۵

فصل ۳- معرفی ساختار سوییچ نوری ۳۰
۳-۱- مقدمه ۳۰
۳-۲- ساختار سوییچ MZI تمام نوری ۳۰
۳-۳- ساختار MZI ساده به عنوان یک سوییچ ۳۴
۳-۴- طراحی تشدیدکننده حلقوی غیرخطی ۳۷
۳-۵- بررسی سوییچ تمام‌نوری با یک تشدیدکننده حلقوی ۴۲

فصل ۴- سوییچ تمام نوری با آرایه‌ای از تشدیدکننده‌های حلقوی ۴۷

۴-۱- مقدمه ۴۷
۴-۲- بررسی سوییچ تمام‌نوری با آرایه (n×۱) از تشدیدکننده‌های حلقوی ۴۷
۴-۳- بررسی سوییچ تمام‌نوری با آرایه (۱×۲) و (۱×۴) از تشدیدکننده‌های حلقوی ۴۹
۴-۴- بررسی سوییچ تمام‌نوری با آرایه (n×۳) و (n×۵) از تشدیدکننده‌های حلقوی ۵۱
فصل ۵- بررسی عوامل تاثیرگذار بر پارامترهای سوییچینگ ۵۹
۵-۱- مقدمه ۵۹
۵-۲- بررسی تاثیر چیدمان تشدیدکنندههای حلقوی غیرخطی ۵۹
۵-۳- تاثیر چیدمان حلقه‌های غیریکسان بر روی پارامترهای سوییچینگ ۶۸
۵-۴- بررسی تاثیر اشباع غیرخطی و تلفات بر روی پارامترهای سوییچینگ ۷۳
فصل ۶- بحث و نتیجه‌گیری ۷۹
۶-۱- خلاصه ۷۹
۶-۲- تحقیقات آتی ۸۳
فهرست مراجع ۸۴
واژه نامه فارسی به انگلیسی ۸۷
واژه نامه انگلیسی به فارسی ۸۹

فهرست علایم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
تعداد سطرها	m
تعداد ستون‌ها	n
شدت میدان الکتریکی	E
شدت میدان مغناطیسی	H
چگالی شار جابجایی الکتریکی	D
چگالی شار یا القای مغناطیسی	B
چگالی جریان الکتریکی	J
چگالی بار الکتریکی	ρ
گذردهی مغناطیسی فضای آزاد	μ_0
گذردهی الکتریکی (ثابت دی‌الکتریک) فضای آزاد	ε_0
بردار قطبش	$\boldsymbol{P}$
قسمت خطی بردار قطبش	$\boldsymbol{P}_{\mathrm{L}}$
قسمت غیرخطی بردار قطبش	$\boldsymbol{P}_{\mathrm{NL}}$
پذیرفتاری مرتبه (i)ام	$\chi^{(i)}$
ضریب غیرخطی کر	n_2
شدت متوسط میدان الکتریکی	I
طول موج مرکزی	λ
اندازه گام زمانی	$c\Delta t$
اندازه گام مکانی	$\Delta x, \Delta y$
ضریب شکست بستر	n_{b}
ضریب شکست میله‌های خطی	n_{r}
ثابت دی‌الکتریک میله‌های خطی	ε_{r}
ضریب شکست میله‌های غیرخطی	n_0
ضریب غیرخطی کر مربوط به میله‌های غیرخطی	n_2
ثابت شبکه کریستال فوتونی	a
شعاع میله‌ها	r
شعاع حلقه	R
فاصله جداسازی بخش‌های کوپلینگ	d_1
فاصله جداسازی عمودی (افقی) بین حلقه‌ها	$d_2\,(d_3)$
طول قسمت‌های مختلف MZI	L_1, L_2, L_3

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول۳-۱: پارامترهای فیزیکی و هندسی استفاده شده در شبیه‌سازی عددی..... ۳۲

جدول۳-۲: اثر شعاع‌های تشدیدکننده حلقوی بر روی پارامترهای سوییچینگ..... ۴۶

جدول۴-۱: مشخصه‌های سوییچینگ برای ساختار MZI خطی با آرایه‌های ($m\times n$)..... ۵۸

جدول۵-۱: اثر تغییر محل تشدیدکننده حلقوی غیرخطی روی پارامترهای سوییچینگ..... ۶۲

جدول۵-۲: درصد بهبود پارامترهای سوییچینگ در چینش تشدیدکننده حلقوی..... ۶۲

جدول۵-۳: مشخصه‌های زمانی برای چیدمان‌های مختلف از تشدیدکننده‌های A و T ۶۸

جدول۵-۴: مشخصه‌های سوییچ با چیدمان‌های مختلف از حلقه‌های غیریکسان E،D،C،B،A ۷۱

جدول۵-۵: اثر اشباع غیرخطی، N_{sat}، و تلفات، N_I، بر روی زمان شروع سوییچینگ، T_{si}. ۷۴

فهرست شکل‌ها

عنوان		صفحه
شکل۲-۱:	سلول دوبعدی برای گسسته‌سازی میدان الکتریکی مد TE در روش FDTD	۱۵
شکل۲-۲:	ساختارهای مختلف کریستال‌های فوتونی یک بعدی، دوبعدی و سه بعدی	۱۷
شکل۲-۳:	نمایشی از تیغه‌های کریستال فوتونی.....	۱۸
شکل۲-۴:	باند فرکانسی کریستال فوتونی مثلثی میله‌های Si با εr =11.3 و r/a=0.35.....	۲۱
شکل۲-۵:	باند فرکانسی کریستال فوتونی مثلثی حفره‌های هوا در ε_r=11.9 و r/a=0.3.....	۲۱
شکل۲-۶:	باند فرکانسی کریستال فوتونی مربعی حفره‌های هوا در εr =11.9 و r/a=0.45..	۲۲
شکل۲-۷:	باند فرکانسی کریستال مربعی حفره‌های هوا در $Si_{0.75}G\ e_{0.25}$ با ε_r=12.96 و	۲۲
شکل۲-۸:	باند فرکانسی کریستال مربعی میله‌های $Si_{0.75}G\ e_{0.25}$ با εr =12.96 و r/a=0.15..	۲۲
شکل۲-۹:	نمایش نقص نقطه‌ای و نقص خطی در یک ساختار کریستال فوتونی میله‌ای.....	۲۳
شکل۲-۱۰:	ساختار یک نوع کوپلر کریستال فوتونی.....	۲۴
شکل۲-۱۱:	ساختار یک نوع فیلتر انتخاب کانال در یک تیغه‌ی کریستال فوتونی.....	۲۴
شکل۲-۱۲:	ساختارهای مختلف موجبری براساس نقص‌های خطی در کریستال فوتونی.....	۲۵
شکل۲-۱۳:	نمایش انتقال موج الکترومغناطیسی درون یک خم موجبری ۹۰ درجه.....	۲۶
شکل۲-۱۴:	مشخصه طیف انتقال یک موجبر مستقیم مثلثی حفره‌های هوا	۲۷
شکل۲-۱۵:	مشخصه طیف انتقال یک موجبر زانویی مثلثی حفره‌های هوا در.....	۲۸
شکل۲-۱۶:	مشخصه طیف انتقال یک موجبر سه‌راهی ساده، مثلثی حفره‌های هوا.....	۲۸
شکل۲-۱۷:	مشخصه طیف انتقال یک موجبر سه‌راهی اصلاح شده مثلثی حفره‌های هوا	۲۹
شکل۲-۱۸:	مشخصه طیف انتقال یک موجبر زانویی مربعی میله‌ای.....	۲۹
شکل۳-۱:	نمودار کلی ساختار اولیه سوییچ تمام‌نوری پیشنهادی.....	۳۱
شکل۳-۲:	باند فرکانسی کریستال فوتونی مربعی میله‌های $Si_{0.75}Ge_{0.25}$	۳۳
شکل۳-۳:	رفتار زمانی سوییچ پیشنهادی بصورت نمونه.....	۳۴
شکل۳-۴:	نمودار کلی ساختار سوییچ تمام‌نوری MZI ساده.....	۳۴
شکل۳-۵:	رفتار زمانی یک سوییچ نوریMZI ساده، با بازوی بالایی غیرخطی.....	۳۶
شکل۳-۶:	نمایش نمادین یک ساختار نمونه تشدیدکننده حلقوی.....	۳۷
شکل۳-۷:	طیف انتقال یک موجبر زانویی مربعی با یک ردیف	۳۸
شکل۳-۸:	پاسخ‌های ورودی و خروجی موجبر زانویی با دو ردیف میله‌های.....	۳۸
شکل۳-۹:	یک ساختار تست برای انتخاب ضریب شکست و شعاع حلقه هشت ضلعی	۴۰
شکل۳-۱۰:	خروجی‌های ۱ و ۲ برحسب تغییرات ضریب شکست حلقه هشت ضلعی	۴۰
شکل۳-۱۱:	یک ساختار تست برای انتخاب ضریب شکست مناسب برای حلقه مربعی شکل....	۴۱

شکل۳-۱۲: خروجی‌های ۱ و ۲ برحسب تغییرات ضریب شکست حلقه مربعی شکل..... ۴۱
شکل۳-۱۳: رفتار زمانی سوییچ با یک تشدیدکننده حلقوی،کمتر از شدت آستانه..... ۴۳
شکل۳-۱۴: رفتار زمانی سوییچ با یک تشدیدکننده حلقوی به ازای $I_{in}=60mW/m^2$..... ۴۳
شکل۳-۱۵: رفتار زمانی سوییچ با یک تشدیدکننده حلقوی به ازای $I_{in}=70mW/m^2$..... ۴۴
شکل۳-۱۶: رفتار زمانی سوییچ با یک تشدیدکننده حلقوی به ازای $I_{in}=75mW/m^2$..... ۴۴
شکل۳-۱۷: تغییرات اختلاف فاز بین سیگنال خروجی در دو نقطه در بازوی بالایی..... ۴۵
شکل۴-۱: نمایش کلی یک آرایه از تشدیدکننده‌های حلقوی ۳×۵ ..... ۴۷
شکل۴-۲: رفتار زمانی یک سوییچ تمام‌نوری با دو تشدیدکننده حلقوی..... ۴۸
شکل۴-۳: مشخصه‌های ورودی_خروجی برای MZI خطی با آرایه ($1\times n$)..... ۴۹
شکل۴-۴: رفتار زمانی برای تشدیدکننده حلقوی (۱×۲) به ازای $I_{in}=240mW/m^2$..... ۵۰
شکل۴-۵: رفتار زمانی برای تشدیدکننده حلقوی (۱×۴) به ازای $I_{in}=230mW/m^2$..... ۵۰
شکل۴-۶: نمونه دیگری از آرایه‌هایی با تقارن زوج از تشدیدکننده‌های حلقوی..... ۵۱
شکل۴-۷: مشخصه‌های ورودی_خروجی برای MZI خطی با آرایه ($3\times n$)..... ۵۳
شکل۴-۸: مشخصه‌های ورودی_خروجی برای MZI خطی با آرایه ($5\times n$)..... ۵۳
شکل۴-۹: مشخصه‌های ورودی_خروجی برای MZI خطی با آرایه ($m\times n$)..... ۵۴
شکل۴-۱۰: رفتار زمانی شدت خروجی برای (۱×۳) تشدیدکننده حلقوی..... ۵۵
شکل۴-۱۱: رفتار زمانی شدت خروجی برای (۲×۳) تشدیدکننده حلقوی..... ۵۵
شکل۴-۱۲: رفتار زمانی شدت خروجی برای (۳×۳) تشدیدکننده حلقوی..... ۵۶
شکل۴-۱۳: رفتار زمانی شدت خروجی برای (۱×۵) تشدیدکننده حلقوی..... ۵۶
شکل۴-۱۴: رفتار زمانی شدت خروجی برای (۲×۵) تشدیدکننده حلقوی..... ۵۷
شکل۴-۱۵: رفتار زمانی شدت خروجی برای (۳×۵) تشدیدکننده حلقوی..... ۵۷
شکل۵-۱: رفتار زمانی یک تشدیدکننده حلقوی با اعمال ورودی به ۱..... ۵۹
شکل۵-۲: رفتار زمانی یک تشدیدکننده حلقوی با اعمال ورودی به ۲..... ۶۰
شکل۵-۳: رفتار زمانی یک تشدیدکننده حلقوی در ابـتدا، وسط و انتهای بازو..... ۶۱
شکل۵-۴: دیاگرام کلی یک نمونه سوییچ از حلقه‌های A,T برای چیدمان ATA ۶۳
شکل۵-۵: رفتار زمانی شدت خروجی برای تشدیدکننده T ۶۴
شکل۵-۶: رفتار زمانی شدت خروجی برای چیدمان AAA ۶۵
شکل۵-۷: رفتار زمانی شدت خروجی برای چیدمان ATA ۶۶
شکل۵-۸: رفتار زمانی شدت خروجی برای چیدمان TAA ۶۶
شکل۵-۹: رفتار زمانی شدت خروجی برای چیدمان TAT ۶۷
شکل۵-۱۰: رفتار زمانی شدت خروجی برای چیدمان TTT ۶۷
شکل۵-۱۱: طرح کلی از آرایش سوییچ با حلقه‌هایABCDE ۶۸
شکل۵-۱۲: طرح کلی از آرایش سوییچ با حلقه‌هایDADAD ۶۹
شکل۵-۱۳: رفتار زمانی شدت خروجی برای چیدمان ABCDE ۷۰

شکل۵-۱۴: رفتار زمانی شدت خروجی برای چیدمان EDCBA ۷۰
شکل۵-۱۵: رفتار زمانی شدت خروجی برای چیدمان DADAD ۷۱
شکل۵-۱۶: رفتار زمانی شدت خروجی برای چیدمان AADDD ۷۲
شکل۵-۱۷: رفتار زمانی شدت خروجی برای چیدمان DDDAA ۷۲
شکل۵-۱۸: رفتار زمانی سوییچ نوری با آرایه (۲×۳) با $N_{sat}=0, N_I=0$ ۷۵
شکل۵-۱۹: رفتار زمانی سوییچ نوری با آرایه (۲×۳) با $N_{sat}=1\times0^{-14}, N_I=0$ ۷۵
شکل۵-۲۰: رفتار زمانی سوییچ نوری با آرایه (۲×۳) با $N_{sat}=2\times0^{-14}, N_I=0$ ۷۶
شکل۵-۲۱: رفتار زمانی سوییچ نوری با آرایه (۲×۳) با $N_{sat}=4\times0^{-14}, N_I=0$ ۷۶
شکل۵-۲۲: رفتار زمانی سوییچ نوری با آرایه (۲×۳) با $N_{sat}=1\times0^{-14}, N_I=1\times0^{-18}$ ۷۷
شکل۵-۲۳: رفتار زمانی سوییچ نوری با آرایه (۲×۳) با $N_{sat}=1\times0^{-14}, N_I=2\times0^{-18}$ ۷۷
شکل۵-۲۴: تابع انتقال سوییچ نوری با یک تشدیدکننده حلقوی با $\varepsilon_r=12.96$ و $n_o=1.4$ ۷۸

فصل ۱- مقدمه

۱-۱- پیشگفتار

در این فصل پس از بیان انگیزه‌ی تحقیق بر روی سوییچ تمام‌نوری[1] مبتنی بر کریستال‌های فوتونی[2]، تاریخچه تحقیقات بر روی کریستال‌های فوتونی و سوییچ‌های نوری بیان می‌شود. سپس دست‌آوردهای جدید در این رساله ارایه می‌شود. در پایان نیز مروری اجمالی بر نتایج رساله خواهیم داشت.

۱-۲- انگیزش

نیاز روزافزون به پردازش، ذخیره‌سازی و مخابره هرچه بیشتر اطلاعات، رویکرد به فرکانس‌های نوری را اجتناب‌ناپذیر کرده است. به بیان دیگر، توسعهٔ بیشتر فن‌آوری اطلاعات، تنها با گذر از الکترونیک به فوتونیک امکان‌پذیر خواهد شد؛ زیرا نور خواص زیادی است که برای پردازش اطلاعات، جالب توجه است. بعضی از این ویژگی‌های مهم عبارتند از: سرعت یا پهنای باند زیاد، قابلیت بالای موازی شدن، طبیعت موجی بودن نور، پاسخ غیرخطی برخی مواد نسبت به نور، مصونیت در مقابل تداخل میدان‌های الکترومغناطیسی و در نتیجه امنیت بیشتر در برابر تداخل و نویز، راحتی هدایت سیگنال‌های نوری، و در پایان سادگی ارتباط با الکترونیک[۱].

باوجود مزایای متعدد فوتون‌ها نسبت به الکترون‌ها، در راه دستیابی به مدارات مجتمع تمام نوری، مشکلات متعددی چون اتلاف زیاد موجبرهای نوری در گوشه‌ها، هدایت نور در جهت‌های دلخواه و به میزان دلخواه، میزان زیاد گسیل خودبخودی در لیزرها و نبود عملکرد ترانزیستوری در سیستم‌های نوری وجود دارد[۲]. با ظهور کریستال‌های فوتونی مقدار زیادی از این مشکلات حل شده است. کریستال‌های فوتونی ساختارهای متناوبی از مواد هستند که ثابت دی‌الکتریک آن‌ها به طور متناوب و به صورت فضایی در جهت‌های مشخص تغییر می‌کنند. مهمترین خاصیت مورد توجه در کریستال‌های فوتونی، این است که نور نمی‌تواند در یک یا چند گستره فرکانسی خاص در داخل کریستال منتشر شود به همین دلیل به آن باند توقف[3] یا گاف ممنوعه[4] یا گاف فوتونی[5] می‌گویند[۲-۵]. از این رو جالب‌ترین و مهمترین کاربرد کریستال‌های فوتونی در مخابرات نوری است. با استفاده از این خاصیت ذاتی می‌توان به طراحی سوییچ‌ها، فیلترها، مالتی‌پلکسرها و دیگر افزاره‌ها دسترسی پیدا کرد[۶-۸].

از جمله بلوک های ساختاری که شبکه‌های مخابراتی و معماری‌های محاسباتی بر پایه‌ی آن بنا نهاده شده‌اند، واحدهای سوییچینگ با کیفیت بالا و کارآمد هستند. واحدهای سوییچینگ کارآمد، برای حوزه

---

[1] -all-optical
[2] -photonic crystals (Phc)
[3] -stop band
[4] -band gap
[5] -photonic gap

های محاسباتی و مخابرات نوری نه تنها باید دارای پاسخ بسیار سریع و مصرف کم انرژی باشند، بلکه باید توانایی مجتمع شدن را در چندین کانال مخابراتی و بلوک‌های عملیاتی دیگر داشته باشند[۱۰,۹]. اگر چه تاکنون تلاش‌های بسیاری صورت گرفته است، اما هیچ کدام از روش‌های ارائه شده برای پیاده‌سازی چنین واحدهای سوییچینگ که به طور هم زمان همه این مشخصات را دارا باشند، گزارش نشده‌اند.

با داشتن این ایده‌ها، در پی طراحی یک ساختار سوییچ تمام نوری مبتنی بر کریستال‌های فوتونی شدیم تا کنترل نور به گونه‌ای صورت گیرد که ساختار علاوه بر اینکه دارای خصوصیات سرعت زیاد، توان مصرفی کم و ابعاد کوچک باشد، قابلیت مجتمع‌شدن درون یک تراشه مناسب برای سیستم‌های WDM را نیز دارا باشد.

۱-۳- تاریخچه

بیش از ۷۰ سال است که صفحات ربع طول موج یا آینه‌های دی‌الکتریک چندلایه بطور وسیعی در اپتیک (مثل کاواک لیزر) بکار می‌رود. آنها چیزی جز مثال‌هایی از کریستال‌های فوتونی یک بعدی نیستند. ولی کریستال‌های فوتونی یک بعدی فقط برای اهداف محدودی مفیدند. در مقابل این واقعیت که با استفاده از کریستال‌های فوتونی دو بعدی و سه بعدی می‌توان نور را به صورت خیلی آزادانه‌تر کنترل کرد، برای اولین بار به صورت تئوری در دو مقاله‌ی مستقل در سال ۱۹۸۷ توسط یابلونوویچ[۱] و جان[۲] بررسی و اثبات شد[۱۲,۱۱].

بعد از سال ۱۹۸۷، ساختارهای کریستال‌های فوتونی (PhC) جایگاه مهمی برای توسعه قطعات جدید جهت اپتیک مجتمع پیدا کردند[۱-۵]؛ زیرا همان‌طوری که حالت تناوبی کریستال‌های حالت جامد، تعیین‌کننده باندهای انرژی و خواص رسانایی الکترون‌ها است، حالت تناوبی مواد نوری نیز در مقیاس طول موج، بطور متناظر با باند فوتونی و انتشار فوتون‌ها در این مواد قرار دارد. یعنی درست به همان گونه‌ای که اتم‌های یک کریستال طبیعی باعث تفرق الکترون‌ها می‌شوند، به‌طور مشابه انتظار می‌رود که بتوان به کمک کریستال‌های فوتونی به تحقق ادوات مشابه با ادوات الکترونی اقدام نمود[۵]. یابلونوویچ پیش‌بینی نمود که کریستال سه بعدی دارای باند توقف کامل است، یعنی باند توقف آن به جهت انتشار نور بستگی ندارد و در سال ۱۹۹۰ اولین ساختاری که عملاً این مطلب را تایید کند، ساخته شد[۱۳]. پس از آن یابلونوویچ و همکارانش ساختاری شبیه کریستال الماس ارائه کردند که به یابلونوایت مشهور شد[۱۴]. از آنجایی که روش های ساخت کریستال‌های فوتونی دوبعدی نسبت به نوع سه بعدی آسان‌تر است و بسیاری از خصوصیات کریستال سه بعدی را نیز دارند، بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند.

یکی از مزیت‌های مهم کریستال‌های فوتونی، کاربرد آنها در ایجاد هدایت نور به عنوان موجبر به جای فیبرهای نوری متداول است. با ایجاد نقص[۳] مناسب در شبکه کریستال (نقص خطی راست و خمیده) می‌توان موجبرهایی را طراحی کرد که فرکانس‌های واقع در محدوده باند توقف را در مسیر دلخواه هدایت

1 -E. Yablonovitch
2 -S. John
3 -defect

نمایند[۱۵-۲۰]. در این حالت می‌توان نور را بجای اینکه در دی‌الکتریک انتشار یابد در داخل خلا یا هوا هدایت نمود؛ در این صورت اثرات غیرخطی و تلفات به حد بسیار ناچیزی می‌رسد[۲۲,۲۱]. با ایجاد نقص نقطه‌ای در کریستال فوتونی، حفره به وجود می‌آید که همانند یک کاواک با ضریب کیفیت بالا عمل می‌کند. از حفره‌ها در ساخت فیلترها، مالتی پلکسرها، لیزر و دیودهای نوری استفاده فراوان می‌شود. [۲۳-۲۵].

کریستال‌های فوتونی غیرخطی به دلیل ماهیت ذاتیشان، یعنی وابستگی انتشار موج به شدت میدان، دارای این قابلیت هستند که در واکنش با جریان فوتون‌ها از خود رفتاری متفاوت با کریستال‌های فوتونی خطی نشان می‌دهند؛ به همین دلیل پدیده‌های فیزیکی منحصر به فردی در این کریستال‌ها مشاهده می‌شود که در کریستال فوتونی خطی، قابل مشاهده نیست. به عنوان مثال، پالس‌های نوری منتشر شونده در کریستال فوتونی غیرخطی، در حالت‌های خاص می‌توانند پالس‌های شبه سالیتونی تشکیل دهند که بدون تغییر شکل با سرعت‌هایی بین صفر و سرعت نور، در کریستال منتشر شوند[۲۶]. همچنین می‌توان به یکی از پدیده‌های غیرخطی مشاهده شده در موجبرهای تزویج شده، یعنی سالیتون‌های گسسته[1] اشاره نمود. در این گونه موجبرها، برای امواج نوری با شدت کم، موج در حین انتشار به دلیل تزویج موجود بین موجبرها، به سرعت در تمامی موجبرها پخش می‌شود؛ اما، هنگامی که شدت موج به حدی باشد که آثار غیرخطی ایجاد شوند، موج تنها در تعداد محدودی از موجبرها یا تنها در یک موجبر فشرده و منتشر می‌شود. امواجی که در این حالت در موجبرها شکل می‌گیرند، در اصطلاح سالیتون گسسته نامیده می‌شوند. همچنین با استفاده از کریستال‌های فوتونی غیرخطی می‌توان مسیر انتقال، شکل پالس، طیف و فاز یک پرتو یا باریکه را توسط باریکه دیگر کنترل نمود[۲۶]. با این وصف، بدون بهره‌گیری از مواد غیرخطی در ساخت کریستال‌های فوتونی، امکان تحقق بسیاری از ادوات وجود نخواهد داشت. به عنوان مثال، تنها به کمک کریستال‌های فوتونی غیرخطی است که می‌توان به ساخت سوییچ‌های تمام‌نوری پرداخت، سوییچ‌هایی که در آنها برای قطع و وصل جریان فوتون‌ها از یک باریکه نور کنترل‌کننده استفاده می‌شود[۱].

درسال‌های اخیر، فناوری فوتونیک در سیستم‌های سوییچینگ توسعه نسبتاً زیادی یافته است[۲۷]. یک سوییچ وسیله‌ای است که در مسیرهای انتقال یک سیستم مخابراتی و یا پردازشی، اتصالات لازم را قطع یا وصل می‌کند. همچنین به عنوان واحد کنترلی عمل می‌کند که وظیفه بررسی دستورات مربوط به اتصالات را به‌عهده دارد. کار این واحد فرستادن سیگنال کنترلی مورد نظر برای راه‌اندازی سوییچ در وضعیت دلخواه است. یک سوییچ با پارامترهای زیر مشخص می‌شود:

اندازه: (تعداد خطوط ورودی وخروجی) و جهت (انتقال داده در یک یا چند جهت)

زمان سوییچینگ: (زمان لازم برای سوییچ تا بتواند از یک حالت به حالت دیگر تغییرشکل بدهد)

زمان تأخیر انتشار: (زمانی که طول می‌کشد تا سیگنال از سوییچ بگذرد)

---

[1]-discrete soliton