



دانشگاه شیراز  
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان نامه دوره‌ی کارشناسی ارشد در رشته‌ی مهندسی برق (الکترونیک)

طراحی و شبیه سازی کریستال فوتونی برای مدولاسیون فاز نور براساس  
خاصیت غیرخطی

به کوشش

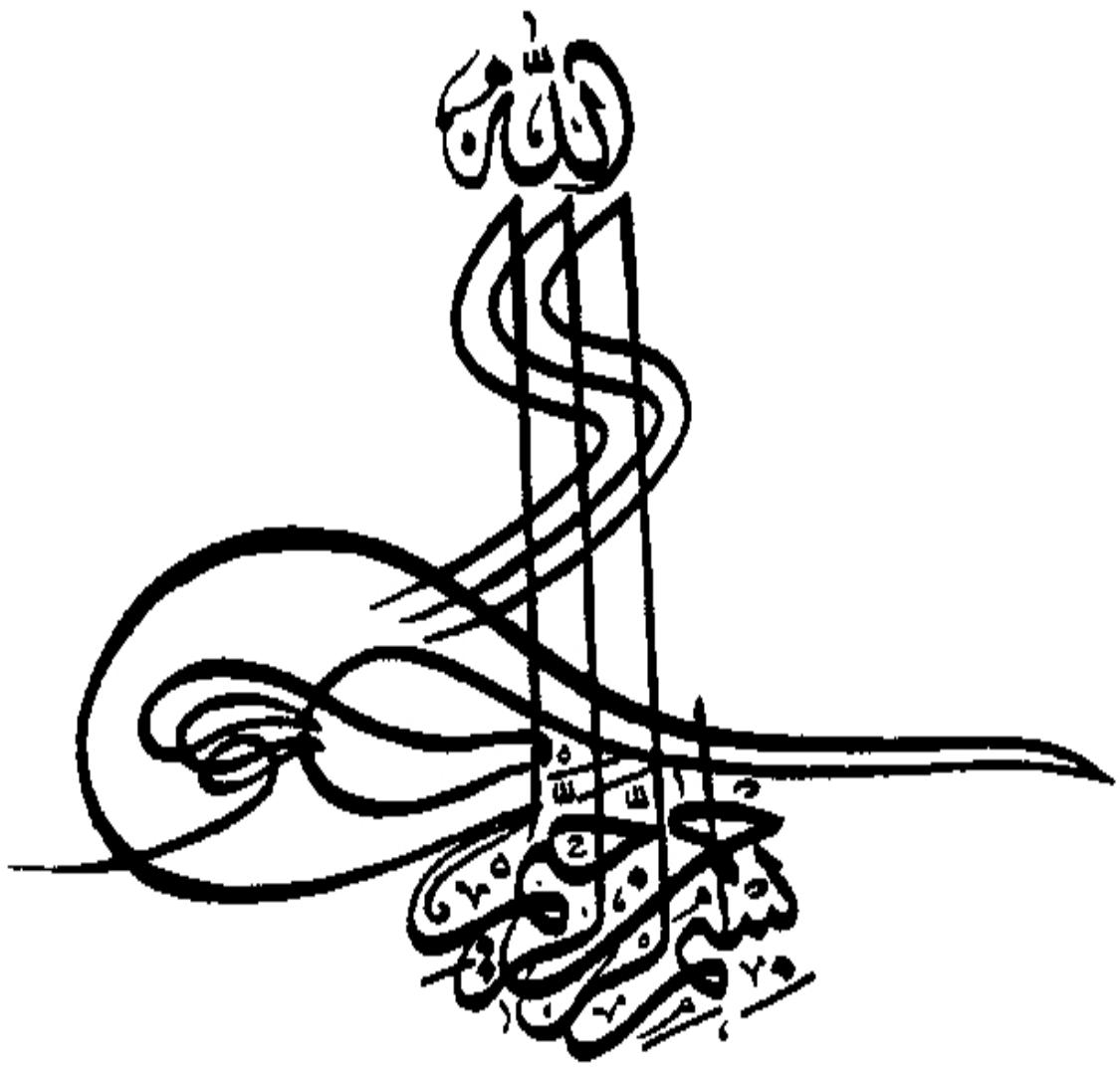
شهرام بهادری حقیقی

استاد راهنما

دکتر رحیم غیور

بهمن ماه 1390






به نام خدا

## اظهارنامه

اینجانب شهرام بهادری حقیقی (۸۸۰۶۳۰) دانشجوی رشته‌ی مهندسی برق (الکترونیک) اظهار می‌دارم که این پایان‌نامه حاصل پژوهش خودم بوده و در جاهایی که از منابع دیگران استفاده کرده‌ام، نشانی دقیق و مشخصات کامل آن را نوشته‌ام. همچنین اظهار می‌دارم که تحقیق و موضوع پایان‌نامه تکراری نیست و تعهد می‌نمایم که بدون مجوز دانشگاه دستاوردهای آن را منتشر ننموده و یا در اختیار غیر قرار ندهم. کلیه حقوق این اثر مطابق با آیین‌نامه مالکیت فکری و معنوی متعلق به دانشگاه شیراز است.

نام و نام خانوادگی: شهرام بهادری حقیقی

تاریخ و امضاء: ۹۱/۷/۷



به نام خدا

طراحی و شبیه سازی کریستال فوتونی برای مدولاسیون فاز نور براساس  
خاصیت غیرخطی

به کوشش  
شهram بهادری حقیقی

پایان نامه

ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه شیراز به عنوان بخشی از  
فعالیت‌های تحصیلی لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته‌ی  
مهندسی برق-الکترونیک  
از دانشگاه شیراز  
شیراز  
جمهوری اسلامی ایران

ارزیابی کمیته پایان نامه، با درجه‌ی: عالی

دکتر رحیم غیور، استاد بخش برق و الکترونیک (رئیس کمیته)

دکتر حبیب اله عبیری، استاد بخش برق و الکترونیک

دکتر عباس ظریفکار، دانشیار بخش برق و الکترونیک

بهمن‌ماه ۱۳۹۰

«سپاس خدایی را که اول است بی آنکه پیش از او اولی باشد و آخر است بی آنکه پس از او آخری باشد؛ خدایی که دیده‌های بینندگانش از دیدنش فروماند، و اندیشه‌ی وصف‌کنندگان و صفش نتواند...»

صحیفه‌ی سجاده - نیایش یکم

## سپاسگزاری

نهایت احترام و سپاس خود را به استاد کرامت‌دور و فریخته‌تام، جناب آقای دکتر غفور که برایم نه تنها آموزنده‌ی دانش بلکه مرجع اخلاق و تعهد هستند، تقدیم می‌نمایم. همچنین از تمامی اساتید ارجمندم در دانشکده‌ی برق و کامپیوتر دانشگاه شیراز شکر می‌نمایم. بر خود لازم می‌دانم از مادر فداکار و پدر مهربانم که هر آنچه که داشته‌ام و خواهم داشت مرمون زحمات بی دریغ آنان است، قدر دانی‌نمایم. همچنین از همسر عزیزم که همواره و در طول انجام این پایان‌نامه در کنارم بوده و یاریم رسانند، ممنونم.

## چکیده

# طراحی و شبیه سازی کریستال فوتونی برای مدولاسیون فاز نور براساس خاصیت غیرخطی

به کوشش

شهرام بهادری حقیقی

در این پایان نامه مدولاسیون فاز نور با استفاده از موجبرهای کریستال فوتونی بر مبنای خاصیت غیرخطی بررسی گردیده است. در ابتدا کریستال‌های فوتونی به عنوان یک کلاس جدید از محیط‌های اپتیکی معرفی و نحوه تشکیل یک موجبر با ایجاد نقص خطی در این ساختارها بیان شده است. انتشار نور با فرکانسهای محدوده‌ی باند ممنوعه‌ی فوتونی نیز نمایش داده شده است. سپس در مورد اثر نور کند بعنوان یکی از قابلیت‌های موجبرهای کریستال فوتونی و نقش آن در کوچک کردن ابعاد ادوات اپتیکی مانند مدولاتورهای مبتنی بر خواص غیرخطی بحث شده است. علاوه بر این، بر مبنای اثر نور کند کاهش شدت سیگنال نوری جهت مدولاسیون فاز صورت گرفته است. به منظور طراحی موجبرهای کریستال فوتونی و انتخاب نقطه کار مناسب با حداقل پراکندگی سرعت گروه، نمودار پاشندگی آنها بررسی شده است. پس از معرفی اثر غیرخطی مرتبه سوم (اثر Kerr) و نقش آن در تغییر ضریب شکست ماده، از این اثر در موجبرهای طراحی شده جهت انجام مدولاسیون فاز نور استفاده شده است. علاوه بر تحلیل و شبیه سازی دو مدولاتور موجبر کریستال فوتونی، یک مدولاتور موجبر جدید با اثر نور کند قوی‌تر نیز پیشنهاد شده است. مشاهده شده است که اثر نور کند در موجبرهای کریستال فوتونی، باعث کاهش طول و شدت نور مورد نیاز جهت مدولاسیون می‌شود؛ اما این مزایا به قیمت کاهش پهنای باند قابل دسترس میباشند. در نهایت، تحلیل زمانی موجبرهای کریستال فوتونی توسط روش اختلاف محدود حوزه‌ی زمان (FDTD) انجام شده و شیفت فازهای مختلف پالس‌های نوری با دامنه‌های متفاوت نمایش داده شده است. همچنین ضریب گروه، طول مورد نیاز برای شیفت فاز  $\pi$ ، شدت نور لازم و پهنای باند قابل دسترس سه مدولاتور موجبر کریستال فوتونی شبیه سازی شده، با هم مقایسه شده اند.

# فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	<b>فصل اول: مقدمه</b>
۲	1-1 مدولاسیون نوری
۴	2-1 معرفی کریستال‌های فوتونی
۶	1-2-1 نمودار پاشندگی کریستال فوتونی
۱۲	2-2-1 خواص مقیاس‌بندی معادله‌های ماکسول و کریستال فوتونی
۱۴	3-2-1 موجبرهای کریستال فوتونی
۱۶	4-2-1 خاصیت نور کند در موجبرهای کریستال فوتونی
۱۹	1-4-2-1 مقیاس‌بندی بر هم کنش‌های خطی با فاکتور کند شونده
۲۰	2-4-2-1 مقیاس‌بندی شدت نور با فاکتور کند شونده
	<b>فصل دوم: پیشینه‌ی تحقیق</b>
۲۶	1-2 مدولاتورهای ارائه شده مبتنی بر موجبرهای معمولی
۳۰	2-2 مدولاتورهای ارائه شده مبتنی بر موجبرهای کریستال فوتونی
۳۵	1-2-2 مدولاتورهای مبتنی بر موجبرهای کریستال فوتونی با خاصیت نور کند
	<b>فصل سوم: معرفی اثر غیرخطی و روشهای تحلیل ساختارهای کریستال فوتونی</b>
۳۹	1-3 ضریب شکست



- 2-3 اثر غیر خطی Kerr ..... ۴۱
- 3-3 روش بسط امواج صفحه ای ..... ۴۵
- 1-3-3 سلول واحد ..... ۴۶
- 2-3-3 شبکه‌ی متقابل ..... ۴۸
- 4-3 روش المان محدود ..... ۵۲
- 5-3 روش اختلاف محدود حوزه‌ی زمان ..... ۵۵
- 1-5-3 تعریف توزیع تابع دی‌الکتریک ساختار ..... ۵۸
- 2-5-3 پایداری روش FDTD ..... ۵۹
- 6-3 نرم افزار Meep ..... ۶۰

### فصل چهارم: طراحی و شبیه‌سازی مدولاتورهای فاز کریستال فوتونی

- 1-4 مدولاتور موجبر کریستال فوتونی با میله‌های دی‌الکتریک شعاع کم شده ..... ۶۵
- 1-1-4 نمودارهای پاشندگی موجبر ..... ۶۶
- 2-1-4 تحلیل مد انتشاری، محاسبه‌ی طول و شدت نور مورد نیاز جهت مدولاسیون فاز در موجبر ..... ۷۱
- 3-1-4 تحلیل زمانی موجبر در نرم‌افزار Meep ..... ۷۷
- 2-4 مدولاتور موجبر کریستال فوتونی کاواک کوپل شده‌ی اول ..... ۸۳
- 1-2-4 نمودارهای پاشندگی موجبر ..... ۸۵
- 2-2-4 تحلیل مد انتشاری و محاسبه‌ی طول مورد نیاز جهت مدولاسیون فاز در موجبر ..... ۸۹
- 3-2-4 تحلیل زمانی موجبر در نرم‌افزار Meep ..... ۹۱
- 3-4 مدولاتور موجبر کریستال فوتونی کاواک کوپل شده پیشنهادی ..... ۹۴
- 1-3-4 نمودارهای پاشندگی موجبر ..... ۹۵
- 2-3-4 تحلیل مد انتشاری و محاسبه‌ی طول مورد نیاز جهت مدولاسیون فاز در موجبر ..... ۹۸
- 3-3-4 تحلیل زمانی موجبر در نرم‌افزار Meep ..... ۱۰۱
- 4-4 مقایسه سه ساختار مدولاتور فاز بحث شده ..... ۱۰۶

## فصل پنجم: جمع‌بندی و پیشنهادات

- ۱۰۹.....نتیجه‌گیری 1-5
- ۱۱۰.....پیشنهاداتی جهت تحقیقات آتی 2-5
- ۱۱۱.....فهرست منابع و مآخذ

# فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: مشخصه‌ی ورودی- خروجی یک سوییچ تمام نوری روشن- خاموش.....	۳
شکل ۱-۲: مشخصه‌ی پراکندگی محیط یکنواخت و محیط تناوبی یک بعدی (Adibi et al., 2009) ...	۸
شکل ۱-۳: (الف) سلول واحد کریستال فوتونی با آرایش مربعی شامل میله‌های دی‌الکتریک با $\epsilon_r = 8.9$ در هوا، (ب) نمودار پاشندگی برای امواج با پلاریزاسیون TM و (ج) پلاریزاسیون TE ..	۱۰
شکل ۱-۴: الگوی توزیع میدان الکتریکی در کریستال فوتونی شامل میله‌های دی‌الکتریک در هوا برای امواج با پلاریزاسیون TM، (الف) نظیر باند اول و (ب) باند دوم.....	۱۱
شکل ۱-۵: الگوی توزیع میدان مغناطیسی در کریستال فوتونی شامل میله‌های دی‌الکتریک در هوا برای امواج با پلاریزاسیون TE، (الف) نظیر باند اول و (ب) باند دوم.....	۱۱
شکل ۱-۶: نمودار پاشندگی کریستال فوتونی با آرایش مربعی شامل حفره‌های هوا در دی‌الکتریک با $\epsilon_r = 13$ برای امواج با پلاریزاسیون (الف) TM و (ب) TE ..	۱۲
شکل ۱-۷: موجبر کریستال فوتونی W1 شامل میله‌های دی‌الکتریک در هوا (Joannopoulos et al., 2008) ..	۱۴
شکل ۱-۸: (الف) سلول واحد موجبر کریستال فوتونی W1 شامل میله‌های دی‌الکتریک در هوا، (ب) مش‌بندی صورت گرفته توسط نرم افزار COMSOL و (ج) نمودار پاشندگی موجبر برای پلاریزاسیون TM ..	۱۵
شکل ۱-۹: توزیع میدان الکتریکی مد انتشاری (الف)، مد لایه‌ی دی‌الکتریک (ب) و مد لایه‌ی هوا (ج) در سلول واحد موجبر برای پلاریزاسیون TM ..	۱۶
شکل ۱-۱۰: خم با زاویه‌ی $90^\circ$ در موجبر کریستال فوتونی.....	۱۶
شکل ۱-۱۱: نمایش دو مکانیزم ممکن برای دستیابی به خاصیت نور کند در موجبرهای کریستال فوتونی: (چپ) تفرق به عقب و (راست) انعکاس همه جهته (Krauss, 2007) ..	۱۷
شکل ۱-۱۲: نمایش تفاوت بین اثر تغییر ضریب شکست ماده و تغییر ضریب مدی موثر در ناحیه‌ی نور کند (Krauss, 2007) ..	۱۹

- شکل ۱-۱۳: شمای کلی فشرده شدن پالس و افزایش شدت نور آن بعد از ورود به محیط با خاصیت نور کند (Krauss, 2007) ..... ۲۱
- شکل ۱-۱۴: جابه‌جا کردن افقی دو ردیف کناری حفره‌های موجبر جهت دستیابی به خاصیت نور کند (Hao et al., 2010) ..... ۲۳
- شکل ۱-۱۵: شمای یک موجبر کاواک کوپل شده P=Positive ,N=Negative ..... ۲۳
- شکل ۱-۲: انواع مختلف سلولهای Pockels ([www.rp-photonics.com](http://www.rp-photonics.com)) ..... ۲۵
- شکل ۲-۲: یک نمونه مدولاتور موجبر الکترواپتیکی ([www.rp-photonics.com](http://www.rp-photonics.com)) ..... ۲۶
- شکل ۲-۳: شمای موجبر الکترواپتیکی پیاده‌سازی شده (Gill et al., 1997) ..... ۲۷
- شکل ۲-۴: شمای سطح مقطع مدولاتور با حوزه‌های معکوس LiNbO<sub>3</sub> (Lucci et al., 2007) ..... ۲۷
- شکل ۲-۵: شمای یک سویچ ماخ‌زندر غیر خطی (Sirivastava et al., 2010) ..... ۲۹
- شکل ۲-۶: شمای ساختار تداخلی ماخ‌زندر و موجبر تمام نوری (Wu et al., 2007) ..... ۳۰
- شکل ۲-۷: شمای مدولاتور مبتنی بر اثر ترمواپتیک، قسمت روشن‌تر محل اعمال حرارت است (Tinker et al., 2005) ..... ۳۱
- شکل ۲-۸: مولفه‌ی میدان مغناطیسی پرتو نور 1550nm در دمای (الف) 25 °C و (ب) 440 °C (Tinker et al., 2005) ..... ۳۲
- شکل ۲-۹: شمای مدولاتور کریستال فوتونی تشکیل شده از دیود p-i-n مبتنی بر اثر حامل‌های آزاد از (الف) نمای سطح مقطع و (ب) نمای بالا (Li, 2008) ..... ۳۲
- شکل ۲-۱۰: شمای مدولاتور موجبر کریستال فوتونی در ساختار ماخ‌زندر (Jiang et al., 2007) ..... ۳۳
- شکل ۲-۱۱: شمای مدولاتور ماخ‌زندر کریستال فوتونی دورگه‌ی سیلیکان-پلیمر از (الف) نمای بالا و (ب) نمای سطح مقطع (Wang et al., 2008) ..... ۳۴
- شکل ۲-۱۲: شمای مدولاتور ماخ‌زندر مبتنی بر اثر الکترواپتیک Pockels (Brosi et al., 2008) ..... ۳۵
- شکل ۲-۱۳: مدولاتور ماخ‌زندر کریستال فوتونی مبتنی بر اثر Kerr در (الف) حالت روشن و (ب) حالت خاموش (Soljačić et al., 2002) ..... ۳۶
- شکل ۳-۱: پروسه‌ی مشخص کردن سلول واحد کریستال فوتونی دو بعدی (Adibi et al., 2009) ..... ۴۷
- شکل ۳-۲: انتخاب‌های ممکن بردارهای اولیه‌ی شبکه‌ی مربعی (Adibi et al., 2009) ..... ۴۷
- شکل ۳-۳: نمونه‌ی مش بندی انجام شده (الف) ساختار دو بعدی و (ب) سه بعدی در روش المان محدود (Hiatt, 2002) ..... ۵۴
- شکل ۳-۴: مش سه‌بعدی و شمای محاسبات در یک سلول مورد استفاده در روش FDTD (Adibi et al., 2009) ..... ۵۷

- شکل ۳-۵: (الف) روش پله‌ای یا مستقیم و (ب) روش متوسط گیری ثابت دی‌الکتریک برای مش بندی لیه‌ها در روش FDTD (Hess et al., 2003) ..... 59
- شکل ۴-۱: شمای موجبر کریستال فوتونی با میله‌های دی‌الکتریک شعاع کم شده (Fujisawa et al., 2006) ..... 65
- شکل ۴-۲: (الف) سلول واحد کریستال فوتونی مثلثی بکار گرفته شده در موجبر، (ب) نمودار پاشندگی پلاریزاسیون TM و (ج) پلاریزاسیون TE ..... 66
- شکل ۴-۳: (الف) سلول واحد کریستال فوتونی موجبر، (ب) مش بندی صورت گرفته توسط نرم‌افزار COMSOL و (ج) نمودار پاشندگی موجبر ..... 68
- شکل ۴-۴: توزیع میدان الکتریکی مدهای لایه‌های (الف) دی‌الکتریک، (ب) هوا و (ج) مد انتشاری .. 70
- شکل ۴-۵: جابه‌جایی مد انتشاری به سمت فرکانس‌های بالاتر با کاهش شعاع میله‌های دی‌الکتریک نقص خطی ..... 70
- شکل ۴-۶: هدایت پرتو نور با فرکانس نظیر مد انتشاری در امتداد نقص خطی موجبر ..... 71
- شکل ۴-۷: جابه‌جایی ایجاد شده در محل مد انتشاری ناشی از تغییرات ضریب شکست میله‌های دی‌الکتریک نقص خطی ..... 73
- شکل ۴-۸: نمودار ضریب گروه مد انتشاری ..... 73
- شکل ۴-۹: تغییرات بردار موج متفاوت مولفه‌های مختلف فرکانسی در لبه‌ی ناحیه‌ی بریلوین ..... 74
- شکل ۴-۱۰: نمودار پارامتر پراکندگی سرعت گروه مد انتشاری ..... 74
- شکل ۴-۱۱: نمای نزدیکتر نمودار شکل ۴-۷ در حوالی  $\frac{a}{\lambda} = 0.25$  ..... 75
- شکل ۴-۱۲: هدایت پالس نوری با طول موج مرکزی  $1.55 \mu\text{m}$  (الف) از نمای دور و (ب) نمای نزدیک ..... 78
- شکل ۴-۱۳: نتیجه‌ی شبیه سازی زمانی موجبر برای شیفیت فاز  $\pi$  از نمای دور ..... 79
- شکل ۴-۱۴: نتیجه‌ی شبیه سازی زمانی موجبر برای شیفیت فاز  $\pi$  از نمای نزدیک ..... 79
- شکل ۴-۱۵: نتیجه‌ی شبیه سازی زمانی موجبر برای شیفیت فاز  $3\pi/4$  از نمای دور ..... 80
- شکل ۴-۱۶: نتیجه‌ی شبیه سازی زمانی موجبر برای شیفیت فاز  $3\pi/4$  از نمای نزدیک ..... 80
- شکل ۴-۱۷: نتیجه‌ی شبیه سازی زمانی موجبر برای شیفیت فاز  $\pi/2$  از نمای دور ..... 81
- شکل ۴-۱۸: نتیجه‌ی شبیه سازی زمانی موجبر برای شیفیت فاز  $\pi/2$  از نمای نزدیک ..... 81
- شکل ۴-۱۹: نتیجه‌ی شبیه سازی زمانی موجبر برای شیفیت فاز  $\pi/4$  از نمای دور ..... 82
- شکل ۴-۲۰: نتیجه‌ی شبیه سازی زمانی موجبر برای شیفیت فاز  $\pi/4$  از نمای نزدیک ..... 82
- شکل ۴-۲۱: پهن شدگی ایجاد شده در طیف پالس پرتو نور تابشی ناشی از مدولاسیون فاز خودی ..... 83
- شکل ۴-۲۲: موجبر کریستال فوتونی کاواک کوپل شده پیشنهادی توسط Yariv et al ..... 84

- شکل ۴-۲۳: موجبر کاواک کوپل شده مورد استفاده جهت مولاسیون فاز نور توسط Soljačić et al ۸۵.
- شکل ۴-۲۴: (الف) سلول واحد کریستال فوتونی بکار گرفته شده در موجبر کاواک کوپل شده، (ب) نمودار پاشندگی پلاریزاسیون TM و (ج) پلاریزاسیون TE ..... ۸۶
- شکل ۴-۲۵: (الف) سلول واحد موجبر کریستال فوتونی کاواک کوپل شده پیشنهاد شده توسط Soljačić et al و (ب) نمودار پاشندگی موجبر ..... ۸۷
- شکل ۴-۲۶: توزیع میدان الکتریکی مدهای لایه‌های (الف) دی الکتریک، (ب) هوا و (ج) مد انتشاری ..... ۸۸
- شکل ۴-۲۷: هدایت پرتو نور با فرکانس نظیر مد انتشاری از طریق کاواک‌های کوپل شده ..... ۸۸
- شکل ۴-۲۸: جابه‌جایی ایجاد شده در محل مد انتشاری ناشی از تغییر ضریب شکست میله‌های دی الکتریک نقص‌های نقطه‌ای ایجاد شده (الف) از نمای دور و (ب) از نمای نزدیک ..... ۸۹
- شکل ۴-۲۹: ضریب گروه مد انتشاری کاواک کوپل شده ..... ۹۰
- شکل ۴-۳۰: پارامتر پراکندگی سرعت گروه مد انتشاری موجبر کاواک کوپل شده‌ی اول ..... ۹۱
- شکل ۴-۳۱: هدایت پالس نوری با طول موج مرکزی  $1.55 \mu\text{m}$  توسط موجبر کاواک کوپل شده‌ی اول از (الف) نمای دور و (ب) نمای نزدیک ..... ۹۲
- شکل ۴-۳۲: نتیجه‌ی شبیه‌سازی زمانی موجبر کاواک کوپل شده‌ی اول برای شیفیت فاز  $\pi$  از نمای دور ۹۲
- شکل ۴-۳۳: نتایج شبیه‌سازی زمانی موجبر کاواک کوپل شده‌ی اول برای شیفیت فاز  $\pi$  از نمای نزدیک ..... ۹۳
- شکل ۴-۳۴: پهن‌شدگی ایجاد شده در طیف پالس پرتو نور تابشی به موجبر کاواک کوپل شده‌ی اول ناشی از مدولاسیون فاز خودی نور ..... ۹۳
- شکل ۴-۳۵: (الف) موجبر ساده کریستال فوتونی با آرایش مربعی، (ب) بزرگ کردن شعاع میله‌های دی الکتریک ردیف‌های بالا و پایین نقص خطی با تناوب  $\Lambda=3a$  ..... ۹۴
- شکل ۴-۳۶: (الف) سلول واحد کریستال فوتونی بکار گرفته شده در موجبر کاواک کوپل شده شکل ۴-۳۵، (ب) نمودار پاشندگی برای پلاریزاسیون TM و (ج) پلاریزاسیون TE ..... ۹۵
- شکل ۴-۳۷: (الف) سلول واحد مدولاتور موجبر کریستال فوتونی کاواک کوپل شده پیشنهادی و (ب) نمودار پاشندگی موجبر ..... ۹۶
- شکل ۴-۳۸: توزیع میدان الکتریکی مدهای لایه‌های (الف) دی الکتریک و (ب) هوا ..... ۹۷
- شکل ۴-۳۹: توزیع میدان الکتریکی مدهای انتشاری ..... ۹۷
- شکل ۴-۴۰: جابه‌جایی در مد انتشاری ششم ناشی از تغییر شعاع کاواک  $R'$  جهت تنظیم سرعت گروه ..... ۹۸
- شکل ۴-۴۱: (الف) تغییرات ضریب گروه مد انتشاری ششم و (ب) تغییرات پارامتر پراکندگی سرعت گروه ناشی از تغییر  $R'$  ..... ۹۹
- شکل ۴-۴۲: هدایت پرتو نور با فرکانس نظیر مد انتشاری ششم در امتداد نقص خطی موجبر ..... ۱۰۰

- شکل ۴-۴۳: جابه‌جایی ایجاد شده در محل مد انتشاری ناشی از تغییرات ضریب شکست میله‌های دی الکتریک کوچک شده از (الف) نمای دور و (ب) نمای نزدیک ..... ۱۰۱
- شکل ۴-۴۴: هدایت پالس نوری با طول موج مرکزی  $1/55 \mu\text{m}$  توسط موجبر کاواک کوپل شده پیشنهادی از (الف) نمای دور و (ب) نمای نزدیکتر ..... ۱۰۲
- شکل ۴-۴۵: نتایج شبیه‌سازی زمانی موجبر کاواک کوپل شده پیشنهادی برای شیف‌ت فاز  $\pi$  از (الف) نمای دور و (ب) نمای نزدیک ..... ۱۰۳
- شکل ۴-۴۶: پهن‌شدگی ایجاد شده در طیف پالس پرتو نور تابشی به موجبر کاواک کوپل شده ناشی از مدولاسیون فاز خودی ..... ۱۰۴
- شکل ۴-۴۷: نمای سه بعدی میدان الکتریکی مد ششم موجبر در سلول واحد ..... ۱۰۵
- شکل ۴-۴۸: جابه‌جایی مد انتشاری با در نظر گرفتن تغییر ضریب شکست میله‌های دی الکتریک کاواک‌ها ..... ۱۰۵
- شکل ۴-۴۹: نتیجه‌ی شبیه‌سازی زمانی موجبر کاواک کوپل شده‌ی پیشنهادی برای شیف‌ت فاز  $\pi$  با در نظر گرفتن خاصیت غیر خطی برای میله‌های دی الکتریک کاواک‌ها علاوه بر میله‌های دی الکتریک کوچک ..... ۱۰۶
- شکل ۴-۵۰: پهن‌شدگی طیف پالس خروجی سه ساختار بررسی شده تحت طول یکسان و شدت نور در میله‌های دی الکتریک یکسان ..... ۱۰۷

# فصل اول



## مقدمه

### 1-1 مدولاسیون نوری

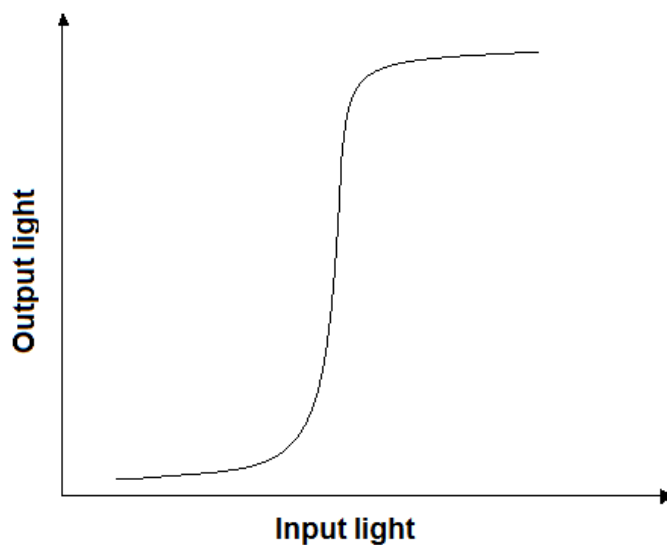
در هر سیستم طراحی شده برای انتقال اطلاعات در امتداد مسافت‌های طولانی یا کوتاه، سیگنال اطلاعات بر روی یک موج الکترومغناطیس فرکانس بالا به نام حامل سوار می‌شود و از طریق یک محیط مناسب انتقال پیدا می‌کند؛ به این فرآیند، مدولاسیون گفته می‌شود. مدولاسیون به دلایل عملی زیادی لازم است. ابعاد ادوات ساطع کننده‌ی امواج رابط‌هی عکس با فرکانس انتقال دارد؛ بنابراین یک حامل فرکانس بالا مورد نیاز است. دلایل دیگر می‌تواند کاهش نویز و امکان غلبه بر محدودیت‌های تجهیزات در یک محدوده‌ی فرکانسی مشخص باشد. همچنین ظرفیت انتقال اطلاعات یک سیگنال حامل رابط‌هی مستقیم با فرکانس آن دارد. بطور کلی فرکانس حامل بالاتر، پهنای باند بیشتری فراهم خواهد کرد. با توجه به فرکانس بالای امواج اپتیکی، پتانسیل این امواج برای فراهم آوردن پهنای باند وسیع، بسیار زیاد است.

تلاش‌های اولیه برای پیاده سازی لینک‌های مخابرات نوری به دو دلیل کاهش یافت؛ فقدان منابع نوری همدوس و فقدان محیط مناسب برای هدایت امواج نوری. کشف و معرفی لیزر و فیبر نوری تحولی در این عرصه بوجود آورد. در واقع کشف یک منبع نور همدوس و یک محیط دی‌الکتریک برای هدایت نور. فیبرهای نوری مزیت‌های مختلف دیگری نیز داشتند از جمله پایین بودن تلفات انتقال، انعطاف پذیری، کاهش هزینه و سهولت در نگهداری .

بطور کلی مدولاسیون فاز به دو منظور صورت می‌گیرد: یکی جهت سوار کردن اطلاعات، به شکل دیجیتال یا آنالوگ، بر روی یک سیگنال موج پیوسته یا پالسی تابشی از یک لیزر یا دیود

نوری و دیگری جهت سوئیچینگ امواج نوری. یک سیستم اپتیکی مسلماً نیاز به سوئیچینگ و ادوات اپتیکی منطقی جهت انجام محاسبات دیجیتالی دارد. ادوات سوئیچینگ روشن-خاموش<sup>1</sup> کنترل شده با نور، کاربرد بسیاری در انجام دستورالعمل‌های منطقی در یک سیستم دیجیتال نوری دارند.

مشخصه‌ی ورودی- خروجی یک سوئیچ نوری منطقی در شکل 1-1 نشان داده شده است که کاربرد فراوانی در سیستم‌های محاسبات نوری دارد. بطور کلی دو دسته‌ی متفاوت از ادوات منطقی و سوئیچینگ وجود دارد؛ دسته‌ی اول ادوات تمام اپتیک<sup>2</sup> هستند که ادوات نوری منطقی یا سوئیچینگ فوتونیک نیز نامیده می‌شوند. عملکرد این نوع نوری بر مبنای اثرات غیر خطی نوری می‌باشد که نیاز به توان نوری ورودی بسیار بالا دارند. دسته دوم ادوات مدولاسیون و سوئیچینگ الکترواپتیک هستند که معمولاً در سطح توان پایین‌تر کار می‌کنند. همچنین امکان اعمال سیگنال کنترل الکتریکی علاوه بر سیگنال کنترل اپتیکی نیز در آنها وجود دارد.



شکل 1-1: مشخصه‌ی ورودی- خروجی یک سوئیچ تمام نوری روشن- خاموش.

مدولاسیون نور جهت انتقال اطلاعات، بر اساس یک دسته‌بندی بر مبنای شکل نهایی سیگنال

<sup>1</sup> On-off switching

<sup>2</sup> All-optic

حاصل به دو بخش تقسیم می‌شود: مدولاسیون موج پیوسته<sup>1</sup> که در آن سیگنال حامل معمولاً سینوسی است؛ و دسته دوم مدولاسیون پالسی است که در آن حامل یک قطار پالس است. بر اساس یک دسته‌بندی دیگر مدولاسیون به دو نوع آنالوگ و دیجیتال تقسیم‌بندی می‌شود. در مدولاسیون آنالوگ، سیگنال اطلاعات پرتو نور خروجی یک منبع را به شکل پیوسته تغییر می‌دهد و در مدولاسیون دیجیتال تغییرات گسسته (روشن - خاموش) شدت نور توسط سیگنال اطلاعات صورت می‌گیرد (Bhattacharya, 1994).

همانطور که گفته شد یکی از روش‌های معمول برای انجام فرآیند مدولاسیون استفاده از خواص غیرخطی نوری می‌باشد. در یک محیط غیرخطی نوری ضریب شکست ماده توسط پرتو نور یا یک میدان الکتریکی تغییر می‌کند. این تغییر ضریب شکست مبنای پیاده‌سازی بسیاری از ادوات نوری از جمله مدولاتورها می‌باشد. اما متأسفانه ضعیف بودن این اثرات غیرخطی محدودیت‌هایی را بوجود آورده است؛ بطوریکه اغلب ادوات پیاده‌سازی شده نیاز به طول زیاد، توان مصرفی بالا و یا هردو دارند. برای رفع این مشکل دو راه حل وجود دارد: راه اول بر مبنای انتخاب و یافتن مواد با خاصیت غیر خطی قوی می‌باشد و راه دوم ساختاری است؛ بطوریکه ساختار فیزیکی مناسب طوری طراحی می‌شود که تاثیر ناشی از خواص غیرخطی را افزایش دهد. کریستال‌های فوتونی ساختارهای مناسبی برای پیاده‌سازی ادوات نوری در ابعاد بسیار کوچک و بصورت مجتمع می‌باشند (Soljačić *et al.*, 2004).

## 2-1 معرفی کریستال‌های فوتونی

همانطور که می‌دانیم کریستال اتمی آرایش تناوبی از اتم‌ها یا مولکول‌هاست. یک شبکه کریستالی هنگامی تشکیل می‌شود که یک سلول واحد کوچک از اتم‌ها یا مولکول‌ها در فضا بطور منظم تکرار شود. این آرایش تناوبی از اتم‌ها و مولکول‌ها منجر به ایجاد پتانسیل تناوبی برای الکترون‌ها در ساختار کریستال می‌شود. برای یک الکترون با جرم  $m$ ، انرژی  $E$  واقع در پتانسیل  $V(r)$  تابع موج  $\psi(r)$  نظیر الکترون در معادله شرودینگر صدق می‌کند:

$$\nabla^2 \psi(r) = \frac{-2m}{\hbar^2} (E - V(r)) \psi(r) \quad (1-1)$$

<sup>1</sup> Continuous wave

چنانچه پتانسیل تناوبی  $V(r)$  به اندازه کافی قوی باشد گاف انرژی در ساختار نوار انرژی کریستال بوجود آمده و انتشار الکترون با انرژی‌های معین در جهاتی خاص ممنوع می‌شود. مثلاً در یک نیمه‌هادی یک گاف انرژی کامل بین لایه هدایت و ظرفیت وجود دارد.

از طرفی با توجه به معادله ماکسول، برای یک موج الکترومغناطیس در داخل ماده‌ای با ثابت دی‌الکتریک  $\epsilon(r)$  داریم (Joannopoulos *et al.*, 2008):

$$\nabla \times [\nabla \times E(r)] = \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon(r) E(r) \quad (2-1)$$

با مقایسه‌ی روابط (1-1) و (2-1) مشاهده می‌کنیم که  $\epsilon(r)$  در رابطه‌ی (2-1) نقش  $V(r)$  در رابطه‌ی (1-1) را دارد. بنابراین در صورت متناوب بودن ثابت دی‌الکتریک در یک محیط و به اندازه‌ی کافی بزرگ بودن اختلاف ثابتهای دی‌الکتریک می‌توان پدیده‌های مشابه بسیاری مانند آنچه پتانسیل الکتریکی برای الکترون‌ها در کریستال‌های اتمی بوجود می‌آورد، برای فوتونها (مدهای نوری) ایجاد کرد. بنابراین ساختارهایی موسوم به کریستال‌های فوتونی که ثابت دی‌الکتریک آنها در یک، دو و یا سه بعد بصورت متناوب تکرار می‌شود و دوره‌ی تناوب آنها در محدوده‌ی طول موج نور تابشی قرار دارد، معرفی شدند. بنابراین یک راه حل مناسب برای کنترل سیگنال‌های اپتیکی، کریستال‌های فوتونی می‌باشند. همچنین می‌توان کریستال‌های فوتونی با گاف‌های انرژی طراحی کرد و ساخت که از انتشار نور در جهات مشخص با انرژی‌های معین جلوگیری کنند. با استفاده از کریستال‌های فوتونی، امکان ساخت کاواک‌ها و موجبرها در محدوده‌ی گسترده‌ای از فرکانس امواج الکترومغناطیس وجود دارد. ممکن است یک کریستال فوتونی با هندسه‌ی مشخص، با ابعاد میلی‌متری برای کنترل امواج میکروویو یا با ابعاد میکرونی برای کنترل مادون قرمز ساخته شود.

با وجود آنکه کریستال‌های فوتونی در دو دهه‌ی اخیر مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌اند، اما اولین فرضیات امکان کنترل انتشار نور با استفاده از ساختارهای تناوبی به سال 1887 برمی‌گردد (Rayleigh, 1887). تقریباً صد سال بعد یعنی در سال 1972، امکان استفاده از ساختارهای تناوبی جهت گسیل خودبه‌خودی<sup>1</sup> بیان شد (Bykov, 1972). هرچند اولین

<sup>1</sup>Spontaneous emission