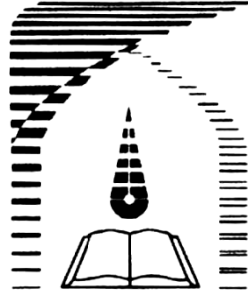


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق-الکترونیک

استاد راهنما:

شهریور ۱۳۸۸

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

و

آنان که در راه برقراری عدالت و آزادی گام برمی دارند.

# سپاسگزاری

منّت خدای را عزّوجلّ که طاعتش موجب قربت است و به شکر اندرش فرید نعمت، هر نفسی که فرومی رود مهر حیات است و چون برمی آید مفرح ذات، پس در هر نفسی دو نعمت موجود است و بر هر نعمتی شکر می واجب.

کز عهده شکرش به در آید

از دست و زبان که بر آید

عذره درگاه خدای آورد

بنده جان به که ز تقصیر خویش

کس نتواند که به جای آورد

ورنه سزاوار خداوندیش

بر خود لازم می دانم که از استاد کرامت‌دار، جناب آقای دکتر محمدرضا کاظم مروج فرشی شکر ویژه ای را به عمل آورم. ایشان، در طول دوره

کارشناسی ارشد که با انجام این تحقیق و دیگر تحقیقات در آزمایشگاه شبیه سازی ادوات مشغول بودم، پدران در کنار من و دیگر دانشجویان بودند و

وقت ارزشمندشان را وقف ما نمودند. برای ایشان در تمامی مراحل زندگی آرزوی توفیق و سلامتی می کنم و امیدوارم بتوانم گوشه ای از

زحمات ایشان را جبران کنم. از دوستان عزیزم در آزمایشگاه شبیه سازی ادوات که همواره در کنار من بودند صمیمانه شکر می کنم.

برای نخستین بار در این پایان نامه یک مدل عددی برای بررسی میزان گرمای القاء شده توسط جذب خطی و غیرخطی هنگامی که سیگنال نوری با توان زیاد داخل نانوموجبر سیلیکونی منتشر می شود، پیشنهاد داده ایم. با استفاده از این مدل به بررسی میزان جابجائی طول موج خروجی مبدل طول موج تمام نوری پرداخته ایم. بر مبنای نتایج شبیه سازی، مشخصات خروجی این افزاره برای پالس های در محدوده پیکوثانیه تغییرات قابل توجهی می کند و عملکرد آنرا با چالش جدی مواجه می سازد. این جابجائی ناخواسته را با کاهش شدت سیگنال پمپ جبران کرده ایم. در ادامه برای نخستین بار امکان بکارگیری نانوموجبر سیلیکونی به عنوان فیلتر تمام نوری کوک پذیر که علاوه بر انتخاب کانال دلخواه آنرا تقویت هم می کند، مورد بررسی قرار دادیم. اساس کار این افزاره اثر رامان متقابل است که انتخاب کانال دلخواه را با تغییر فرکانس مرکزی سیگنال پمپ که اختلاف فرکانسی آن با کانال دلخواه برابر با جابجائی رامان در سیلیکون است، انجام می دهیم. برای تعیین پارامترهای فیزیکی موجبر معادله هلمهولتز را بصورت عددی با استفاده از روش تفاضل محدود عددی حل کرده ایم.

: نانوموجبر سیلیکونی، جذب دو فوتونی، جذب حامل آزاد، اثر کر، بهره رامان.

د	فهرست علائم و نشانه‌ها.....
ح	فهرست جدول‌ها.....
ط	فهرست شکل‌ها.....
۱۱	فصل ۱-مقدمه.....
۱۱	۱-۱- پیشگفتار.....
۱۲	۲-۱- چرا سیلیکون.....
۱۴	۳-۱- نانوموجبرهای سیلیکونی.....
۱۷	۴-۱- نور غیرخطی.....
۱۹	۵-۱- اهداف پایان‌نامه.....
۲۱	۶-۱- ساختار پایان‌نامه.....
۲۲	فصل ۲-انتشار میدان نوری.....
۲۲	۱-۲- مقدمه.....
۲۲	۲-۲- معادلات ماکسول در محیط پاشنده غیرخطی.....
۲۴	۱-۲-۲- انتشار غیرخطی میدان نوری.....
	فصل ۳-مدل ریاضی پیش‌بینی دمای القاء شده توسط فرایند جذب غیرخطی و اثر آن بر روی عملکرد
۳۵	مبدل طول موج تمام نوری.....
۳۵	۱-۳- مقدمه.....
۳۷	۲-۳- معادله گرمای القاء شده.....
۴۱	۳-۳- مبدل طول موج تمام نوری.....
۴۳	۴-۳- نتایج شبیه‌سازی.....
۴۴	۱-۴-۳- نحوه انتشار پالس پمپ در نانوموجبر سیلیکونی.....
۴۸	۲-۴-۳- بررسی گرمای القاء شده توسط پالس پمپ.....

۳-۴-۳	تغییر و جابجائی طول موج پالس پروب توسط پالس پمپ	۵۱
<b>فصل ۴- فیلتر تمام نوری بر مبنای اثر رامان</b>		
۴-۱-۴	مقدمه	۵۸
۴-۲-۴	مقدمه‌ای بر فیزیک پراش رامان	۵۹
۴-۳-۴	فیلتر تمام نوری بر مبنای اثر رامان	۶۳
۴-۴-۴	مدل سازی	۶۶
۴-۵-۴	حل عددی معادله هلمهولتز	۷۱
۴-۵-۱-۴	روش SM-FDM	۷۲
۴-۵-۲-۴	شرایط مرزی	۷۵
۴-۶-۴	شبیه سازی و نتایج	۷۶
۴-۶-۱-۴	اثر طول اندرکنش بر شدت کانال‌ها	۷۹
۴-۶-۲-۴	نقش طول عمر حامل‌ها بر عملکرد افزاره	۸۰
۴-۶-۳-۴	ساختار اصلاح شده	۸۳
۴-۶-۴-۴	پارامترهای وابسته به شکل ساختار	۸۵
۴-۶-۵-۴	کوک پذیری	۸۹
<b>فصل ۵- بررسی نتایج و جمع بندی</b>		
۵-۱-۵	مقدمه	۹۳
۵-۲-۵	جمع بندی و نتیجه گیری	۹۳
۵-۳-۵	پیشنهادات	۹۶
<b>فهرست مراجع</b>		
۹۸		
<b>پیوست‌ها</b>		
۱۰۲		
پیوست ۱		
۱۰۲		
واژگان: فارسی به انگلیسی		
۱۰۲		
پیوست ۲		
۱۰۸		

۱۰۸.....واژگان: انگلیسی به فارسی.....

۱۱۴.....پیوست ۳.....

۱۱۴.....علائم اختصاری.....



عنوان	علامت اختصاری	واحد
تابع پوش موج رونده	A	V
سطح مقطع موثر	$A_{eff}$	$m^2$
بردار یکه جهت X	$a_x$	-
بردار یکه جهت Y	$a_y$	-
بردار یکه جهت Z	$a_z$	-
چگالی شار مغناطیسی	B	$Kg.s^{-2}.A^{-1}$
سرعت نور در خلاء	c	$m.s^{-1}$
بخش مزدوج مختلط تابع	C.C	-
کانال زام	$CH_j$	-
چگالی شار الکتریکی	D	$A.s.m^{-2}$
بار الکترون	e	A.s
میدان الکتریکی	E	$V.m^{-1}$
بردار یکه میدان پمپ	$e_p$	-
بردار یکه میدان استوک	$e_s$	-
بردار یکه قطبش TE	$e_{TE}$	-
بردار یکه قطبش TM	$e_{TM}$	-
تابع پوش موج ایستاده	F	$m^{-1}$
بهره رامان در حوزه زمان	$g_R(t)$	$m.V^{-2}$
بهره رامان در حوزه فرکانس	$G_{Rj}(\omega)$	$m.V^{-2}$
ارتفاع نانوموجبر	h	m
میدان مغناطیسی	H	$A.m^{-1}$
ثابت پلانک کاهش یافته	$\hbar$	$m^2.kg.s^{-1}$
جهت کریستالی	i	-
بخش انگاری تابع	Im()	-
شدت بیشینه سیگنال پمپ	$I_{maxp}$	$V^2.m^{-2}$

$V^2.m^{-2}$	$I_{maxS}$	شدت بیشینه سیگنال پروب
$V^2.m^{-2}$	$I_p$	شدت سیگنال پمپ
$A.m^{-2}$	$J$	چگالی جریان الکتریکی
$m^{-1}$	$k_0$	عدد موج در خلاء
$V^2.m^{-1}.K^{-1}$	$K_{air}$	ضریب هدایت دمائی هوا
$m^2.kg.s^{-2}.K^{-1}$	$k_B$	ثابت بولتزمن
$V^2.m^{-1}.K^{-1}$	$K_{Si}$	ضریب هدایت دمائی سیلیکون
$V^2.m^{-1}.K^{-1}$	$K_{Silica}$	ضریب هدایت دمائی سیلیکا
$m$	$L$	طول موجبر
$m$	$L_D$	طول پاشندگی
$m$	$L_{int}$	طول اندرکنش
$m$	$L_{NL}$	طول غیرخطی
$m$	$L_W$	طول جداسدگی
$Kg$	$m_{ce}$	جرم الکترون در باند هدایت
$Kg$	$m_{ch}$	جرم حفره در باند هدایت
$m^{-3}$	$N$	چگالی حامل های آزاد
-	$n_0$	ضریب شکست ماده
$m^2.V^{-2}$	$n_2$	ضریب کر
-	$N_B$	فاکتور اشغال بوز
$m^{-3}$	$N_e$	چگالی الکترون های آزاد
-	$n_{eff}$	ضریب شکست موثر
$m^{-3}$	$N_h$	چگالی حفره
-	$O$	خطای گسسته سازی
$A.s.m^{-2}$	$P$	قطبش
$A.s.m^{-2}$	$P_L$	قطبش خطی
$A.s.m^{-2}$	$P_{NL}$	قطبش غیرخطی
$V^2$	$P_t$	شدت سیگنال پمپ کوک شده
$J$	$Q$	گرمای مبادله شده
-	$Re()$	بخش حقیقی تابع
-	$R_i$	ماتریس رامان

$m^{-1}.Sr^{-1}$	s	بهره پراش خودبخودی
-	Sr	زاویه فضائی
K	T	دما
K	$T_0$	دمای حالت تعادل
s	$T_{FWHM}$	پهنای پالس گوسی
$m^3$	V	حجم سلول شبیه سازی
$m.s^{-1}$	$v_p$	سرعت فاز
m	W	عرض نانوموجبر
m	z	مکان
$m^{-1}$	$\alpha_0$	ضریب جذب خطی
$m^{-1}$	$\alpha_{FC}$	ضریب جذب حامل‌های آزاد
$m^{-1}$	$\alpha_L$	ضریب جذب بواسطه نشت فوتون‌ها
$m^{-1}$	$\alpha_p$	ضریب جذب خطی سیگنال پمپ
$m^{-1}$	$\alpha_{rough}$	ضریب جذب بواسطه ناهمواری دیواره
$m^{-1}$	$\alpha_s$	ضریب جذب خطی سیگنال پروب
$m.V^{-2}$	$\alpha_{TPA}$	ضریب جذب دو فوتونی
$m^{-1}$	$\beta$	ثابت انتشار
$s^j.m^{-1}$	$\beta_j$	ضریب پاشندگی مرتبه $j$ ام
-	$\Gamma$	ضریب تحدید
$V^{-2}.m^{-1}$	$\gamma$	ضریب غیرخطی
$Rad.s^{-1}$	$\Gamma_R$	نصف پهنای باند بهره رامان
$s.m^{-1}$	$\Delta$	ضریب طول اثر
-	$\Delta n$	اختلاف ضریب شکست هسته و غلاف
-	$\Delta n_{FC}$	تغییر ضریب شکست بدلیل حامل‌های آزاد
-	$\Delta n_{kerr}$	تغییر ضریب شکست بواسطه اثر کر
-	$\Delta n_p$	تداخل کوچک ضریب شکست
-	$\Delta n_{TH}$	تغییر ضریب شکست بدلیل گرما
-	$\Delta n_{total}$	مجموع تغییر ضریب شکست
m	$\Delta z$	گام‌های شبیه‌سازی
-	$\Delta\beta$	تلفات و اثرات خطی و غیرخطی
m	$\delta\lambda$	تفاوت بین بیشینه و کمینه تغییر طول موج

m	$\Delta\lambda_s$	جابجائی طول موج بدلیل گرما
m	$\delta\lambda_T$	انحراف از طول موج دلخواه
Rad	$\Delta\varphi$	اندازه تغییر فاز
$A.s.V^{-1}.m^{-1}$	$\varepsilon$	مجموع ضریب گذردهی
$A.s.V^{-1}.m^{-1}$	$\varepsilon_0$	ضریب گذردهی در خلاء
-	$\varepsilon_{NL}$	ضریب گذردهی نسبی غیرخطی
-	$\varepsilon_T$	ضریب گذردهی نسبی خطی
$m^2.V^{-2}$	$\zeta_R$	حساسیت رامان تحت شرایط تشدید
m	$\lambda$	طول موج میدان نوری
m	$\lambda_p$	طول موج سیگنال پمپ
m	$\lambda_s$	طول موج مرکزی تغییر یافته سیگنال پروب
m	$\lambda_{s0}$	طول موج مرکزی اولیه سیگنال پروب
$J.A^{-2}.m^{-1}$	$\mu_0$	ضریب تراوایی در خلاء
$m^2.V^{-1}.s^{-1}$	$\mu_e$	تحرك پذیری الکترون
$m^2.V^{-1}.s^{-1}$	$\mu_h$	تحرك پذیری حفره
$Kg.m^{-3}$	$\rho$	چگالی جرمی
$m^{-2}$	$\sigma$	ضریب سطح مقطع جذب
s	$\tau_1$	زمان پاسخ رامان
s	$\tau_2$	ثابت مربوط به پهنای باند رامان
s	$\tau_c$	طول عمر حامل های آزاد
s	$\tau_\theta$	ثابت زمانی تلفات دمائی
$V^2.m^{-3}$	$\Phi$	منبع گرمائی توزیع شده در واحد حجم
-	$\chi^{(1)}$	حساسیت مرتبه اول
$m^1.V^{-1}$	$\chi^{(2)}$	حساسیت مرتبه دوم
$m^2.V^{-2}$	$\chi^{(3)}$	حساسیت مرتبه سوم
$m^2.V^{-2}$	$\chi_R$	حساسیت مربوط به اثر رامان
V	$\Psi_p$	تابع پوش پمپ
V	$\Psi_{sj}$	تابع پوش سیگنال پروب کانال <i>j</i> ام
$Rad.s^{-1}$	$\omega$	فرکانس سیگنال
$Rad.s^{-1}$	$\Omega_{ps}$	اختلاف فرکانسی پمپ و پروب
$Rad.s^{-1}$	$\Omega_R$	فرکانس فونون های نوری

---

جدول ۱-۱: مقایسه پارامترهای فیبر تک مد با نانوموجبر سیلیکونی [۹].....	۱۷
جدول ۱-۳: پارامترهای نانوموجبر که در شبیه سازی بکار گرفته شده است.....	۴۳
جدول ۲-۳: بیشینه شدت میدان های پمپ مد TE با طول موج ۱۵۵۴ نانومتر.....	۴۳
جدول ۱-۴: پارامترهای بکار رفته در شبیه سازی.....	۷۶

- شکل ۱-۱: ساختار نانوموجبر الف- کانال، ب- ریب و ج- تیغه‌ای [۵]..... ۱۵
- شکل ۲-۱: مدهای مختلف یک موجبر [۸]..... ۱۶
- شکل ۱-۳: الف- طرح آزمایش پمپ-پروب، ب- سطح مقطع نانو موجبر..... ۴۲
- شکل ۲-۳: مقایسه شدت سیگنال‌های الف-  $P_1$  و  $P_2$ ، ب-  $P_3$  و  $P_4$ ، ج-  $P_5$  و  $P_6$  در ابتدا، میانه و انتهای نانوموجبر  
..... ۴۶
- شکل ۳-۳: مقایسه اختلاف دمای ایجاد شده در ابتدا، میانه و انتهای نانوموجبر توسط الف-  $P_1$  و  $P_2$ ، ب-  $P_3$  و  $P_4$ ، ج-  $P_5$  و  $P_6$ ..... ۵۰
- شکل ۴-۳: مقایسه تبدیل طول موج توسط میدان‌های الف-  $P_1$  و  $P_2$ ، ب-  $P_3$  و  $P_4$ ، ج-  $P_5$  و  $P_6$ ..... ۵۴
- شکل ۵-۳: نمایش شماتیک اندرکنش سیگنال پمپ (خط چین) و پروب (خط) در حوزه زمان (از چپ به راست)..... ۵۵
- شکل ۶-۳: تغییر در جابجائی طول موج تنظیم شده بر حسب شدت پالس پمپ  $P_4$ ..... ۵۶
- شکل ۷-۳: جابجائی طول موج خروجی (منحنی سمت چپ) و تفاوت بین بیشینه و کمینه تغییر طول موج خروجی (منحنی سمت راست) بر حسب طول نانوموجبر..... ۵۷
- شکل ۱-۴: پراش رامان از دید کوانتم مکانیک [۳۴]..... ۶۰
- شکل ۲-۴: منحنی پاشندگی فونون‌های سیلیکون [۳۶]..... ۶۱
- شکل ۳-۴: طیف بهره رامان [۳۶]..... ۶۳
- شکل ۴-۴: ساختار نانوموجبر سیمی بر روی بستر سیلیکا..... ۶۵
- شکل ۵-۴: طرح گسسته نمودن غیرهمسان در روش SM-FDM..... ۷۲
- شکل ۶-۴: روندنمای طراحی فیلتر تمام نوری مبتنی بر اثر رامان متقابل..... ۷۷
- شکل ۷-۴: پیکر بندی SOI-NWG بصورت یک فیلتر تمام نوری..... ۷۸

- شکل ۴-۸: شدت کانال‌های مختلف برحسب طول نانوموجبر ..... ۷۹
- شکل ۴-۹: وابستگی شدت کانال‌های به طول عمر حامل‌های آزاد ..... ۸۱
- شکل ۴-۱۰: ساختار بهبود یافته برای کاهش طول عمر حامل‌ها [۴۴] ..... ۸۲
- شکل ۴-۱۱: نحوه پیکربندی نانوموجبرها بعنوان فیلتر تمام نوری ..... ۸۳
- شکل ۴-۱۲: طیف خروجی افزاره ..... ۸۴
- شکل ۴-۱۳: وابستگی ضریب شکست موثر به طول موج میدان نوری اعمالی ..... ۸۶
- شکل ۴-۱۴: وابستگی ضریب تمرکز به طول موج میدان نوری اعمالی ..... ۸۸
- شکل ۴-۱۵: الف- نحوه توزیع میدان الکتریکی (نمای دو بعدی)، ب- نحوه توزیع میدان الکتریکی (نمای سه بعدی).  
..... ۸۹
- شکل ۴-۱۶: الف- شدت کانال‌های دلخواه کوک شده، ب- شدت حذف کانال مجاور اول و دوم به ازای  
کانال‌های مختلف کوک شده ..... ۹۱

با پیشرفت صنعت مخابرات و ظهور پدیده‌های جدید و امکانات بلادرنگ<sup>۱</sup> نیاز کاربران به پهنای باند بیشتر و نرخ بالای انتقال اطلاعات بیشتر شده است. برای دستیابی به نرخ بالای انتقال داده مدارهای تمام نوری<sup>۲</sup> گزینه جدیدی است که مبنای عملکرد آنها آثار غیرخطی نور است. از طرف دیگر برای اقتصادی بودن و مجتمع شدن این افزارها فن آوری ساخت آنها به سمت سیلیکون با قدمت هفتاد ساله در صنعت نیمه‌رسانا سوق پیدا کرده است [۱]. از این رو یکی از زمینه‌های جدید مطرح شده در صنعت مخابرات نوری استفاده از مدارهای مجتمع تمام نوری سیلیکونی<sup>۳</sup> است. در میان افزارهای نوری مبدل طول موج و فیلترهای نوری از کاربرد و اهمیت بالاتری برخوردار هستند که علاوه بر بکارگیری در صنعت مخابرات نوری امکان طراحی مدارهای منطقی تمام نوری و بکارگیری در کامپیوترهای نسل آینده را به ما می‌دهد. تاکنون روش‌های گوناگونی برای پیاده سازی مبدل طول موج تمام نوری بکار بسته شده است که در این پروژه از اثر کر نوری<sup>۴</sup> استفاده کرده‌ایم [۲]. برای پیاده سازی فیلتر تمام نوری در بستر نانوموجبر سیلیکونی از اثر غیرخطی رامان استفاده شده است.

---

<sup>۱</sup> Real-time

<sup>۲</sup> All-optical

<sup>۳</sup> Silicon photonic integrated circuit

<sup>۴</sup> Optical Kerr effect



در بین تمام مواد نیمه‌رسانا به کار گرفته شده در صنعت الکترونیک، سیلیکون دارای پیشرفته ترین فن‌آوری ساخت است. سیلیکون دارای ویژگی‌های منحصر به فردی است که آنرا برای کاربرد در مدارهای نوری و مخابرات نوری بی‌رقیب نموده است. گاف انرژی آن  $1/1$  الکترون ولت<sup>۱</sup> است که برای پنجره مخابراتی (طول موج  $1/3$  تا  $1/7$  میکرومتر) شفاف است. سیلیکون را تا میزان قابل قبولی (۹۹/۹۹۹۹۹۹٪) می‌توان خالص نمود که باعث کاهش تلفات خطی در موجبرهای سیلیکونی می‌شود. علاوه بر اینها ضریب شکست سیلیکون ( $n_0$ ) در حدود  $3/4$  است. اختلاف بسیار زیاد ضریب شکست هسته<sup>۲</sup> با غلاف<sup>۳</sup> - که معمولاً از جنس هوا ( $n_0=1$ ) و سیلیکا ( $n_0=1/4$ ) است- باعث تمرکز شدید نور داخل هسته و کاهش حجم مدارهای نوری می‌شود [۳-۵].

مزایای ذکر شده باعث مطرح شدن سیلیکون بعنوان بستری برای افزاره‌های نوری در اواخر دهه هشتاد شد. رایج‌ترین افزاره‌های نوری بر مبنای سیلیکون افزاره‌های الکترو-نوری است. با وجود تمام مزیت‌هایی که برای سیلیکون بیان شد، گاف انرژی غیرمستقیم آن و ناتوانی در تولید فوتون‌های نور بکارگیری آنرا در صنایع مخابراتی با چالش جدی مواجه ساخته بود. با مطرح شدن پدیده پراش رامان برانگیخته<sup>۴</sup> و تولید نور از سیلیکون و ساخت لیزرهای تمام سیلیکونی این ماده در صنایع نوری مانند صنعت ساخت نیمه‌رسانا مورد توجه دوباره قرار گرفت [۵]. با ساخت لیزرهای سیلیکونی در زمینه مدارهای نوری تمام سیلیکونی جهش شگرفی روی داد و افزاره‌های مختلفی بر پایه آثار غیرخطی پیشنهاد و ساخته شده‌اند.

---

<sup>1</sup> Electron volt

<sup>2</sup> Core

<sup>3</sup> Clad

<sup>4</sup> Stimulated Raman scattering (SRS)

برای آنکه افزارهای نوری طراحی کنیم باید میدان نوری اعمالی را کنترل کنیم. آثار الکترو-نوری و گرما-نوری<sup>۱</sup> فرایندهای فیزیکی رایجی هستند که برای مدولاسیون نور به کار گرفته می‌شوند. بدلیل ساختار متقارن سیلیکون، اثر الکترو-نوری خطی-پاکل<sup>۲</sup> - بسیار ضعیف است [۵]. از این رو امکان مدولاسیون نور بصورت الکترو-نوری وجود ندارد.

یکی از روش‌های رایج برای مدولاسیون سیگنال نوری تزریق حامل‌های آزاد است. تزریق حامل آزاد باعث تغییر ضریب شکست ماده می‌شود [۶]. اما باید به این نکته توجه نمود که اندرکنش سیگنال نوری و حامل‌های آزاد باعث جذب فوتون‌ها و کاهش شدت سیگنال نوری می‌شود. از این رو تزریق حامل‌های آزاد گزینه مناسبی برای مدولاسیون میدان نوری و کنترل آن نیست.

اعمال گرما توسط منبع گرمای خارجی روشی دیگر برای کنترل میدان نوری اعمالی است. در بین مواد نیمه رسانا سیلیکون دارای ضریب گرما-نوری و ضریب هدایت دمائی<sup>۳</sup> بالائی است که باعث کاهش سرعت زمان کلیدزنی<sup>۴</sup> در کلیدهای نوری مبتنی بر این پدیده می‌شود. مشکل عمده این کلیدها زمان پاسخ طولانی و پهنای بسیار کم-چند مگاهرتزی- در مقایسه با دیگر افزارهای مبتنی بر مکانیسم‌های دیگر است [۷].

یکی دیگر از روش‌های مدولاسیون نوری بهره‌گیری از آثار غیرخطی نور مانند اثر کر است. اثر کر در سیلیکون نسبت به مواد دیگر بیشتر است. از این رو برای مدولاسیون سیگنال‌های نوری و طراحی افزارهای تمام نوری بسیار مناسب است. یکی از مزایای این نوع مدولاسیون زمان پاسخ کوتاه و پهنای باند زیاد است [۵].

---

<sup>1</sup> Thermo-optic

<sup>2</sup> Pockel effect

<sup>3</sup> Thermal conduction coefficient

<sup>4</sup> Switching

نانوموجبر به افزاره سه بعدی اطلاق می‌شود که ابعاد عرضی آن کمتر از ۱ میکرومتر و طول آن چند میلی‌متر تا چند سانتیمتر است. بیشتر نانوموجبرهای سیلیکونی بر روی بستری از سیلیکا<sup>۱</sup> ساخته می‌شوند. کانال<sup>۲</sup>، ریب<sup>۳</sup> و تیغه<sup>۴</sup> ساختارهای رایج این نانوموجبرها هستند که سطح مقطع آنها در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. در هر سه ساختار اختلاف ضریب شکست بین هسته و غلاف بزرگتر از ۲ است ( $\Delta n > 2$ ) که بسیار بیشتر از مقدار رایج در فیبرهای نوری است ( $\Delta n > 0.001$ ).

این تفاوت زیاد اختلاف ضریب شکست باعث تمرکز شدید نور می‌شود که قابلیت طراحی افزاره‌های

فشرده<sup>۵</sup> را می‌دهد [۵].



(الف)

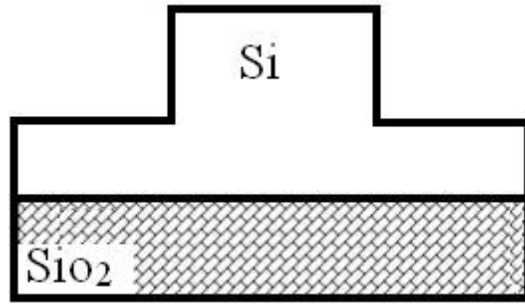
<sup>1</sup> SiO<sub>2</sub>

<sup>2</sup> Channel

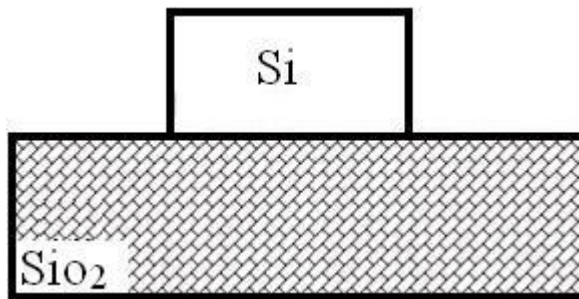
<sup>3</sup> Rib

<sup>4</sup> Ridge

<sup>5</sup> Compact



(ب)



(ج)

شکل ۱-۱: ساختار نانوموجبر الف- کانال، ب- ریب و ج- تیغه‌ای [۵].

همان‌طور که در فصل دوم بیان خواهد شد، تنها میدان‌های نوری که دارای توزیع زمانی و مکانی مشخصی هستند در نانوموجبر منتشر می‌شوند. این میدان‌های مشخص را مدهای هدایت شونده نوری<sup>۱</sup> می‌نامند که از حل عددی معادلات ماکسول<sup>۲</sup> مشخص می‌شوند. مدهای مختلف در شکل ۱-۲ برای موجبری با عرض بیشتر از یک میکرومتر- که بیشتر از یک مد را پشتیبانی می‌کند- نشان داده شده است.

<sup>۱</sup> Optical guided mode

<sup>۲</sup> Maxwell equations