

فرستنده- گیرنده یک پارچه نوری مبتنی بر تشدیدگرهای حلقوی

مهدی کاری و محمود نیکوفرد

تاکنون فرستنده-گیرنده‌های مختلفی توسط محققین طراحی و ساخته شده است. Takeuchi [۱]، Park [۲] و Prat [۳]، فرستنده-گیرنده‌های مختلفی را پیشنهاد و ارائه کرده‌اند. Xu [۴]، یک فرستنده-گیرنده نوری انعکاسی را پیشنهاد کرد که در طرح آنها از یک مدولاتور با استفاده از ساختار تقویت‌کننده نوری نیمه‌هادی (SOA) و مدوله نمودن جریان آن، تداخل سنچ چندمده (MMI) جهت انعکاس نور مدوله‌شده به شبکه و یک آشکارساز نوری جهت بازیافت سیگنال‌های اطلاعات دریافتی از نور استفاده شده است. ساختمان مدولاتور و آشکارساز نوری دارای ساختار مشابه pin بوده که به ترتیب در بایاس‌های مستقیم و معکوس پیاده‌سازی شده‌اند. این فرستنده-گیرنده قابلیت مدوله و دمدوله نمودن تا فرکانس‌های ۱٫۲۵ GHz و ۳۰ GHz را به ترتیب داراست. در این طرح برای جداسازی طول موج از تداخل سنچ ماخ-زندر (MZI) و توری موجبری آرایه‌شده (AWG) استفاده شده و دو نوع فرستنده-گیرنده محقق شده است. این مقاله در ادامه همین کار بوده و طرح جدیدی از یک فرستنده-گیرنده مجتمع نوری انعکاسی را ارائه می‌دهد به گونه‌ای که برای هر چهار ساختار مدولاتور، آشکارساز، جداساز طول موج و انعکاس‌دهنده از تشدیدگر حلقوی استفاده شده است.

۲- طراحی فرستنده-گیرنده و روابط حاکم

در شکل ۱ طرح‌واره یک فرستنده-گیرنده نوری نمایش داده شده است. در این شکل دو طول موج λ_1 (موج نوری همراه با سیگنال داده) و λ_2 (موج نوری پیوسته) به سطح تراشه پوشیده‌شده با ماده ضدانعکاس (AR) تابیده شده و به صورت مکانی توسط تشدیدگر حلقوی ۱ از هم جدا می‌شوند. ابعاد تشدیدگر ۱ شامل طول مؤثر حلقه و فاصله هوایی بین موجبر مستقیم و حلقوی باید به طور صحیحی طراحی شوند تا طول موج‌های λ_1 و λ_2 از هم جدا شوند. همچنین تشدیدگر حلقوی ۱، یک آشکارساز با ساختار لایه pin می‌باشد که طول موج λ_1 را هم‌زمان با جداسازی آشکار می‌نماید و سیگنال داده از آن استخراج می‌شود. سپس نور پیوسته با طول موج λ_2 وارد مدولاتور (تشدیدگر حلقوی ۲) شده و مدوله می‌گردد. سرانجام نور مدوله‌شده، وارد تشدیدگر حلقوی انعکاسی ۳ و ۴ شده و پس از انعکاس به خارج از تراشه انتقال می‌یابد. تشدیدگر حلقوی ۱ می‌تواند با ساختار لایه یک تقویت‌کننده نوری نیمه‌هادی در بایاس معکوس ساخته شود تا به صورت آشکارساز عمل نماید. ساختمان مدولاتور همان ساختار لایه تقویت‌کننده نوری نیمه‌هادی خواهد بود به جز این که لایه جاذب در آن وجود ندارد و ولتاژ بایاس به صورت معکوس به آن اعمال می‌شود. فاصله فرکانسی بین دو طول موج λ_1 و λ_2 را ۲۰۰ GHz (۲۰۰ nm) در پنجره طول موج مخابراتی ۱۵۷۰-۱۵۲۰ nm در نظر گرفته‌ایم.

۲-۱ ساختمان لایه

ساختمان لایه موجبرهای غیر فعال عبارت است از یک لایه موجبری بدون ناخالصی InGaAsP با طول موج شکاف باند ۱٫۲۵ μm (که $i\text{-Q}(1,25)$ نامیده می‌شود) به ضخامت ۵۰۰ nm که بر روی آن لایه‌های

چکیده: در این مقاله یک فرستنده-گیرنده نوری یک‌پارچه مبتنی بر تشدیدگرهای حلقوی بر روی زیرلایه نیمه‌عایقی InP در طول موج ۱٫۵۵ μm برای اولین بار طراحی شده است. برای جداسازی طول موج‌های دریافتی شامل موج نوری پیوسته و موج نوری مدوله‌شده از تشدیدگر حلقوی نوری استفاده شده است. تشدیدگر حلقوی دارای ساختار pin بوده که علاوه بر جداسازی طول موج‌های دریافتی و ارسالی، وظیفه آشکارسازی طول موج‌های مدوله‌شده دریافتی را نیز بر عهده دارند. طول موج پیوسته پس از مدوله‌شدن در مدولاتور حلقوی به سمت یک زوج تشدیدگر حلقوی هدایت گردیده تا منعکس شده و به شبکه باز گردد. فاصله کانال بین طول موج دریافتی و طول موج ارسالی (۱٫۶ nm) ۲۰۰ GHz در محدوده طول موج ۱۵۲۰-۱۵۷۰ nm است. این فرستنده-گیرنده می‌تواند پهنای باند حداقل ۴۰ GHz را نشان دهد.

کلید واژه: فرستنده-گیرنده یک‌پارچه نوری، آشکارساز نوری، تشدیدگر حلقوی، مدولاتور، انعکاس‌دهنده.

۱- مقدمه

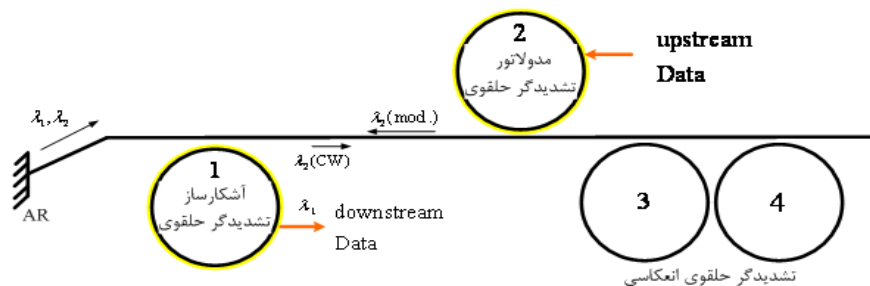
با پیدایش اولین فیبر نوری با تلفات کم، شبکه مخابرات فیبر نوری در همه جهان با سرعت قابل توجهی رشد نمود. بخش عمده‌ای از رشد و توسعه مخابرات نوری و راهیابی این تکنولوژی به منازل، وابسته به فرستنده-گیرنده‌های نوری بوده است. هم‌اکنون در مراکز تحقیقاتی فوتونیک برای ساخت فرستنده-گیرنده‌های یک‌پارچه نوری، تحقیقات گسترده‌ای انجام می‌شود.

در حال حاضر عمده فرستنده-گیرنده‌های نوری قابل استفاده در منازل از نوع ادوات گسسته می‌باشند. با مجتمع‌سازی این ادوات در یک تراشه می‌توان هزینه ساخت و تلفات تزویج نور از فیبر به تراشه را به شدت کاهش داد. در حال حاضر تحقیقات بر روی این افزاره در پنجره طول موج ۱٫۵۵ μm و یک‌پارچه‌سازی آن از مواد InP/InGaAsP بر روی زیرلایه نیمه‌عایقی InP متمرکز است. حداقل سرعت برای مصارف خانگی در حال حاضر ۱ Gb/s و برای سال‌های بعد حدود ۱۰ Gb/s در نظر گرفته شده است. لذا فرستنده-گیرنده‌ها باید قابلیت مجتمع‌سازی یک‌پارچه را داشته و پهنای باند و بازده کوانتومی کافی را تحویل دهند و علاوه بر آن نیازی به یک منبع لیزری به عنوان فرستنده داده ارسالی، نداشته باشند.

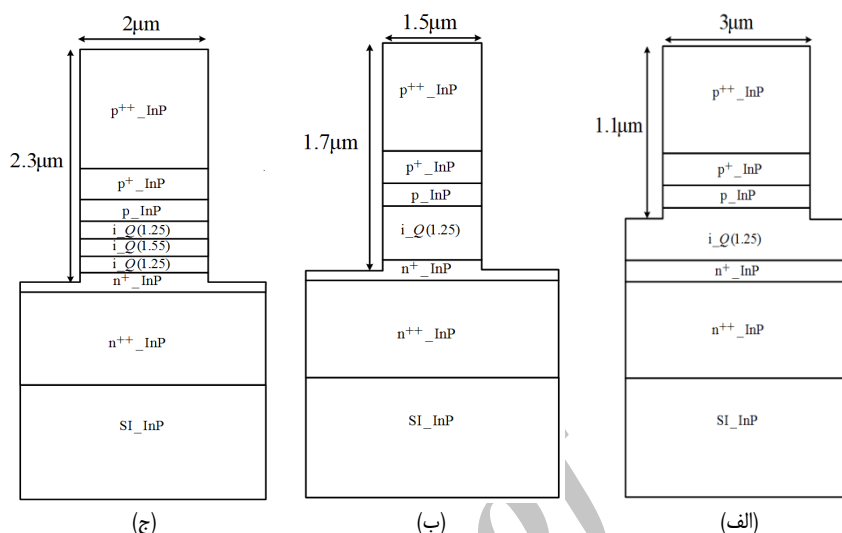
یک فرستنده-گیرنده نوری از چهار بخش اصلی تشکیل شده است: (۱) افزاره‌ای برای جداسازی طول موج‌های دریافتی و ارسالی، (۲) گیرنده‌ای برای آشکارسازی نور مدوله‌شده دریافتی و استخراج سیگنال داده از آن، (۳) مدولاتوری برای مدوله کردن نور پیوسته دریافتی و (۴) افزاره‌ای برای بازگرداندن نور مدوله‌شده به شبکه.

این مقاله در تاریخ ۱۶ اسفند ماه ۱۳۹۰ دریافت و در تاریخ ۲ تیر ماه ۱۳۹۲ بازنگری شد.

مهدی کاری، دانش‌آموخته دوره کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تحصیلات تکمیلی تهران جنوب، تهران، (email: kari.mahdi@yahoo.com).
محمود نیکوفرد، گروه الکترونیک، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان، (email: mnik@kashanu.ac.ir).



شکل ۱: طرح‌واره یک فرستنده-گیرنده انعکاسی متشکل از تشدیدگر حلقوی (۱) جهت جداسازی طول موج‌های دریافتی و ارسال λ_1 و آشکارسازی λ_2 ، مدولاتور (۲) و زوج تشدیدگر حلقوی (۳ و ۴) برای انعکاس طول موج ارسال λ_1 .



شکل ۲: سه نوع ساختمان لایه استفاده‌شده در فرستنده-گیرنده، (الف) ساختار غیر فعال با زدایش کم عمق، (ب) ساختار غیر فعال با زدایش عمیق و (ج) ساختار فعال با زدایش عمیق.

جدول ۲: ساختمان لایه، ناخالصی و ضریب شکست لایه موجبر فعال.

لایه فعال	میزان ناخالصی	ضریب شکست
p++-InP	1×10^{18}	۳٫۱۶۷۹
p+-InP	5×10^{17}	۳٫۱۶۴۶
p-InP	3×10^{17}	۳٫۱۶۶۹
i-Q(۱٫۲۵)	5×10^{15}	۳٫۳۶۴۰
i-Q(۱٫۵۵)	5×10^{15}	۳٫۵۵
i-Q(۱٫۲۵)	5×10^{15}	۳٫۳۶۴۰
n+-InP	6×10^{16}	۳٫۱۶۹۱
n++-InP	1×10^{18}	۳٫۱۶۴۶
SI-InP	5×10^{15}	۳٫۱۶۹۷

جدول ۱: ساختمان لایه، ناخالصی و ضریب شکست لایه موجبر غیر فعال.

لایه غیر فعال	میزان ناخالصی	ضریب شکست
p++-InP	1×10^{18}	۳٫۱۶۷۹
p+-InP	5×10^{17}	۳٫۱۶۴۶
p-InP	3×10^{17}	۳٫۱۶۶۹
i-Q(۱٫۲۵)	5×10^{15}	۳٫۳۶۴۰
i-Q(۱٫۲۵)	5×10^{15}	۳٫۳۶۴۰
i-Q(۱٫۲۵)	5×10^{15}	۳٫۳۶۴۰
n+-InP	6×10^{16}	۳٫۱۶۹۱
n++-InP	1×10^{18}	۳٫۱۶۴۶
SI-InP	5×10^{15}	۳٫۱۶۹۷

موجبرهای مستقیم. ساختمان لایه سه نوع موجبر فعال و غیر فعال در شکل ۲ نشان داده شده است.

از مزیت ساختمان pin این است که در بایاس معکوس به صورت یک آشکارساز بوده و در بایاس مستقیم به صورت تقویت‌کننده نوری عمل می‌نماید، لذا ساختار فوق قابلیت مجتمع‌سازی ادوات مختلف فعال نوری همچون آشکارساز، مدولاتور و تقویت‌کننده نوری نیمه‌هادی و ادوات غیر فعال نوری همچون MMI، MZI و AWG را داراست. در ضمن از این ساختار لایه قبلاً در ادوات مختلف نوری همچون مدولاتور [۵]، لیزر [۶] و آشکارساز نوری [۷] و [۸] استفاده شده است. پهنای ادوات با عمق خوردگی زیاد $1/5 \mu\text{m}$ در نظر گرفته شده است زیرا اختلاف ضریب شکست مؤثر برای مدهای اصلی TE و TM صفر خواهد بود. پهنای موجبرهای با عمق خوردگی کم $3 \mu\text{m}$ می‌باشد که می‌تواند دو مود را از خود عبور دهد و برای اتصال موجبرهای با پهنای متفاوت از تیپ‌های

پوششی با ناخالصی p و لایه‌های بافر با ناخالصی n قرار دارد. ناخالصی لایه‌های پوششی و بافر به صورت تدریجی افزایش می‌یابد تا میزان جذب نور را در لایه‌های مجاور لایه موجبری کاهش دهد. در ساختمان آشکارساز نوری یک لایه $Q(1/55)$ به ضخامت 120 nm در بین دو لایه $Q(1/25)$ به ضخامت‌های 140 nm و 190 nm قرار داده شده است به گونه‌ای که مجموعه ضخامت سه لایه 500 nm است. این لایه، وظیفه جذب را در طول موج $1/55 \mu\text{m}$ به عهده دارد. در جدول ۱ مشخصات لایه‌های ادوات غیر فعال و در جدول ۲ مشخصات لایه‌های ادوات فعال نشان داده شده است.

در این طرح لازم است که سه نوع ساختار موجبری استفاده شود: موجبرهای فعال با زدایش عمیق قابل استفاده در موجبر حلقوی تشدیدگر حلقوی برای پیاده‌سازی آشکارساز نوری، موجبرهای غیر فعال با زدایش عمیق برای مدولاتور و موجبرهای غیر فعال با زدایش عمیق کم برای

تشدیدگر حلقوی علاوه بر جداسازی طول موج، وظیفه آشکارسازی یکی از طول موج‌های دریافتی را نیز بر عهده دارد و لذا در این طرح، موجبر حلقوی ۱ با ساختار فعال طراحی شده است. توان جذب‌شده در حلقه پس از یک دور گردش میدان نوری برابر است با

$$P_{abs} = P_{ring} (1 - e^{(-\Gamma \alpha L)}) \quad (۶)$$

با استفاده از ارتباط متقابل میدان‌های ورودی و چرخشی و روابط برهم‌کنشی بین آنها پاسخ طیفی بازده کوانتومی آشکارساز نوری به دست می‌آید [۸]

$$\eta = \frac{(1 - |t|^2)(1 - e^{(-\Gamma \alpha L)})}{1 + |t|^2 e^{(-\Gamma \alpha L)} - 2 \cos(\theta + \phi_t) e^{(-\Gamma \alpha L)}} \quad (۷)$$

پهنای باند مؤثر آشکارساز نوری به وسیله پهنای باند نوری وابسته به طول عمر فوتون‌ها (f_{opt})، پهنای باند ناشی از فرایند ترابرد حامل‌ها (f_{tr}) و پهنای باند عناصر پارازیتیکی RC (f_{RC}) محدود می‌گردد

$$\frac{1}{f_{\tau dB}} = \frac{1}{f_{RC}} + \frac{1}{f_{tr}} + \frac{1}{f_{opt}} \quad (۸)$$

$$f_{opt} = \frac{c}{2\pi n_{eff} L} \cos^{-1} \left(1 - \frac{(|t| e^{-\Gamma \alpha L})^2}{2|t| e^{-\Gamma \alpha L}} \right) \quad (۹)$$

$$f_{tr} = \frac{v_g \bar{V}}{d_{dep}} \quad (۱۰)$$

که $\bar{V} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\frac{1}{\sqrt{V_e}} + \frac{1}{\sqrt{V_h}})$ از $\frac{1}{\sqrt{V_e}} = (\frac{1}{\sqrt{2}})(\frac{1}{\sqrt{V_e}} + \frac{1}{\sqrt{V_h}})$ به دست می‌آید و با توجه به مقادیر $\bar{V}_h = 4 \times 10^8$ m/s، $\bar{V}_e = 6 \times 10^8$ m/s، برای مواد $Q(1.55)$ و $f_{RC} = 31.83$ GHz، پهنای باند $d_{dep} = 50$ nm به دست می‌آید. پهنای باند ناشی از فرایند شارژ مدار RC است که برابر است با

$$f_{RC} = \frac{1}{2\pi((R_L + R_S)C_{pd} + C_{pd}R_L)} \quad (۱۱)$$

که $R_L = 50 \Omega$ ، $R_S = \rho_c / wL$ ، $\rho_c = 5 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}$ ، $w = 5 \mu\text{m}$ ، $L = 50 \mu\text{m}$ طول آشکارساز است که R شعاع حلقه، w پهنای موجبر و C_{pd} خازن پیوند pin می‌باشد

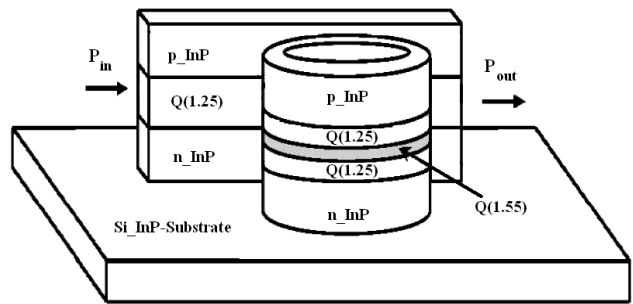
$$C_{pd} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d_{dep}} \quad (۱۲)$$

ضریب گذردهی نسبی $\epsilon_r = 13$ فرض شده است [۸].

۳-۲ انعکاس‌دهنده تشدیدگر حلقوی

انعکاس‌دهنده حلقوی از دو حلقه و یک موجبر مستقیم تشکیل شده است که سه قسمت فوق مطابق با شکل ۴ با یکدیگر تزویج شده‌اند. برای تحلیل این انعکاس‌دهنده از روش ماتریس انتقال استفاده می‌شود [۱۰] و در این انعکاس‌دهنده، میدان الکتریکی \vec{E}_i به موجبر مستقیم تابیده می‌شود. انتخاب صحیح شعاع حلقه‌ها و ضریب تزویج بین حلقه‌ها و موجبر مستقیم باعث می‌شود که فقط میدان الکتریکی تابیده‌شده در طول موج‌های خاصی از همان سر ورودی خارج شود و در سایر طول موج‌ها بخشی از میدان الکتریکی بازتابیده و بخشی دیگر از سر خروجی موجبر مستقیم خارج شود. در این انعکاس‌دهنده، ضریب تزویج و انتقال بین حلقه‌ها (k_r, t_r) و بین موجبر مستقیم و حلقه‌ها برابر با (k_i, t_i) و (k_r, t_r) فرض شده است به گونه‌ای که

$$t_i^2 + k_i^2 = 1, \quad i = 1, 2, 3 \quad (۱۳)$$



شکل ۳: ساختمان آشکارساز حلقوی pin.

افقی و همچنین برای اتصال موجبرهای با زدایش کم عمق و عمیق از گذرهای کم عمق به عمیق [۹] استفاده شود.

۲-۲ طراحی جداساز طول موج و آشکارساز نوری

در شکل ۳ تشدیدگر حلقوی ۱ نشان داده شده که وظیفه جداسازی طول موج‌های ورودی λ_i و λ_j و همچنین آشکارسازی طول موج λ_k را بر عهده دارد. تشدیدگر حلقوی ۱ در طول موج λ_k در حالت تشدید قرار دارد لذا طول موج λ_k به آن تزویج می‌شود. طول موج‌هایی که به داخل حلقه تزویج می‌شوند برابر است با [۱۰]

$$\lambda_k = \frac{n_{eff} L}{m} \quad (۱)$$

که n_{eff} ضریب شکست مؤثر موجبر غیر فعال با زدایش عمیق بوده و با استفاده از نرم‌افزار COMSOL [۱۱] محاسبه می‌شود، $L = 2\pi r$ طول مؤثر موجبر حلقوی، r شعاع متوسط حلقه و m عدد تشدید است که به ازای اعداد صحیح مثبتی، $\lambda_k = \lambda_j$ است. فاصله بین طول موج‌های جداسازی که معرف فاصله کانالی فرستنده-گیرنده نوری نیز می‌باشند با استفاده از (۲) به دست می‌آید

$$FSR = \frac{\lambda^2}{n_g L} \quad (۲)$$

که λ طول موج‌های کار در فرستنده-گیرنده است و n_g ضریب شکست گروهی است

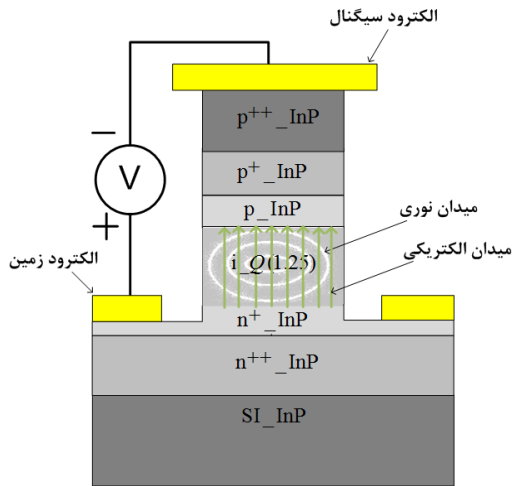
$$n_g = n_{eff} - \lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial \lambda} \quad (۳)$$

توان خروجی P_{out} موجبر مستقیم تشدیدگر حلقوی برابر است با [۱۰]

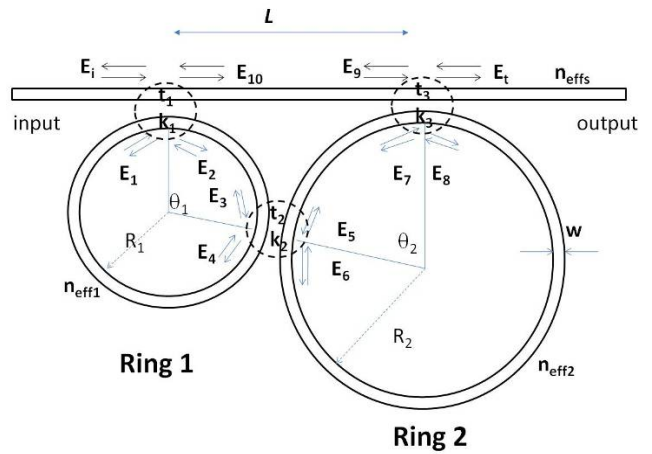
$$P_{out} = \frac{e^{(-\Gamma \alpha L)} + |t|^2 - 2|t| \cos(\theta + \phi_t) e^{(-\Gamma \alpha L)}}{1 + |t|^2 e^{(-\Gamma \alpha L)} - 2|t| \cos(\theta + \phi_t) e^{(-\Gamma \alpha L)}} \quad (۴)$$

که α ضریب تضعیف حلقه (معمولاً ضریب تضعیف حلقه ناشی از قسمت موهومی لایه جذب $Q(1.55)$ می‌باشد و از تلفات تشعشعی حلقه در مقابل این تضعیف صرف نظر می‌شود)، $t = |t| \exp(j\phi_t)$ ضریب انتقال خودی حلقه، $\theta = 4\pi n_{eff} r / \lambda$ و Γ ضریب تحدید لایه جذب است. در حالت تشدید حلقه، فاز $\theta + \phi_t = 2\pi m$ است. توان تزویج‌شده به ورودی حلقه با برابر است با

$$P_{ring} = \frac{1 - |t|^2}{1 + |t|^2 e^{(-\Gamma \alpha L)} - 2|t| \cos(\theta + \phi_t) e^{(-\Gamma \alpha L)}} \quad (۵)$$



شکل ۵: ساختمان لایه‌های مدولاتور و میدان‌های نوری و الکتریکی.



شکل ۴: طرح شمایی انعکاس‌دهنده تشدیدگر حلقوی.

که n_{eff} ضریب شکست مؤثر موجبر، n_{ev} ضریب شکست مؤثر محیط اطراف موجبر، n_{ev} ضریب شکست مؤثر تیغه موجبر، λ طول موج و R شعاع خم است [۱۲].

با فرض $t_1 = t_r = t$ ، $k_1 = k_r = k$ ، $R_1 = R_r$ و با فرض این که هیچ موجی از سر خروجی موجبر مستقیم وارد نشود ($\vec{E}_i = 0$) و میدان ورودی برابر با $\vec{E}_i = 1$ باشد، می‌توان توان برگشتی $|\vec{E}_i|$ را از (۱۸) محاسبه نمود [۱۰] که در آن $\alpha = \exp(-2\pi R \alpha_i)$ است.

۲-۴ مدولاتور

در طرح نشان داده شده در شکل ۱، از یک شیفت‌دهنده فاز برای مدولاتور استفاده شده است که از ساختار pin استفاده می‌کند. در شکل ۵ سطح مقطع این مدولاتور به همراه ولتاژ معکوس اعمالی نشان داده شده است. تمامی لایه‌های مدولاتور مشابه آشکارساز pin (جدول ۱) می‌باشد به جز این که لایه $i-Q(1/55)$ با لایه $i-Q(1/25)$ جایگزین می‌گردد یعنی لایه بدون آلیندگی (i -doped) فقط از ماده $Q(1/25)$ می‌باشد. با اعمال بایاس معکوس، میدان الکتریکی بر روی لایه $i-Q(1/25)$ و بخشی از لایه‌های مجاور (ناحیه تخلیه) به وجود خواهد آمد. با افزایش بایاس معکوس، پهنای ناحیه تخلیه و میدان الکتریکی موجود در این ناحیه افزایش خواهد یافت. به علت میدان الکتریکی و تغییرات در تراکم

در شکل ۴ میدان‌های در جهت عقربه‌های ساعت به صورت \vec{E} و در خلاف جهت عقربه‌های ساعت به صورت \vec{E} نمایش داده شده است. حلقه ۱ و ۲ به ترتیب دارای ضریب شکست و شعاع R_1, n_{eff1} و R_2, n_{eff2} و موجبر مستقیم دارای ضریب شکست مؤثر n_{effs} و فاصله بین مرکز دو حلقه برابر با L است. مؤلفه‌های میدان و ارتباط آنها با یکدیگر برابر است با

$$\begin{aligned} X_r &= P_r X_1, & X_r &= Q_r X_r \\ X_r &= P_r X_r, & X_s &= Q_r X_r \\ X_s &= P_s X_s \end{aligned} \quad (14)$$

پس خواهیم داشت

$$\begin{aligned} X_r &= P_r Q_r P_r Q_r P_r X_1 = M X_1 \\ M &= P_r Q_r P_r Q_r P_r \end{aligned} \quad (15)$$

که (۱۶) حاصل می‌شود، آن گاه تلفات تشعشی α_i برای یک خم برابر است با

$$\begin{aligned} \alpha_i &= \frac{\alpha_y^r}{k_r n_{eff} (1 + \frac{\alpha_y w}{r})} \cdot \frac{k_y^r}{n_{er}^r - n_{el}^r} \cdot e^{(\alpha_y w)} \cdot e^{\frac{-r \alpha_y^r}{r n_{eff}^r k_r^r}} \\ \alpha_y &= k_r \sqrt{n_{eff}^r - n_{el}^r}, & k_y &= k_r \sqrt{n_{er}^r - n_{eff}^r}, & k_r &= \frac{r \pi}{\lambda} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} X_1 &= \begin{bmatrix} \vec{E}_1 \\ \vec{E}_i \\ \vec{E}_i \\ \vec{E}_1 \end{bmatrix}, & X_r &= \begin{bmatrix} \vec{E}_r \\ \vec{E}_1 \\ \vec{E}_1 \\ \vec{E}_r \end{bmatrix}, & X_r &= \begin{bmatrix} \vec{E}_r \\ \vec{E}_r \\ \vec{E}_r \\ \vec{E}_r \end{bmatrix}, & P_i &= \begin{bmatrix} -t_i & 1 & & \\ k_i & k_i & & \\ & -1 & t_i^* & \\ & k_i & k_i & \\ & & & -t_i & 1 \\ & & & k_i & k_i \\ & & & & & -t_i & 1 \\ & & & & & k_i & k_i \end{bmatrix}, & Q_i &= \begin{bmatrix} & & & e^{(-\gamma_i)} \\ & & & e^{(\Omega_i - \gamma_i)} \\ & & e^{(-\gamma_i)} & \\ e^{(\Omega_i - \gamma_i)} & & & \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\gamma_i = R_i \theta_i (\beta_i + \alpha_i) \quad \Omega_i = \beta_i R_i \pi \quad \vec{E}_s = \vec{E}_s e^{-j\beta L} \quad \vec{E}_r = \vec{E}_r e^{-j\beta L} \quad \beta_i = \frac{r \pi n_{eff}}{\lambda} \quad \beta = \frac{r \pi n_{effs}}{\lambda}$$

$$|\vec{E}_i|^r = \frac{(\frac{k_r k^r (\alpha^r + 1)}{r \alpha t})^r}{((\cos \theta - \frac{t_r (1 + \alpha^r t^r)}{r \alpha t})^r + (\frac{k_r (1 - \alpha^r t^r)}{r \alpha t})^r)} \times ((\cos \theta - \frac{t_r (1 + \alpha^r t^r)}{r \alpha t} + \frac{t_r (1 - \alpha^r t^r) (1 - \alpha^r t^r)}{r \alpha t})^r + \frac{1 - \alpha^r}{1 + \alpha^r} \sin^r \theta) \quad (18)$$

که N_d تراکم حامل‌ها و A_{BF} یک ثابت است. ثابت‌های موجود در (۱۹) تا (۲۲) برای دو ماده InP و Q(۱,۲۵) در جدول ۳ نشان داده شده است. تغییرات ضریب شکست کلی برابر با مجموع ضرایب شکست ناشی از چهار اثر فوق است

$$\Delta n = \Delta n_{pockels} + \Delta n_{kerr} + \Delta n_{plasma} + \Delta n_{BF} \quad (23)$$

با توجه به این که میدان الکتریکی فقط در ناحیه تخلیه با شار نوری $I(x)$ هم‌پوشانی دارد و موجب تغییرات فاز می‌گردد، لذا ضریب شکست ناشی از این هم‌پوشانی به صورت (۲۴) است

$$\Delta N_{eff} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \sum \Delta n \cdot I(x) dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} I(x) dx} \quad (24)$$

جابه‌جایی فاز ایجادشده در اثر تغییرات ضریب شکست برای یک مدولاتور به طول L برابر است با

$$\Delta \phi(V) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta N_{eff} L \quad (25)$$

به عبارت دیگر با دانستن ولتاژی که موجب تغییر ضریب شکست ΔN_{eff} شود می‌توان با اعمال آن ولتاژ به الکترودها، تغییر فاز 180° را به دست آورد [۴]. از طرفی، پهنای باند مدولاتور در [۱۴] محاسبه شده است

$$\tau_f = \frac{n_{eff} L}{c \kappa^2} \quad (26)$$

$$f_{\tau dB}^{opt} = \frac{1}{2\pi \tau_f} \quad (27)$$

که n_{eff} ضریب شکست مؤثر موجبر، $L = 2\pi R$ طول مؤثر موجبر حلقوی، r شعاع متوسط حلقه، c ضریب شکست نور و κ ضریب تزویج تشدیدگر حلقوی است.

۳- نتایج شبیه‌سازی

مود اصلی TE منتشرشونده در موجبرها با زدایش عمق کم و زیاد که به وسیله نرم‌افزار COMSOL شبیه‌سازی شده است به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده و همچنین برای محاسبه ضریب شکست مؤثر از نرم‌افزار COMSOL استفاده گردیده است. در ابتدا، ساختار لایه موجبر در این نرم‌افزار پیاده‌سازی شده و در دو طول موج مختلف ضرایب شکست مؤثر محاسبه گردیده‌اند و سپس از (۳) ضریب شکست گروه در شکل ۸ طیف انتقالی تشدیدگر حلقوی ۱ برای سه مقدار ضریب تزویج $\kappa = 0.25, 0.5, 0.75$ نشان داده شده است. دیده می‌شود که فاصله بین دو طول موج دریافتی و ارسالی ۱۶ nm است و با افزایش ضریب تزویج، میزان نوری که در طول موج‌های λ به داخل حلقه تزویج می‌شود افزایش و توان نوری انتقال‌یافته کاهش می‌یابد و در طول موج‌های λ توان انتقالی افزایش و توان تزویجی کاهش خواهد یافت.

در شکل‌های ۹ تا ۱۱ با استفاده از نرم‌افزار OptiFDTD [۱۵]، انتشار نور در موجبر ورودی، حلقه تشدیدگر و موجبر خروجی برای دو طول موج $\lambda_1 = 1550 \text{ nm}$ و $\lambda_2 = 1551.6 \text{ nm}$ نشان داده شده است. همان طور که دیده می‌شود در طول موج λ در دو حالت با لایه جاذب Q(۱/۵۵) (شکل ۱۰) و بدون لایه جاذب Q(۱/۵۵) (شکل ۹) انتشار نور ترسیم شده است تا صحت عملکرد حلقه تشدید در این طول موج بررسی شود. شعاع

جدول ۳: پارامترهای مورد استفاده در تغییرات ضریب شکست ناشی از چهار اثر پاکلز، کر، پلاسما و پرشدگی باند برای مواد InP و Q(۱,۲۵).

واحد	مقدار	پارامتر
m/V	1.4×10^{-12} (InP)	r_{31}
m/V	1.6×10^{-12} (Q, ۱,۲۵)	r_{31}
m^2/V^2	11.9×10^{-20} (Q, ۱,۲۵)	s_{12}
m^2/V^2	21.5×10^{-20} (Q, ۱,۲۵)	s_{11}
m^2	3.65×10^{-27} (InP)	$A(E)$
m^2	5.7×10^{-27} (Q, ۱,۲۵)	$A(E)$
m^2	5×10^{-21} (InP)	A_{BF}
m^2	14×10^{-21} (Q, ۱,۲۵)	A_{BF}

حامل‌ها، ضریب شکست لایه‌ها تغییر خواهد کرد. تغییر ضریب شکست از چهار اثر الکترواپتیکی کر^۱، پاکلز^۲، پلاسما^۳ و پرشدگی باند^۴ تأثیر می‌پذیرد [۱۳].

اثر پاکلز در مواد نامتقارن مرکزی^۵ وجود دارد که مواد InP/InGaAsP از جمله آنها می‌باشد. این اثر با میدان الکتریکی به طور خطی متناسب بوده و همچنین به جهت موجبر نسبت به جهت بلور بستگی دارد و با تغییر پلاریزاسیون تغییر می‌کند یعنی پلاریزاسیون TM بر روی ضریب شکست تأثیری ندارد و برای پلاریزاسیون TE به صورت زیر تأثیر دارد

$$\Delta n_{pockels} = \pm \frac{1}{2} n^3 r_{31} |E| \quad (19)$$

که علامت مثبت برای جهت انتشار 160° و علامت منفی برای جهت 110° است. n ضریب شکست ماده، r_{31} ضریب الکترواپتیکی ماده و E میدان الکتریکی اعمالی ناشی از اعمال ولتاژ بایاس معکوس است. اثر کر همراه با اثر پاکلز اتفاق می‌افتد و با مجذور میدان الکتریکی رابطه دارد

$$\Delta n_{kerr} = \frac{1}{2} n^5 s_{12,11} |E|^2 \quad (20)$$

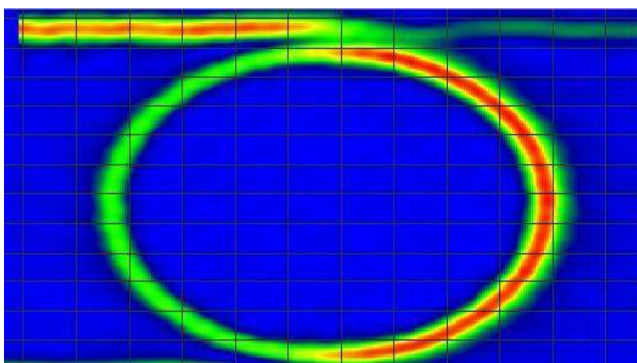
که s_{12} و s_{11} به ترتیب ضرایبی برای پلاریزاسیون TE و TM می‌باشند. اثر کر برای ماده InP ضعیف است و اثر پلاسما مربوط به انتقال بین باندهای^۶ در خلال انتقال حامل‌ها به تراز انرژی بالاتر می‌باشد. تغییر تراکم حامل‌ها موجب تغییر ضریب شکست خواهد شد

$$\Delta n_{plasma} = A(E) N_d = \frac{N_d \lambda^2 e^2}{\lambda \pi^2 \epsilon_0 \epsilon_c n m} \quad (21)$$

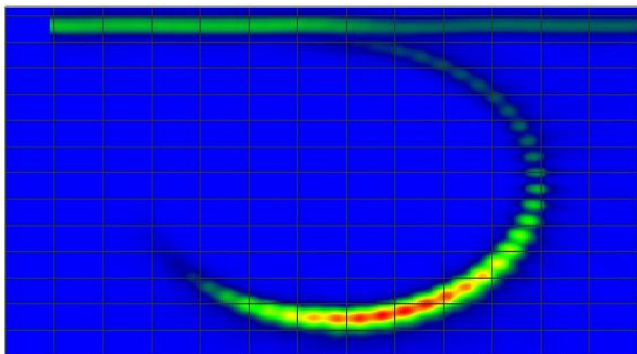
که e بار الکترون، ϵ_c ضریب نفوذپذیری خلأ، c سرعت نور در خلأ، n ضریب شکست و m جرم مؤثر الکترون و حفره می‌باشد. اثر پرشدگی باند مربوط به پرکردن حالت‌های خالی در نوارهای انرژی توسط الکترون‌های آزاد است. با اعمال میدان الکتریکی، تراکم حامل‌ها در ناحیه تخلیه تغییر می‌کند و در نتیجه ضریب شکست تغییر خواهد کرد. این اثر در ماده InGaAsP بسیار قوی‌تر از ماده InP می‌باشد

$$\Delta n_{BF} = A_{BF} N_d \quad (22)$$

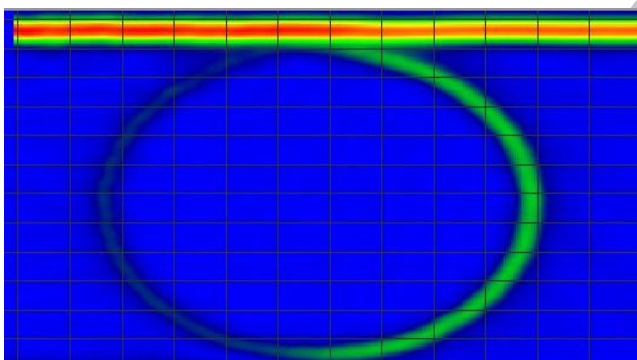
1. Kerr Effect
2. Pockels Effect
3. Plasma Effect
4. Band-Filling Effect
5. Non-Centrosymmetric
6. Intra-Band Transition



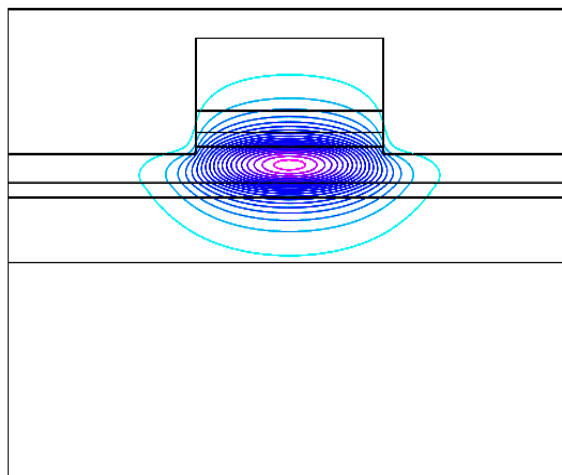
شکل ۹: انتشار نور در تشدیدگر حلقوی برای طول موج λ_1 در حالی که موجبر حلقوی در تشدیدگر حلقوی ساختار غیر فعال دارد.



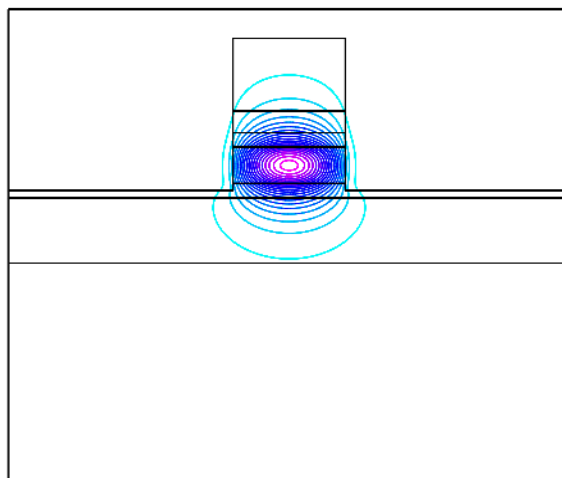
شکل ۱۰: انتشار نور در تشدیدگر حلقوی برای طول موج λ_1 در حالی که موجبر حلقوی در تشدیدگر حلقوی ساختار فعال دارد و همزمان با جداسازی، آشکارسازی هم صورت می‌گیرد. مشاهده می‌شود که نور در تشدیدگر حلقوی به تدریج در لایه جاذب ($Q(1,55)$) جذب می‌شود.



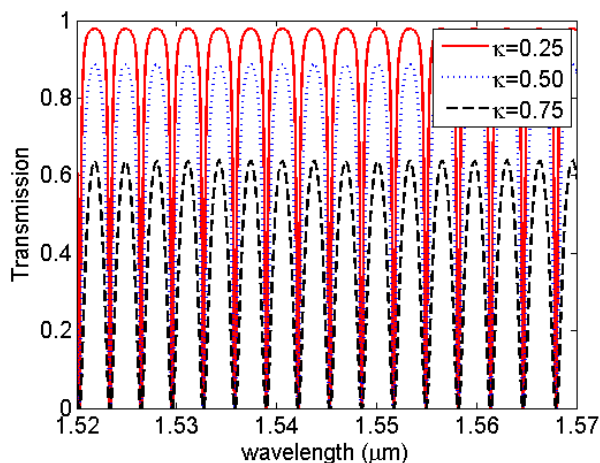
شکل ۱۱: انتشار نور در تشدیدگر حلقوی برای طول موج λ_1 . این طول موج به سمت انعکاس‌دهنده و مدولاتور هدایت می‌شود.



شکل ۶: مود اصلی TE در ساختار غیر فعال با زدایش کم عمق.



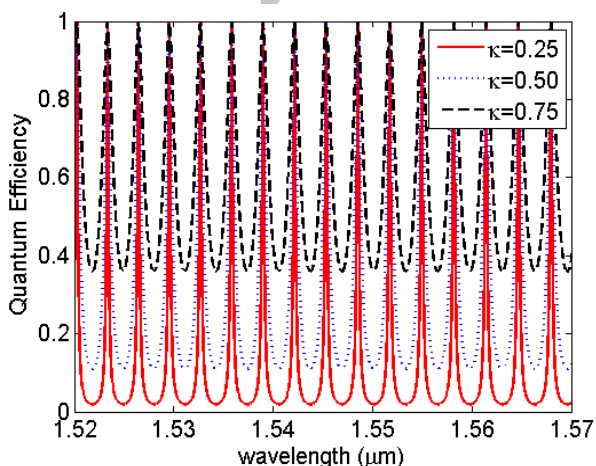
شکل ۷: مود اصلی TE در ساختار غیر فعال با زدایش عمیق.



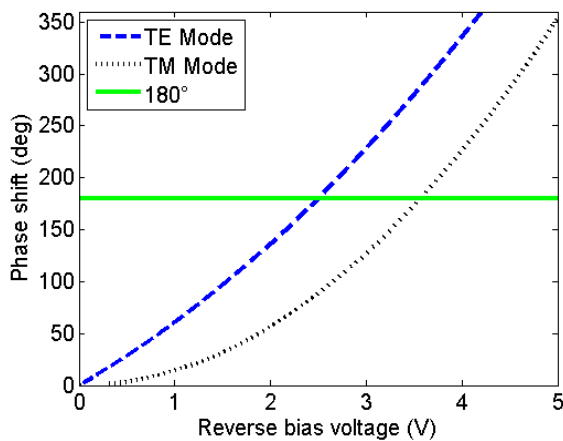
شکل ۸: طیف انتقالی تشدیدگر حلقوی برای سه مقدار ضریب تزویج κ . در شکل فاصله بین λ_1 و λ_2 برابر با $1,6 \text{ nm}$ است و طول موج‌های λ_1 و λ_2 مقادیر بیشینه و کمینه در هر نمودار می‌باشند.

حلقه برای داشتن محدوده آزاد طیفی 200 GHz ($1,6 \text{ nm}$) با استفاده از (۲) برابر با $31,924 \mu\text{m}$ محاسبه شده است.

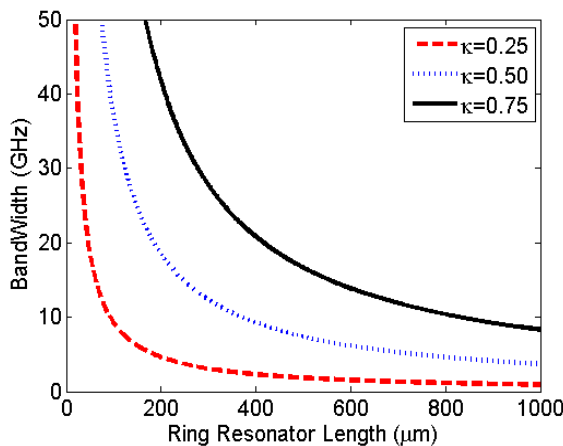
برای محاسبه بازده کوانتومی آشکارساز نوری از (۷) استفاده شده و در شکل ۱۲ بازده کوانتومی نرمالیزه شده آشکارساز تشدیدگر حلقوی نشان داده شده است. به خوبی دیده می‌شود که بازده کوانتومی داخلی برای $\kappa = 0,25$ حدود 100% می‌باشد.



شکل ۱۲: بازده کوانتومی نرمالیزه شده آشکارساز تشدیدگر حلقوی.



شکل ۱۶: تغییرات شیفیت فاز مدولاتور بر حسب ولتاژ اعمالی به الکترودهای آن برای مودهای TE و TM.

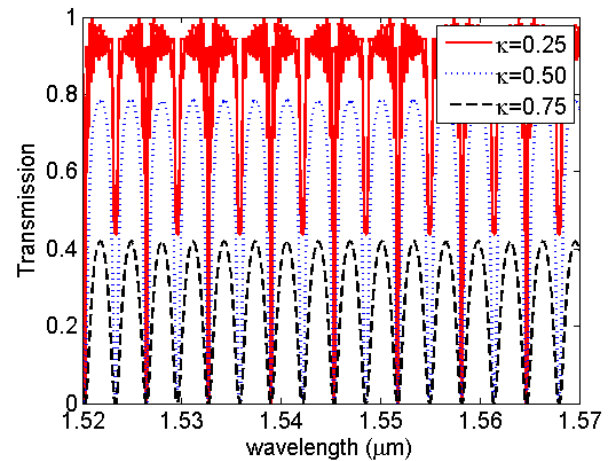


شکل ۱۷: پهنای باند مدولاتور حلقوی بر حسب طول حلقه برای سه مقدار ضریب تزویج.

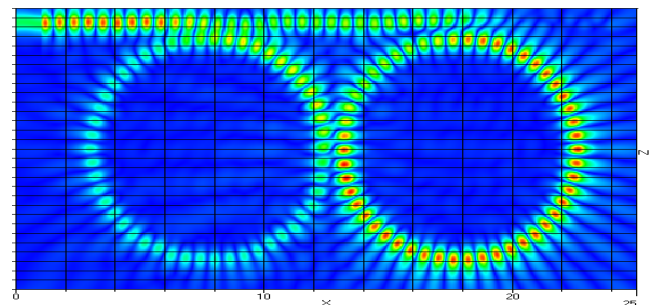
برای محاسبه تغییرات ضریب شکست ناشی از اثرات کر و پاکلز به اندازه‌های میدان الکتریکی و میدان نوری نیاز داریم که میدان الکتریکی با استفاده از نرم‌افزار SILVACO [۱۶] محاسبه و در شکل ۱۵ برای ساختمان لایه مدولاتور ترسیم شده است و میدان نوری در شکل‌های ۶ و ۷ رسم شده است.

برای شبیه‌سازی اثرات الکترواپتیکی مدولاتور، تغییرات شیفیت فاز مدولاتور بر حسب ولتاژ اعمالی به الکترودهای مدولاتور برای مودهای TE و TM با استفاده از (۱۹) تا (۲۲) محاسبه شده و در شکل ۱۶ ترسیم شده است. با انتخاب ولتاژ معکوس $2.5V$ (برای مود TE) و $3.5V$ (برای مود TM) می‌توان به تغییر فاز 180° رسید و عمل کلیدزنی را انجام داد و یک مدولاتور دیجیتال داشت. نمودار تغییرات پهنای باند مدولاتور بر حسب طول حلقه و ضرایب تزویج، محاسبه و در شکل ۱۷ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب تزویج می‌توان پهنای باند بیشتری داشت و به راحتی برای طول حلقه کمتر از $100 \mu m$ و ضریب تزویج بزرگ‌تر از 0.5 به پهنای باند $40 GHz$ دست یافت. در صورتی که بتوان از المان‌های پارازیتیکی، شامل مقاومت نیمه‌هادی‌ها و خازن اتصال pin صرف نظر نمود می‌توان فرض نمود که پهنای باند نوری با پهنای باند الکتریکی در مدولاتور یکسان خواهد بود.

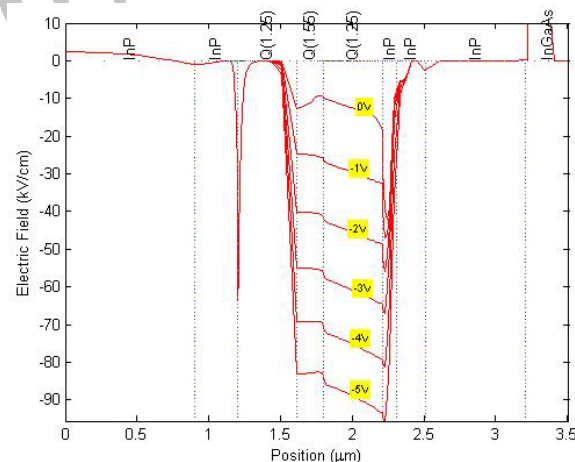
برای مدولاتورهای حلقوی با شعاع کوچک، این فرض صحیح می‌باشد. پهنای باند نوری آشکارساز حلقوی با استفاده از (۹) با استفاده از نرم‌افزار MATLAB برای سه مقدار ضریب تزویج در شکل ۱۸ ترسیم شده است. برای این ساختار آشکارساز نوری، پهنای باند ناشی از فرایند



شکل ۱۳: توان موجود در موجبر مستقیم در انعکاس‌دهنده تشدیدگر حلقوی.



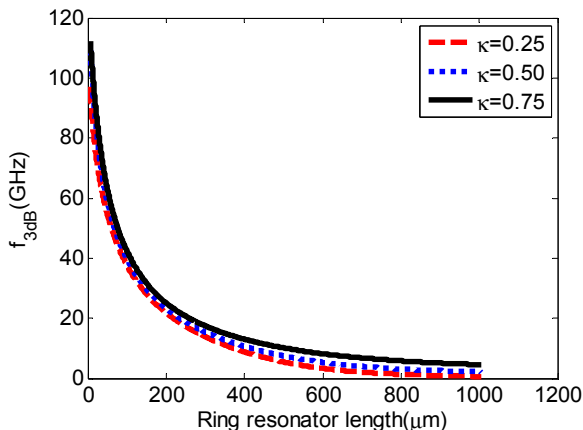
شکل ۱۴: انتشار مود TE و انعکاس آن در طول موج ارسالی $1551.6 nm$ در انعکاس‌دهنده تشدیدگر حلقوی.



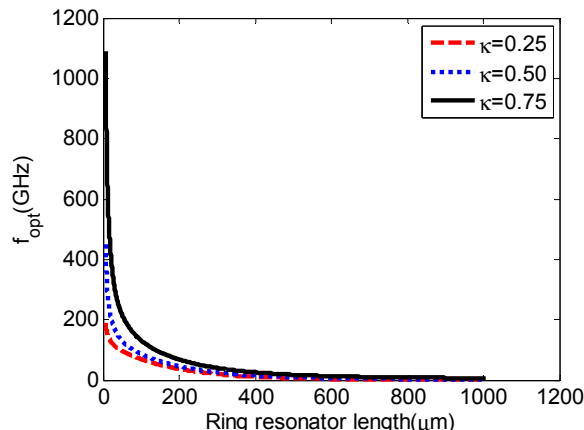
شکل ۱۵: نمودارهای میدان الکتریکی بر حسب ولتاژ در لایه‌های مختلف مدولاتور.

در شکل ۱۳ عملکرد انعکاس‌دهنده تشدیدگر حلقوی بر حسب طول موج برای سه مقدار ضریب تزویج $\kappa = 0.25, 0.5, 0.75$ نشان داده شده است به گونه‌ای که در طول موج‌های λ تمامی موج تابیده شده به آن از همان سر ورودی بازتابیده می‌شود. مشاهده می‌شود که در بعضی از طول موج‌ها، کل توان نوری ارسالی، منعکس شده است و در سایر طول موج‌ها بسته به ضریب تزویج بخشی از نور منعکس شده و بخشی دیگر منتقل می‌شود. لذا طول موج λ باید به صورت مناسبی انتخاب شود که کل توان در آن طول موج منعکس شده و عملکرد فرستنده-گیرنده بهینه شود.

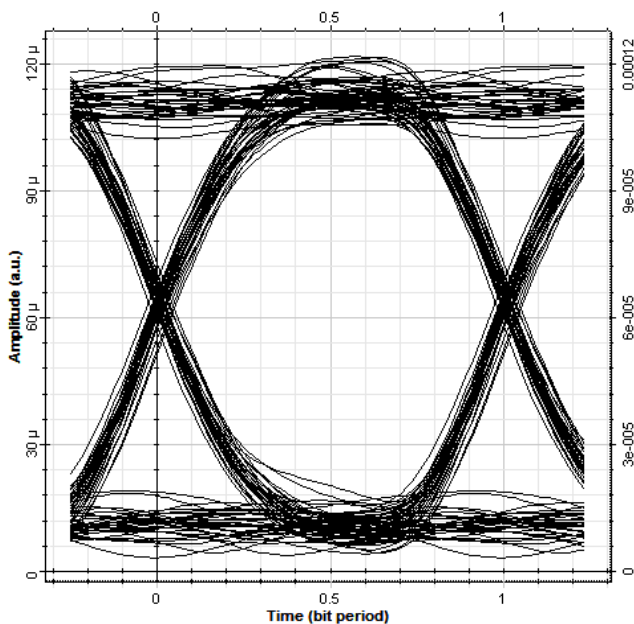
در شکل ۱۴ توزیع میدان الکتریکی و نحوه انتشار آن در طول موج $\lambda = 1551.6 nm$ نشان داده شده است. دیده می‌شود که کل توان در این طول موج منعکس می‌شود و تأییدکننده شکل ۱۳ نیز می‌باشد.



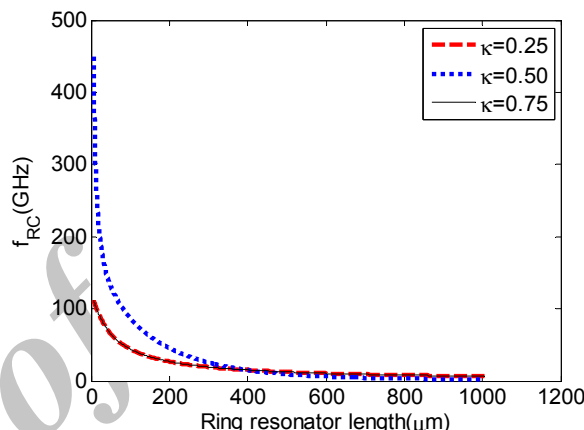
شکل ۲۰: پهنای باند کلی آشکارساز حلقوی برای سه مقدار ضریب تزویج.



شکل ۱۸: پهنای باند نوری آشکارساز حلقوی بر حسب طول حلقه برای سه مقدار ضریب تزویج.



شکل ۲۱: دیاگرام چشمی برای مدولاتور حلقوی. فرکانس سیگنال اطلاعات ۴۰ GHz است.



شکل ۱۹: پهنای باند ناشی از فرایند شارژ مدار RC در آشکارساز حلقوی برای سه مقدار ضریب تزویج.

فرستنده-گیرنده سه نوع ساختمان لایه برای موجبرهای فعال و غیر فعال استفاده شده است. روابط طراحی جداساز و آشکارساز نوری، مدولاتور و انعکاس دهنده حلقوی ارائه شده و سپس بازده کوانتومی و توزیع میدان الکتریکی در آشکارساز نوری، میدان الکتریکی، تغییر فاز و پهنای باند مدولاتور و پاسخ طیفی و توزیع میدان الکتریکی در انعکاس دهنده حلقوی محاسبه شده‌اند. این فرستنده-گیرنده به راحتی برای حلقه‌های تشدیدگر با شعاع $16 \mu\text{m}$ و ضریب تزویج $\kappa=0.5$ ، پهنای باند بیشتر از ۴۰ GHz را به نمایش می‌گذارد.

مراجع

- [1] T. Takeuchi, T. Sasaki, M. Hayashi, K. Hamamoto, K. Makita, K. Taguchi, and K. Komatsu, "A transceiver PIC for bidirectional optical communication fabricated by bandgap energy controlled selective MOVPE," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 8, no. 3, pp. 361-363, Mar. 1996.
- [2] S. J. Park, et al., "WDM-PON system based on the laser light injected reflective semiconductor optical amplifier," *Optical Fiber Technology*, vol. 12, no. 2, pp. 162-169, Apr. 2006.
- [3] J. Prat, C. Arellano, V. Polo, and C. Bock, "Optical network unit based on a bidirectional reflective semiconductor optical amplifier for fiber-to-the-home networks," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, no. 1, pp. 250-252, Jan. 2005.

شارژ مدار RC با استفاده از (۱۱) محاسبه و برای سه مقدار ضریب تزویج مختلف در شکل ۱۹ ترسیم شده است. برای محاسبه پهنای باند کلی آشکارساز تشدیدگر حلقوی از (۸) استفاده گردیده و در شکل ۲۰ برای سه مقدار ضریب تزویج ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که f_w و f_{RC} عوامل محدودکننده پهنای باند کلی آشکارساز حلقوی می‌باشند و ضریب تزویج تأثیر چندانی بر پهنای باند برای طول‌های حلقه کمتر از $100 \mu\text{m}$ ندارد و می‌توان به پهنای باند بیشتر از ۴۰ GHz دست یافت.

معمولاً نمودار چشمی، نمایشی است که به طور متناوب از سیگنال داده نمونه‌برداری دیجیتالی می‌کند و کیفیت سیگنال را به وسیله آن می‌توان ارزیابی کرد. در شکل ۲۰ با استفاده از نرم‌افزار OptiSystem، دیاگرام چشمی برای مدولاتور حلقوی در فرکانس ۴۰ Gb/sec و برای فرمت مدولاسیون NRZ ترسیم شده است. کمینه توان دریافتی مورد نیاز برای رسیدن به BER مطلوب برابر با -19 dBm می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک نوع فرستنده-گیرنده یک پارچه انعکاسی جدید مبتنی بر تشدیدگرهای حلقوی برای جداسازی طول موج‌های دریافتی و آشکارسازی نور مدوله‌شده حاوی سیگنال اطلاعات و مدوله‌نمودن نور پیوسته دریافتی و انعکاس نور مدوله‌شده به شبکه مخابرات نوری طراحی شده است. در این فرستنده-گیرنده ساختمان مدولاتور و آشکارساز نوری از نوع pin است. فاصله فرکانسی بین طول موج‌های دریافتی و ارسالی استفاده‌شده در فرستنده-گیرنده برابر با 16 nm می‌باشد. در این نوع

مهدی کاری در سال ۱۳۸۰ مدرک کارشناسی مهندسی برق گرایش الکترونیک خود را از دانشگاه سمنان و در سال ۱۳۸۹ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق گرایش الکترونیک خود را از دانشگاه آزاد واحد تحصیلات تکمیلی تهران جنوب دریافت نمود. از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۷ در زمینه سیستم‌های کنترلی با مراکز تحقیقاتی متعددی همکاری نموده و از سال ۱۳۸۷ و با ورود به مقطع کارشناسی ارشد در زمینه طراحی مدارات مجتمع نوری نیز تحقیقاتی داشته و مقالاتی ارائه نموده است. زمینه‌های علمی مورد علاقه نامبرده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند سیستم‌های کنترلی، شبیه‌سازی، ساخت‌افزار در حلقه، ادوات اپتیکی و مدارات مجتمع فعال و غیر فعال نوری می‌باشد.

محمود نیکوفرد تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد به ترتیب در سال‌های ۱۳۶۹ و ۱۳۷۳ از دانشگاه‌های صنعتی شریف و تربیت مدرس در رشته مخابرات گرایش میدان و در مقطع دکتری در سال ۱۳۸۷ در گرایش الکترونیک از دانشگاه صنعتی آینده‌ون هلند به پایان رسانده است. ایشان در دوره دکتری بر روی طراحی، ساخت و اندازه‌گیری ادوات فعال و غیر فعال مجتمع نوری بر روی زیر لایه InP کار نموده است که شامل مداراتی همچون لیزر، تقویت کننده نوری، گیرنده نوری، MZI، MMI و AWG بر روی یک تراشه به صورت یک‌پارچه می‌باشد. رساله دکتری ایشان بر روی گیرنده‌های یکپارچه نوری هشت طول موجی با ظرفیت بیش از ۱۶۰ Gb/sec با دو نوع تکنولوژی ساخت متفاوت بوده است. وی پس از اتمام تحصیلات کارشناسی ارشد، عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه کاشان می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: طراحی مدارات مجتمع نوری، آشکارسازهای نوری، سلول‌های خورشیدی و ساخت ادوات نوری فعال و غیر فعال می‌باشد.

- [4] L. Xu, Monolithic Integrated Reflective Transceiver in Indium Phosphide, Ph. D. Dissertation, the Netherlands, 2009.
- [5] D. Caprioli et al., "A 10 Gb/s traveling-wave MZ modulator for integration with a laser," in *Proc. 11th European Conf on Integrated Optics, ECIO'03*, vol. 1, pp. 145-148, 2000.
- [6] J. H. den Besten, R. G. Broeke, M. van Geemert, J. J. M. Binsma, F. Heinrichsdorff, T. van Dongen, E. A. J. M. Bente, X. J. M. Leijts, and M. K. Smit, "Compact digitally tunable seven-channel ring laser," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, no. 6, pp. 753-755, Jun. 2002.
- [7] L. Xu, M. et al., "High bandwidth waveguide photodetector based on an amplifier layer stack on an active-passive semi-insulating InP at 1.55 μm ," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 20, no. 23, pp. 1941-1943, Dec. 2008.
- [8] G. Abaeiani, V. Ahmadi, and K. Saghafi, "Design and analysis of resonant cavity enhanced waveguide photodetectors for microwave photonics applications," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 18, no. 15, pp. 1597-1599, Aug. 2006.
- [9] M. Nikoufard, *Integrated Wavelength Division Multiplexing Receivers*, Ph. D. Dissertation, the Netherlands, 2008.
- [10] D. G. Rabus, "Integrated ring resonators: the compendium," Springer, Berlin, 2007.
- [11] <http://www.comsol.com>
- [12] K. R. Hiremath, M. Hammer, R. Stoffer, L. Prkna, and J. Ctyroky, "Analytic approach to dielectric optical bent slab waveguides," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 37, no. 1, pp. 37-61, Jan. 2004.
- [13] P. Maat, *InP-Based Integrated MZI Switches for Optical Communication*, Ph. D. Dissertation, Delft University of Technology, the Netherland, 2001.
- [14] A. Yick, *Metal-Free Electro-Optic Polymer Modulators and Sensors*, Ph.D. Dissertation, University of Southern California, USA, 2007.
- [15] <http://www.optiwave.com>
- [16] <http://www.silvaco.com>

Archive of SID