

طراحی موجبر نواری سیلیکونی و مشخصه‌های اپتیکی آن

فاطمه محمودی راد، ابوالفضل صفایی بزرگ آبادی*، حمیدرضا بختیاری زاده

گروه نانوفناوری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

پست الکترونیکی: a.safaei@kgut.ac.ir

چکیده

در این مقاله یک موجبر پله‌ای با استفاده از نرم افزار کامسول طراحی شده و مشخصات اپتیکی آن شبیه‌سازی گردیده است. نتایج نشان می‌دهند که این موجبر دارای دو مد انتشاری شامل یک مد عرضی الکتریکی (TE) و یک مد عرضی مغناطیسی (TM) می‌باشد. برای این دو مد، پروفایل میدان الکتریکی در چند طول موج شاخص رسم شده است. همچنین ضریب شکست موثر، پاشندگی موجبر و سطح مقطع موثر مدی بررسی می‌شود. برای این ساختار و در بازه طول موجی مورد بررسی ضریب شکست موثر مد TM همواره از TE بزرگتر بوده و هر دو مد در بازه طول موج مورد بررسی دارای یک طول موج با پاشندگی صفر هستند که برای مد TM در نزدیکی ۲/۵ میکرومتر و برای مد TE در ۲/۱۲ میکرومتر واقع شده است. از نتایج شبیه‌سازی مشاهده می‌شود که سطح مقطع موثر هر دو مد از مرتبه یک دهم میکرومتر مربع می‌باشد و با طول موج رشد چندانی ندارد مضافاً اینکه سطح مقطع موثر برای مد TE ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. در انتها با بهره‌گیری از معادلات حاکم بر فرآیند تولید طیف ابرپیوستار در موجبرهای سیلیکونی، به مطالعه طیف ابرپیوستار در موجبر پیشنهادی پرداخته می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که با توجه به ویژگی‌های پالس تزریق شده، پهن‌شدگی طیفی یک اکتاوی در خروجی موجبر ایجاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: موجبر سیلیکونی نواری، پاشندگی، پروفایل میدان الکتریکی، ضریب شکست موثر، سطح مقطع موثر مدی

فوتونیک سیلیکونی در سال‌های اخیر پیشرفت بسیاری کرده و به دلیل مزایای خاصی مانند پنجره‌ی شفاف وسیع، کنتراست

۱. مقدمه

ضریب شکست بسیار بالا، سازگاری با فناوری سی‌ماس (نیم‌رسانای اکسید-فلز مکمل)^۱، پتانسیل تولید مقرون به صرفه و تزویج شدن با انبوه اجزای نوری یکپارچه، توجه زیادی رو به خود جلب کرده است [۱]. در حال حاضر تلاش‌های زیادی برای بهبود عملکرد این دستگاه‌ها برای برآورده شدن نیازهای کاربردی انجام می‌شود [۲]. به طور کلی، هدف اصلی آن ساخت دستگاه‌های فوتونیک بسیار کوچک با تلفات اضافی بسیار کم، نسبت خاموشی بسیار بالا، تداخل سیگنال بسیار کم، پهنای باند وسیع و تحمل بالا در برابر خطاهای ساخت است. این ویژگی‌ها برای توسعه‌ی مدارهای مجتمع فوتونیک^۲ حائز اهمیت می‌باشند [۲].

در ابتدا، فناوری فوتونیک سیلیکونی بر پایه طراحی موجبرهای تک‌مد شکل گرفت و هدف اصلی آن کنترل مد پایه نور بود. کنترل قطبش نور در موجبرهای سیلیکونی روی تراشه اهمیت زیادی پیدا کرده‌اند زیرا مدارهای فوتونیک شفاف در برابر قطبش، در ارتباطات نوری همدوس و ارتباطات کوانتومی کاربرد دارند [۳]. به همین دلیل، دستگاه‌های کنترل قطبش مانند قطبش‌سنج‌ها، تقسیم‌کننده‌های پرتوی قطبشی و چرخاننده‌های قطبشی با عملکرد بالا، بر پایه موجبرهای سیلیکونی با دوشکستی زیاد^۳ ساخته شدند [۳]. برای جلوگیری از پاشندگی بین مدی شرایط مورد نیاز برای انتشار تک مد در موجبرهای دندانه‌ای سیلیکونی دارای اهمیت بسزایی است ابتدا پترمن^۴ نشان داد که موجبرهایی با سطح مقطع بزرگ (نسبت به طول موج) می‌توانند رفتار تک‌مدی داشته باشند [۴]. این مفهوم توسط سورف^۵ و همکارانش برای موجبرهای دندانه‌ای سیلیکونی با دیواره‌های عمودی استفاده شد و معادلاتی ارائه کردند که شرایط

تک‌مد بودن را مشخص می‌کرد [۴]. مطالعات بعدی توسط پوگوسیان^۶ و همکاران با استفاده از روش ضریب شکست مؤثر تأیید کرد که معادلات قبلی صحیح هستند و با داده‌های تجربی همخوانی بهتری دارند [۵]. با این حال، نتایج تحلیل‌های عددی جزئیات مدهای موجبرهای دندانه‌ای بر پایه سیلیکون-روی-عایق با سطح مقطع بزرگ نشان می‌دهند که پیروی از معیارهای طراحی متداول، به تنهایی تضمینی برای تک‌مد بودن موجبرها نیست [۶].

اما در سال‌های اخیر، استفاده از فوتونیک سیلیکونی چندمدی اهمیت زیادی پیدا کرده است. این فناوری با بهره‌گیری از مدهای مرتبه بالاتر، امکان انتقال چند کانال داده روی یک طول موج را فراهم می‌کند [۷]. برای این کار، نیاز به کنترل دقیق مدهای مرتبه بالا وجود دارد و پیشرفت‌هایی مثل ساخت جفت‌کننده‌های انتخاب مد، تقسیم‌کننده‌های توان چندمدی، اتصالات مخصوص موجبر چندمدی در این زمینه انجام شده است [۷]. اخیراً نیز یک کنترل‌کننده پاشندگی قابل تنظیم دیجیتال برای مدیریت پاشندگی معرفی شده که پتانسیل اصلاح فاز، تولید شکل موج، شکل‌دهی پرتو و شکل‌دهی پالس را در بسیاری از سیستم‌های فوتونیک نشان می‌دهد [۸].

⁴ Petermann

⁵ Soref

⁶ Pogossian

¹ Complementary Metal-Oxide Semiconductor

² Photonic Integrated Circuit

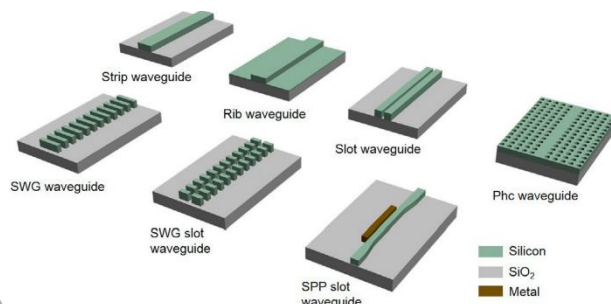
³ High Birefringent

یک موجبر سیلیکونی دو مدی و تعیین مشخصه‌های اپتیکی آن می‌باشد. ساختار مفروض در این مقاله، یک موجبر نواری سیلیکونی بوده که با استفاده از نرم افزار کامسول شبیه‌سازی شده و ویژگی‌های اپتیکی آن از قبیل پروفایل میدان الکتریکی، ضریب شکست موثر، پاشندگی موجبر و سطح مقطع موثر مدی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

سپس به دلیل کاربردهای بسیار متنوعی که منابع نور ابرپیوستار دارند و در سالهای اخیر به سمت منابع نور روی تراشه سوق پیدا کرده [۱۴-۱۶]، با استفاده از ویژگی‌های اپتیکی این موجبر پیشنهادی، به بررسی تولید طیف ابرپیوستار در آن پرداخته می‌شود. منبع نور ابر پیوستار کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های مخابرات، طیف نگاری، فشردگی پالس، طراحی منابع لیزری قابل تنظیم فوق سریع از نوع فمتوثانیه و یا علم اندازه‌گیری نوری دارد [۱۰ و ۱۷]. این منابع نیز در پزشکی برای تشخیص سرطان، بهبود زخم‌ها، سوزاندن بافت‌ها، تحریک عصبی برای درمان و بهبود برخی از بیماری‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۷].

۲. فیزیک مسئله، روش و پارامترهای شبیه‌سازی

بطور کلی از معادله موج که از معادلات ماکسول حاصل می‌شود، برای توصیف برهمکنش نور با ماده استفاده می‌شود [۱۷ و ۱۸]. معادله موج با روش جداسازی متغیرها، به دو معادله می‌انجامد که یکی مربوط به سطح مقطع میدان الکتریکی بوده و دیگری قسمت انتشاری موج را توصیف می‌کند.



شکل ۱: طرحواره‌ای از انواع مختلف موجبرهای سیلیکونی [۹]

تاکنون مطالعات متعددی بر روی موجبرهای سیلیکونی چند مدی از نوع نواری^۱، دندانهای^۲، مشبک زیرطول موجی^۳، کریستال فوتونی^۴ و... انجام گرفته و هنوز هم ادامه دارد [۹ و ۱۰]. در شکل ۱ طرحواره چند نمونه از موجبرهای سیلیکونی آمده است.

لازم به ذکر است که موجبرهای سیلیکونی به صورت گسترده در ناحیه تراهرتز هم بکار گرفته می‌شوند [۱۱-۱۳]. به عنوان نمونه گروهی از دانشمندان، با استفاده از پالس‌های لیزری در ناحیه مادون قرمز میانی و تزریق آن به موجبرهای سیلیکونی توانستند امواج تراهرتزی را از طریق پدیده مخلوط چهار موج^۵ تولید کنند [۱۱]. در سال ۲۰۲۲، موجبر سیلیکونی به منظور تبدیل طول موجی قابل تنظیم در ناحیه تراهرتز مبتنی بر پدیده ناپایداری مدولاسیون^۶ طراحی گردید [۱۲]. در سال ۲۰۲۵ موجبر سیلیکونی دندانهای ویژه‌ای طراحی شد که می‌توانست طیف ابرپیوستاری^۷ را ایجاد کند به گونه‌ای که گستره وسیع طیفی از محدوده مادون قرمز تا تراهرتز را دربرمی‌گرفت [۱۳].

بنابراین با توجه به اهمیت موضوع، هدف اولیه ما طراحی

⁵ Four-Wave Mixing

⁶ Modulation Instability

⁷ Supercontinuum Spectrum

¹ Strip Waveguide

² Rib Waveguide

³ Subwavelength Grating (SWG) Waveguide

⁴ Photonic Crystal (Phc) Waveguide

$$\frac{\partial^2 F(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F(x,y)}{\partial y^2} + [k_0^2 n^2(\omega) - \beta^2(\omega)] F(x,y) = 0 \quad (1)$$

به صورت عددی یا با استفاده از نرم افزارهای موجود مانند کامسول یا لومریکال^۱ حل شود. در رابطه (۱) $F(x,y)$ ، k_0 ، $n(\omega)$ و $\beta(\omega)$ به ترتیب قسمت عرضی میدان الکتریکی، عدد موج در خلاء، ضریب شکست ماده و ثابت انتشار می باشند. ابتدا با استفاده از نرم افزار کامسول در قسمت دو بعدی یک موجبر نواری با پهنای ۵۵۰ میکرومتر و ارتفاع ۴۰۰ میکرومتر طراحی کرده و سپس در قسمت مواد، با استفاده از کتابخانه نرم-افزار کامسول جنس مواد موجبر مشخص می شود. فضای بالای موجبر هوا فرض شده و پایین موجبر شیشه از جنس SiO_2 نظر گرفته شده است. همچنین جنس هسته، سیلیکون خالص انتخاب شده است. طرحواره موجبر پیشنهادی در شکل ۲ نمایش داده شده است.

همچنین ضریب شکست هوا و شیشه به ترتیب ۱ و ۱/۴۴۷ در نظر گرفته شده و ضریب شکست سیلیکون خالص از رابطه سل میر^۲ [۱۹]:

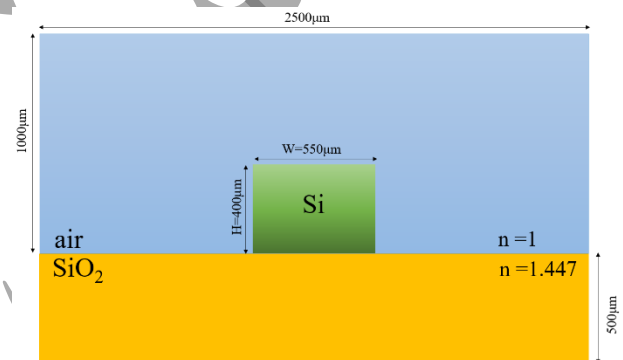
$$n^2(\lambda) = 1 + \frac{B_1 \lambda^2}{\lambda^2 - C_1^2} + \frac{B_2 \lambda^2}{\lambda^2 - C_2^2} + \frac{B_3 \lambda^2}{\lambda^2 - C_3^2} \quad (2)$$

در نرم افزار لحاظ شده است (مقادیر ثابتهای رابطه بالا در جدول ۱ ذکر شده اند). البته می توان برای زیر لایه (شیشه) هم، رابطه سل میر آن را برای ضریب شکست در نظر گرفت.

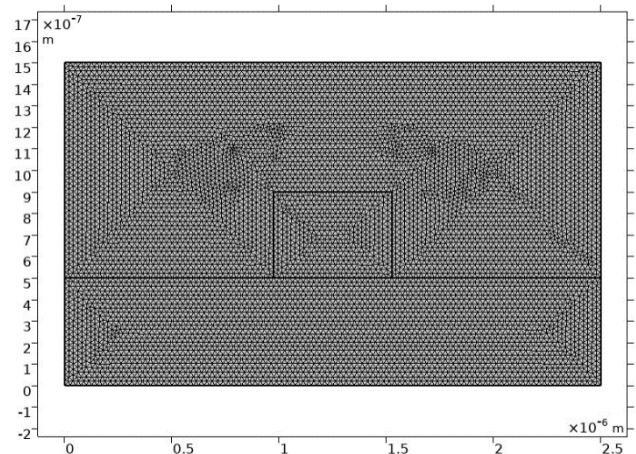
بعد از این مرحله، ضروری است تا مرزهای موجبر همراه با ویژگی های آنها تعیین گردد. شرایط مرزی میدان الکتریکی در نواحی مختلف، مشخص گردیده و برای هر ناحیه مش^۳ مرتبط با فیزیک مسئله انتخاب می شود. موجبر مش زده شده در شکل ۳ نشان داده شده است.

جدول ۱: مقادیر ثابتهای عددی رابطه ۱

B_1	10.6684293
B_2	0.0030434748
B_3	1.54133408
C_1	$0.301516485 \mu\text{m}$
C_2	$1.13475115 \mu\text{m}$
C_3	$1104 \mu\text{m}$



شکل ۲. طرحواره موجبر سیلیکونی پیشنهادی



شکل ۳. مش نواحی مختلف موجبر پیشنهادی

برای بدست آوردن اکثر ویژگی های اپتیکی موجبرها، باید قسمت عرضی معادله موج [۱۷]:

³ Mesh

¹ Lumerical

² Sellmeier relation

مشخصه‌های اپتیکی موجبرها می‌باشد با استفاده از رابطه [۱۷]:

$$A_{eff} = \frac{\left(\iint |F(x, y)|^2 dx dy \right)^2}{\iint |F(x, y)|^4 dx dy} \quad (4)$$

حاصل می‌شود. همانگونه که مشخص است سطح مقطع موثر مدی به پارامترهای موجبر مانند ابعاد آن و اختلاف ضریب شکست هسته با زیرلایه و پوشش بیرونی (در اینجا هوا) بستگی دارد. سطح مقطع موثر مدی در تعیین پارامتر غیرخطی موجبر،

$$\gamma(\lambda_0) = \frac{2\pi n_2}{\lambda_0 A_{eff}} \quad (5)$$

اهمیت بالایی دارد [۱۷]. در رابطه ۵، n_2 ضریب شکست غیرخطی هسته موجبر بوده و λ_0 طول موج مرکزی پالس ورودی به موجبر می‌باشد (در عمل ضریب شکست غیرخطی تابع طول موج می‌باشد اما در برخی از کاربردها در یک بازه طول موجی مشخص آن را به صورت یک عدد در نظر می‌گیرند). بنابراین هرچه سطح مقطع موثر مدی مقدار کوچکتری داشته باشد، پارامتر غیرخطی موجبر افزایش پیدا می‌کند. در اینجا مقدار عددی ضریب شکست غیرخطی برای سیلیکون $2/5 \times 10^{-18} \text{ m}^2 \text{W}^{-1}$ در نظر گرفته شده است [۲۵]. البته مقادیر اندازه‌گیری شده برای این پارامتر بسیار متفاوت گزارش شده است [۲۵]. این تفاوتها معمولاً ناشی از چیدمان آزمایش و همچنین نوع ساختار سیلیکون تحت بررسی می‌باشد.

معمولاً با افزایش طول موج، سطح مقطع موثر مدی افزایش پیدا می‌کند. محققان این حوزه به دنبال طراحی موجبرهایی هستند که با افزایش طول موج، سطح مقطع موثر مدی افزایش چشمگیری نداشته باشد یا حتی کاهش یابد. یکی از اهداف ما در این مقاله نیز دستیابی به مدهایی هست که سطح مقطع موثر آنها با افزایش طول موج، افزایش پیدا نکند.

پاشندگی یکی از ویژگی‌های اساسی موجبرهاست که ظرفیت انتقال اطلاعات را تحت تاثیر قرار می‌دهد. وجود پاشندگی باعث کشیده شدن پالس نوری و در نتیجه تداخل بین مدها می‌شود [۲۰]. اما پاشندگی همیشه به عنوان یک عامل منفی در نظر گرفته نمی‌شود. به عنوان مثال در پدیده تولید ابرپیوستار، پاشندگی سهم مهم و بسزایی دارد [۱۷ و ۲۱]. بطور کلی پاشندگی شامل پاشندگی ماده و پاشندگی ساختار موجبر می‌شود و از رابطه:

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 \text{Re}(n_{eff})}{\partial \lambda^2} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (3)$$

بدست می‌آید [۱۷ و ۱۸]، که در آن n_{eff} و C به ترتیب ضریب شکست موثر مد و سرعت نور در خلاء می‌باشند. کمیت β_2 ضریب پاشندگی مرتبه دوم بوده و بیانگر پاشندگی سرعت گروه^۱ می‌باشد. همانگونه که از رابطه ۳ مشخص است، پاشندگی موجبر (D) و پارامتر پاشندگی سرعت گروه (β_2) از لحاظ مقدار مثبت یا منفی بودن عکس یکدیگر هستند.

محققان با تغییر ساختار، عموماً سعی در مهندسی پاشندگی موجبرها جهت استفاده از آنها در کاربردهای مختلف دارند [۲۲ و ۲۳]. اخیراً این موضوع مطرح شده است که با تزریق حاملهای اضافی به سیلیکون، می‌توان پاشندگی موجبرها را مهندسی کرد، زیرا تزریق حاملهای اضافی با غلظت آرایش بالا ضریب شکست سیلیکون را تغییر می‌دهد [۲۴].

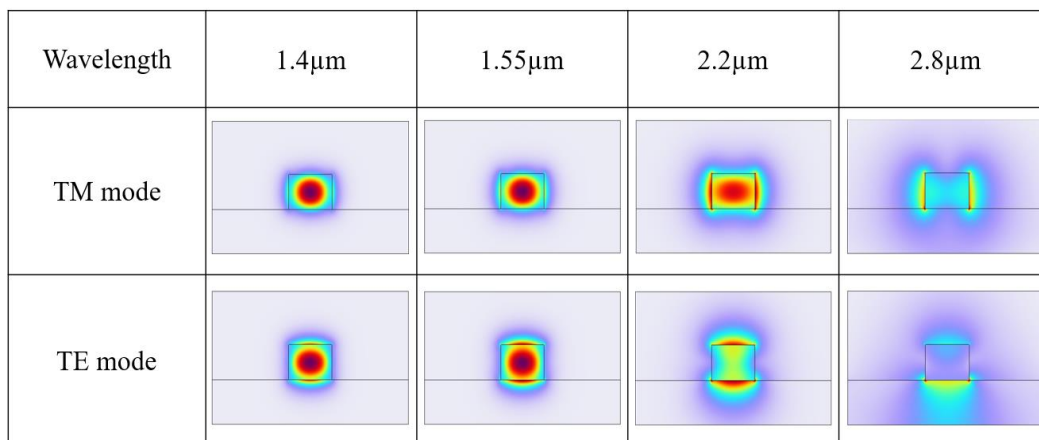
ضریب شکست موثر، n_{eff} ، از نرم‌افزار کامسول محاسبه شده و سپس برای بدست آوردن پاشندگی، با توجه به رابطه ۳ از ضریب شکست موثر به صورت عددی مشتق‌گیری می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که ضریب شکست موثر می‌تواند مقداری مختلط باشد. البته قسمت حقیقی ضریب شکست موثر در هنگام محاسبه پاشندگی، سهم داشته و قسمت موهومی آن در ضریب افت^۲/بهره^۳ موجبر نقش ایفا می‌کند.

همچنین سطح مقطع موثر مدی که یکی دیگر از

³ Gain

¹ Group Velocity Dispersion

² Loss



شکل ۴. پروفایل میدان الکتریکی در چند طول موج خاص برای هر دو مد انتشاری

۳. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی کامسول

موجبر مفروض برای بازه طول موجی ۱/۴ میکرومتر تا ۲/۸ میکرومتر مورد بررسی قرار گرفته است. این محدوده طول موجی شامل بخشی از نواحی مادون قرمز نزدیک و ابتدای مادون قرمز میانی می‌شود که بسیار پر کاربرد بوده که از جمله آنها می‌توان به طراحی موجبرها، حسگرها، مدولاتورها و کلیدهای روی تراشه اشاره کرد [۲۵].

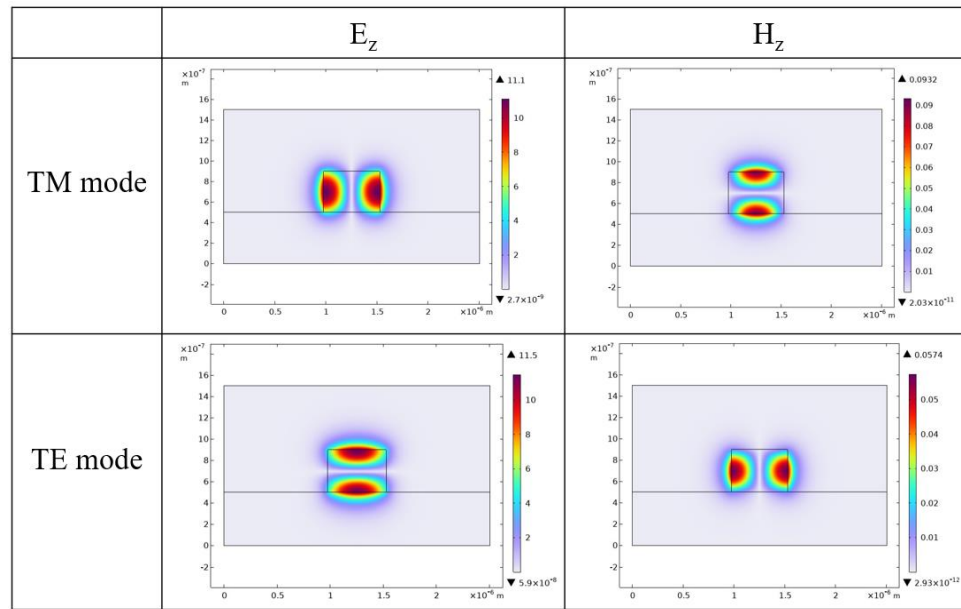
نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که ساختار پیشنهادی در بازه طول موجی مذکور دارای دو مد انتشاری شامل یک مد عرضی الکتریکی (TE) و یک مد عرضی مغناطیسی (TM) می‌باشد. از طول موج ۲/۸ میکرومتر به بعد ضریب شکست موثر یکی از مدها کمتر از ضریب شکست زیر لایه (SiO_2) می‌شود و بطور فیزیکی از این جا به بعد این مد غیر انتشاری خواهد بود [۱۰ و ۱۷]. در شکل ۴، پروفایل میدان الکتریکی این دو مد در صفحه عرضی برای چند طول موج نشان داده شده است.

میکرومتر و ۱/۵۵ میکرومتر، میدان الکتریکی در هسته موجبر به خوبی متمرکز است و هر چه طول موج بزرگتر می‌شود پروفایل میدان الکتریکی در مرزهای هسته قرار گرفته و یک نوع خاص از میدان محو شونده^۱ را ایجاد می‌کند [۱۷ و ۲۶]. این اتفاق برای مد TE در طول موج کوتاه‌تری نسبت به مد TM رخ می‌دهد. البته میدان محو شونده، حالت انتشاری مخصوص به خود را دارد زیرا ضریب شکست موثر مدها بزرگتر از ضریب شکست شیشه می‌باشد [۱۷، ۲۶ و ۲۷]. اما ذکر این نکته ضروری است که این موج مانند یک موج الکترومغناطیسی معمولی منتشر نمی‌شود [۲۷]. امواج محو شونده در میکروسکوپی میدان-نزدیک^۲، حسگرهای زیستی^۳، لایه نشانی نانومواد و غیره کاربرد دارد [۲۷ و ۲۸]. با توجه به شکل ۴ می‌توان نتیجه گرفت که اگر این موجبر طراحی شده در طول موج بالاتر از ۲/۲ میکرومتر بکار گرفته شود، برای کاربردهای ذکر شده قابل استفاده می‌باشد.

³ Biosensors

¹ Evanescent Field

² Near-Field Microscopy



شکل ۵. مولفه میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی در راستای انتشار برای هر دو مد در طول موج $1/4$ میکرومتر

برای موجبر پیشنهادی، مقدار ضریب شکست موثر مدها در بازه مورد بررسی تماماً حقیقی بوده که این یک مزیت به حساب می‌آید زیرا وجود ضریب شکست موثر با قسمت موهومی مثبت باعث افت اضافی نور منتشره در موجبر می‌شود. همچنین ضریب شکست موثر با قسمت موهومی منفی یک نوع بهره را نشان می‌دهد که در این نوع مسائل حلی غیرفیزیکی است هر چند معمولاً از قسمت موهومی ضریب شکست موثر مدها به دلیل کوتاه بودن طول موجبرهای روی تراشه صرفنظر می‌شود [۱۷].

با توجه به شکل ۶، ضریب شکست موثر دو مد در موجبر پیشنهادی تقریباً نزدیک به یکدیگر بوده که باعث تزویج بین مدی و متعاقباً پاشندگی بین مدی می‌گردد. تزویج و پاشندگی بین مدی برای برخی کاربردها مزیت محسوب می‌شود و برای برخی دیگر به عنوان عامل منفی در نظر گرفته می‌شود [۱۷].

در شکل ۵ مولفه میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی در راستای انتشار برای هر دو مد در طول موج $1/4$ میکرومتر نشان داده شده است. TE یا TM بودن مد از روی مقایسه مولفه‌های میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی در راستای انتشار تعیین می‌گردد [۱۷]. در اصل این مدها شبه TE یا TM هستند زیرا در مد TE مولفه میدان مغناطیسی در راستای انتشار و در مد TE مولفه میدان الکتریکی در راستای انتشار دقیقاً صفر نیست و به همین دلیل به این مدها شبه TE یا TM گفته می‌شود.

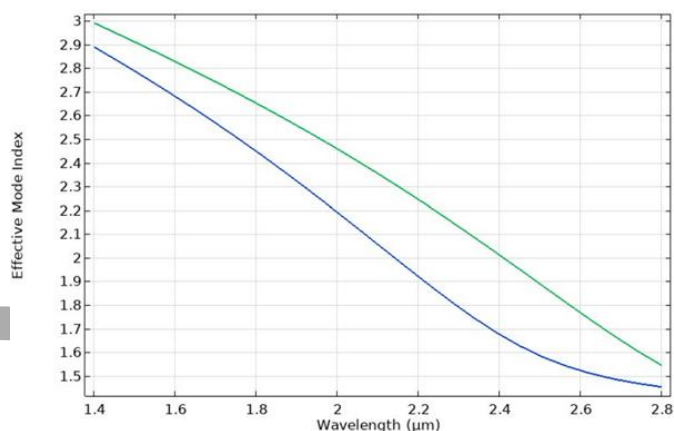
یکی دیگر از ویژگی‌های اپتیکی بسیار مهم در موجبرها، ضریب شکست موثر مدی می‌باشد که از روی آن پاشندگی موجبر (رابطه ۳) محاسبه می‌گردد. شکل ۶ ضریب شکست موثر مدها را نشان داده که می‌توان نتیجه گرفت برای این ساختار و در بازه طول موجی مورد بررسی ضریب شکست موثر مد TM همواره از مد TE بزرگتر است.

مدهای مرتبه بالاتر، امکان انتقال چند کانال داده روی یک طول موج را فراهم می‌کند [۱۸]، که در کاربردهای مخابراتی و انتقال داده بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

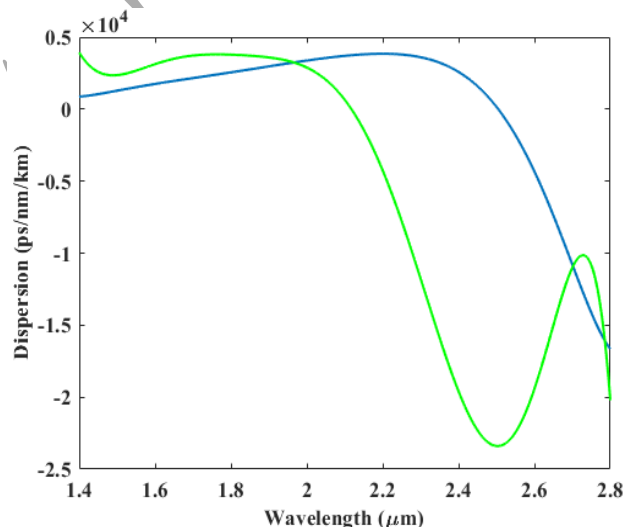
با توجه به نتایج به دست آمده از نرم افزار کامسول، درصد محصور شدگی^۱ مد TE و TM در موجبر طراحی شده در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر به ترتیب ۸۳٪ و ۷۶٪ حاصل شده است (این طول موج به دلیل کاربردهای متنوعی که دارد انتخاب شده است). همچنین مقدار افت در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر برای مد TE و TM به ترتیب ۳/۵ dB/cm و ۲/۵ dB/cm بدست آمده است.

با استفاده از نتایج بدست آمده در شکل ۶ و مشتق‌گیری عددی بر اساس رابطه ۳ در نرم افزار متلب، پاشندگی مدها برای موجبر مفروض بدست می‌آید. پاشندگی این دو مد در شکل ۷ رسم شده است. همانطور که از شکل ۷ مشخص است هر دو مد در بازه طول موجی مورد بررسی دارای یک طول موج با پاشندگی صفر هستند که برای مد TE در ۲/۱۲ میکرومتر حاصل شده است. نواحی قبل از این طول موجها، نواحی با پاشندگی غیرعادی^۲ (پاشندگی مثبت) و بعد از این طول موجها نواحی با پاشندگی عادی^۳ (پاشندگی منفی) هستند [۱۷].

نواحی پاشندگی عادی و غیرعادی بطور قابل توجهی بر روی مکانسیم انتشار نور در موجبر اثر می‌گذارد [۱۰، ۱۷ و ۲۸].



شکل ۶. ضریب شکست موثر مدی برای مد TM (رنگ سبز) و مد TE (رنگ آبی).



شکل ۷. پاشندگی مد TM (رنگ سبز) و مد TE (رنگ آبی).

برای جلوگیری از پاشندگی بین مدی ابتدا تلاش محققان بر فراهم کردن شرایط مورد نیاز برای انتشار تک مد نور در موجبرهای دندانه‌ای و نواری سیلیکونی متمرکز بود اما با توجه به پیشرفتهای اخیر، موجبرهای فوتونیک سیلیکونی چندمدی اهمیت زیادی پیدا کرده‌اند. موجبرهای فوتونیک سیلیکونی چندمدی با بهره‌گیری از

³ Normal Dispersion Region

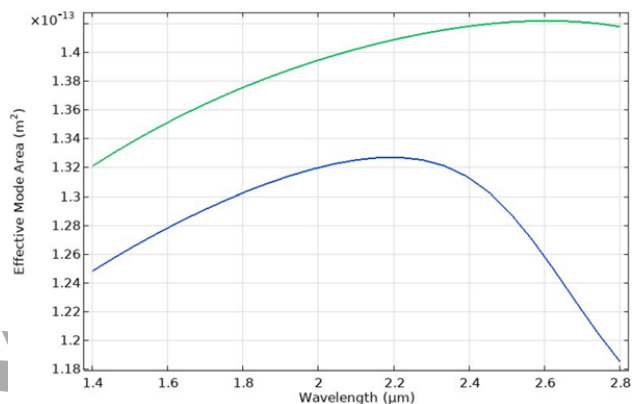
¹ Confinement Percentage

² Anomalous Dispersion Region

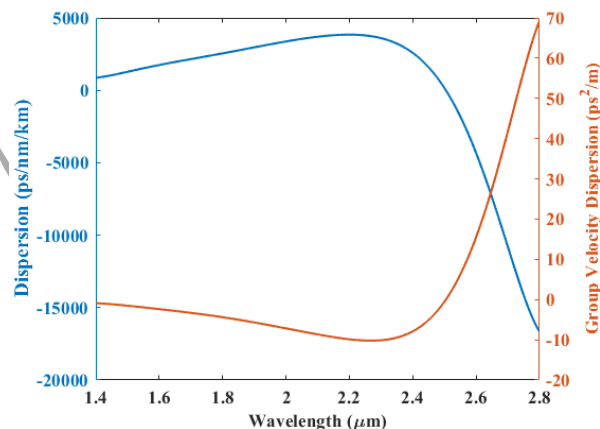
همچنین با تعریف رابطه ۴ در نرم افزار کامسول، سطح مقطع موثر مدی محاسبه می شود. بطور کلی سطح مقطع موثر مدی در تعیین پارامتر غیرخطی موجبرها نقش اساسی دارد. این پارامتر در شکل - گیری پدیده های غیرخطی به ویژه پدیده های سهیم در فرآیند انتشار پالس نوری در موجبرها موثر می باشد. در شکل ۸ سطح مقطع موثر برای مدهای موجبر مورد نظر رسم شده است. از شکل ۸ مشاهده می شود که سطح مقطع موثر برای مد TE ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می یابد. از مقدار نتایج بدست آمده برای سطح مقطع موثر مدی مشخص می شود موجبر مفروض در مقایسه با اکثر تارهای نوری کریستال فوتونی از سطح مقطع موثر مدی کوچکتری برخوردار است که این نتیجه منجر به ایجاد پارامتر غیرخطی بزرگتری می شود. بطور کلی هرچه این پارامتر مقدار بزرگتری باشد می توان برای ایجاد یک پدیده غیرخطی از طول کوتاه تری از موجبر استفاده کرد. بطور فیزیکی استفاده از موجبر با طول کوتاه تر یعنی تلفات سیگنال کمتر. البته طول مورد استفاده از موجبر باید بر اساس کاربرد مورد نظر بهینه سازی شود.

۴. شبیه سازی طیف ابرپوستار

در اینجا با بهره گیری از معادلات حاکم بر فرآیند تولید طیف ابرپوستار در موجبرهای سیلیکونی [۲۵ و ۲۹]، به مطالعه طیف ابرپوستار در موجبر پیشنهادی پرداخته می شود. به این منظور فرض می شود پالسی به شکل سکانت هایپربولیک و با توان قله ۲۵۰ وات و پهنای زمانی ۵۰ فمتو ثانیه با طول موج مرکزی ۱/۵۵ میکرومتر به موجبر پیشنهادی با طول ۵ میلی متر وارد شده، به گونه ای که بتواند فقط مد TM را تحریک کند. با توجه به مساحت موثر مد مورد نظر، مقدار عددی پارامتر غیرخطی موجبر $W^{-1}m^{-1}$ ۷۰ می باشد. در شکل ۹ نیز منحنی پاشندگی سرعت گروه متناظر با منحنی پاشندگی مد تحریک شده مفروض (مد TM) نمایش داده شده است که با استفاده از آن، ضرایب پاشندگی مراتب بالاتر به صورت مشتق گیری عددی حاصل شدند.



شکل ۸. سطح مقطع موثر برای مد TM (رنگ سبز) و مد TE (رنگ آبی)



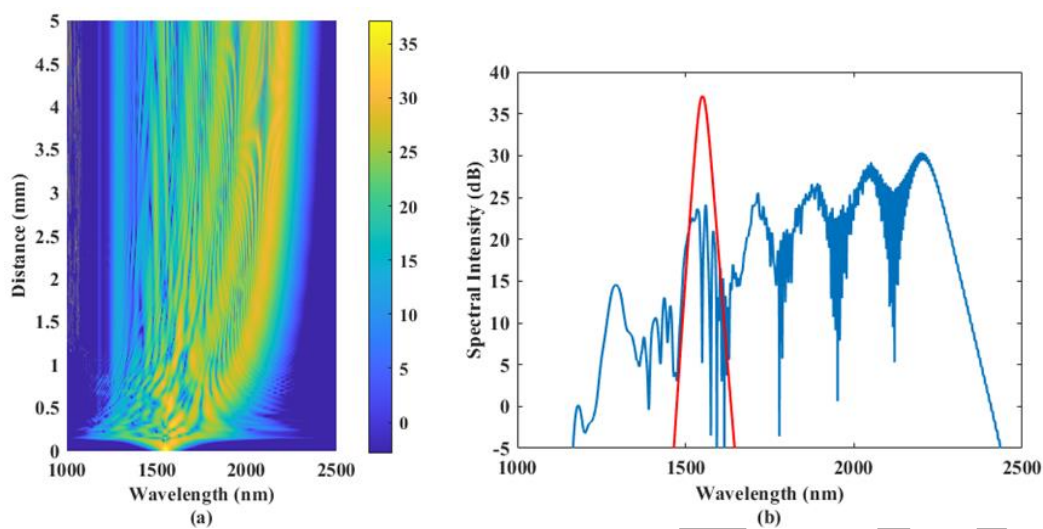
شکل ۹. پاشندگی مد TM (رنگ آبی) و پاشندگی سرعت گروه مربوط به این مد (رنگ نارنجی).

به عنوان مثال در هنگام انتشار سالیتون^۱ نوری در موجبرها، اگر سالیتون در ناحیه با پاشندگی غیرعادی منتشر شود، پدیده جابجایی خود-فرکانسی سالیتون^۲ مکانسیم غالب می باشد و اگر سالیتون در ناحیه با پاشندگی عادی منتشر شود، پدیده مدوله سازی خود-فازی^۳ سهم بیشتری خواهد داشت [۲۸]. طول موج های پاشندگی صفر و تعداد آنها نیز در نحوه انتشار پالس نوری در موجبرها بسیار موثر می باشد. بطور کلی پاشندگی و پدیده های غیرخطی در برهمکنش نور با ماده، فیزیک حاکم بر منابع نوری ابرپوستار را توصیف می کنند.

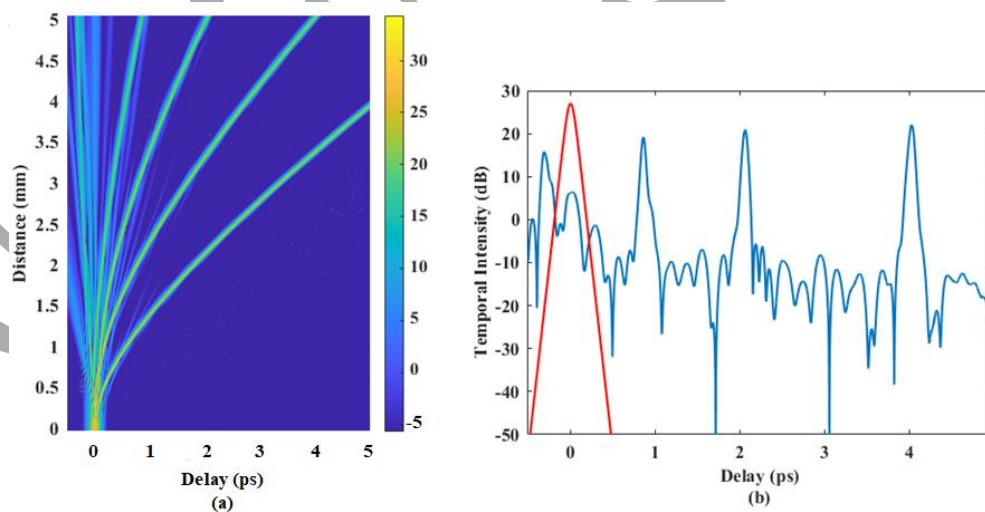
³ Self-phase Modulation

¹ Soliton

² Soliton Self-frequency Shift



شکل ۱۰: (آ) تحول طول موجی طیف ابرپیوستار در طول ۵ میلی متر از موجبر طراحی شده. (ب) رنگ آبی: پروفایل طول موجی طیف ابرپیوستار ایجاد شده در انتهای موجبر و رنگ قرمز: نور ورودی به موجبر با طول موج مرکزی ۱۵۵۰ نانومتر



شکل ۱۱: (آ) تحول زمانی نور ابرپیوستار در طول ۵ میلی متر از موجبر طراحی شده. (ب) رنگ آبی: پروفایل زمانی نور ابرپیوستار ایجاد شده در انتهای موجبر و رنگ قرمز: نور ورودی به موجبر در حوزه زمان

جدول ۲. طیف ابرپیوستار تولید شده با استفاده از موجبرهای مبتنی بر

سیلیکون

Reference	Peak power	Pulse width	SC bandwidth (nm)	Flatness
[۳۰]	۵۰ W	fs ۱۲۰	۲۴۶۴- nm ۱۲۰۰	-۳۳ dB
[۳۱]	۳۶۰ W	۵۰ fs	۲۴۰۰- nm ۱۱۲۴	-۲۰ dB
[۲۹]	۲۵ W	۵۰ fs	۱۸۰۰- nm ۱۲۰۰	-۴۰ dB
[۳۲]	kW ۳/۸	fs ۱۳۰	۱۶۰۰- nm ۴۰۰	-۳۰ dB
[۳۳]	kW ۵/۷	۷۴ fs	۲۵۰۰- nm ۴۰۰	-۴۵ dB
[۳۴]	kW ۵/۷۲	fs ۲۱۰	۵۷۰۰- nm ۲۸۰۰	-۳۰ dB
[۳۵]	kW ۶/۵۶	۵۰ fs	۲۰۲۰- nm ۱۰۱۰	-۲۰ dB
[۳۶]	۲۰ W	fs ۱۵۰	۱۷۰۰- nm ۱۱۰۰	-۵۰ dB
این پژوهش	۲۵۰ W	۵۰ fs	۲۴۵۰- nm ۱۲۰۰	-۳۵ dB

می‌افتد. پدیده شکافت سالیتمی در اثر برهمکنش آثار پاشدگی مراتب بالا با اثر خود-سراشیمی و اثر رامن القایی رخ می‌دهد. بخشی از پهن‌شدگی طیفی ناشی از این پدیده می‌باشد.

در شکل ۱۱ تحول زمانی نور ابرپیوستار در راستای انتشار، شبیه‌سازی شده و در شکل ۱۱ ب خروجی زمانی نور ابرپیوستار نمایش داده شده است. از شکل ۱۱ مشخص می‌شود که پدیده شکافت سالیتمی رخ داده است به گونه‌ای که سالیتم و ورودی به ۴ سالیتم مرتبه پائین‌تر شکافته شده است. پالس‌های سالیتمی شکافته شده نسبت به جبهه اصلی موج دارای تاخیر زمانی (عقب‌تر) هستند. این تاخیر به دلیل پاسخ رامن محیط می‌باشد. با توجه به شکل ۱۱، سالیتم چهارم در زمان تاخیری طولانی‌تری به خروجی موجبر می‌رسد و به همین دلیل در بازه زمانی رسم شده برای خروجی (شکل ۱۱ ب) این سالیتم پدیدار نشده است. در جدول شماره ۲ مقایسه‌ای کمی بین نتایج مربوط به طیف ابرپیوستار بدست آمده در پژوهش با تعدادی از گزارشات موجود در زمینه تولید طیف ابرپیوستار با استفاده از موجبرهای مبتنی بر سیلیکون صورت گرفته است. با توجه به نتایج ذکر شده در جدول ۲ می‌توان دریافت که نتایج شبیه‌سازی ما با سایر گزارشات همخوانی دارد. البته نتیجه تجربی که دقیقاً ساختار موجبر آن مطابق موجبر پیشنهادی ما باشد پیدا نشد.

البته ذکر این نکته ضروری است که طول موجبرهای مورد استفاده در گزارشات جدول ۲ کمی باهم متفاوت هستند یا مثلاً مقدار ضریب شکست غیرخطی سیلیکون در برخی از موارد متفاوت در نظر گرفته شده است که هر کدام از اینها در میزان پهن‌شدگی نهایی تاثیر دارند.

در شکل ۱۰ تحول طول موجی طیف ابرپیوستار در طول انتشار، شبیه‌سازی شده و در شکل ۱۰ ب خروجی طیف ابرپیوستار از موجبر پیشنهادی نمایش داده شده است. همانگونه که مشخص است پهن‌شدگی طیفی یک اکتاوی ایجاد شده که گستره ۱۲۰۰ تا ۲۴۵۰ نانومتری را شامل می‌شود. در اینجا پدیده شکافت سالیتمی در طول ابتدایی موجبر اتفاق

۵. نتیجه گیری

در این مقاله، با استفاده از نرم افزار کامسول (هاژول اپتیک موجی) در قسمت دو بعدی ابتدا هندسه یک موجبر نواری سیلیکونی تعریف شد و سپس در قسمت مواد، جنس مواد موجبر را مشخص گردید بعد از این مرحله، شرایط مرزی میدان الکتریکی در نواحی تعریف شده، تعیین شد و برای هر ناحیه مش مرتبط انتخاب شد. نتایج شبیه سازی نشان داد که موجبر پیشنهادی دارای ۲ مد انتشاری است. از مقایسه بزرگی مولفه های میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی در راستای انتشار، TE یا TM بودن مدها تعیین گردید. با استفاده از مشتق گیری عددی پاشندگی مدی موجبر پیشنهادی محاسبه شد و مشخص گردید هر کدام از مدها یک طول موج پاشندگی صفر دارند که این موضوع در بررسی پدیده های غیرخطی مثل تولید ابرپیوستار حائز اهمیت بوده و مکانسیم آن را تحت تاثیر قرار می دهد. همچنین مساحت موثر مد TE بصورت قابل ملاحظه ای از مد دیگر کوچکتر بوده که نشان می دهد این مد سهم بیشتری در

پدیده های غیرخطی می تواند داشته باشد.

در ادامه با استفاده از مشخصه های اپتیکی موجبر طراحی شده و از طریق حل عددی معادلات حاکم بر فرآیند تولید ابرپیوستار در موجبرهای سیلیکونی، به شبیه سازی طیف ابرپیوستار در موجبر پیشنهادی پرداخته شد. نتایج بدست آمده نشان می دهند که پس از انتشار پالس ورودی در ۵ میلی متر از موجبر مذکور، پهن شدگی طیفی بین ۲۴۵۰-۱۲۰۰ نانومتر ایجاد می شود. همچنین از پروفایل زمانی نتیجه گرفته می شود که پدیده شکافت سالیتمونی نیز اتفاق می افتد. در این پژوهش طول موجبر مورد نظر ۵ میلی متر در نظر گرفته شده که در مقایسه با طول موجبرهای استفاده شده در منابع تجاری رایج بسیار کوتاهتر است که آن را مناسب برای فناوری On-chip می کند. در انتها پیشنهاد می شود ابعاد موجبر تغییر داده شود یا ساختارهای دندانه ای در نظر گرفته شود و نتایج مجددا مورد بررسی قرار گیرد.

مراجع

- [1] S Shekhar, W Bogaerts, L Chrostowski, et al., *Nat. Commun.* **15**, 751 (2024).
- [2] N Singh, J Lorenzen, K Wang, et al., *Nat. Photon.* **19**, 307–314 (2025).
- [3] C Li, M Zhang, H Xu, et al., *Photonix* **2**, 11 (2021).
- [4] K Petermann, *Archiv für Elektronik und Übertragungstechnik* **30**, 139–140 (1976).
- [5] A G Rickman, G T Reed, and F Namavar, *J. Lightwave Technol.* **12**, 1771–1776 (1994).
- [6] J Lousteau, D Furniss, A B Seddon, et al., *J. Lightwave Technol.* **22**, 1923 (2004).
- [7] Z Zhou, B Bai, and L Liu, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **25**, 1–13 (2018).
- [8] S Liu, D Liu, Z Yu, et al., *Optica* **10**, 316–323 (2023).
- [9] J Wang, Y Long, *Sci. Bull.* **63**, 1267–1310 (2018).
- [10] R R Alfano, *The Supercontinuum Laser Source: The Ultimate White Light* (Springer Nature, New York 2023).

- [11] Z Wang, H Liu, N Huang, Q Sun, and J Wen, *Opt. Express*. **20**, 8920-8928 (2012).
- [12] H Pakarzadeh, S Hosseinabadi, and I S Amiri, *Silicon* **14**, 6097-6106 (2022).
- [13] H Pakarzadeh, and M Bahrami, *J. Nonlinear Opt. Phys. Mater.* 2550044 published online (2025).
- [14] Brès, C.-S., et al., *Nanophotonics* **12**, 1199-1244 (2023).
- [15] Q. Du, et al., *Photon. Res.* **6**, 506-510 (2018).
- [16] Y Fang, et al., *Laser & Photonics Rev.* **17**, 2200205 (2023).
- [17] G P Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics* (Academic Press, San Diego, 2019).
- [18] P A Agbemabiese and E K Akowuah, *Sci. Rep.* **10**, 21182 (2020).
- [19] B Tatian, *Appl. Opt.* **23**, 4477–4485 (1984).
- [20] L Tévenaz, *Advanced Fiber Optics* (EPFL Press, Lausanne, 2011).
- [21] A Safaei Bezgabadi and M A Bolorizadeh, *Sci. Rep.* **12**, 1–9 (2022).
- [22] S Sun, G Z Mashanovich, and A C Peacock, *Opt. Express* **32**, 8715–8722 (2024).
- [23] P H Wang, S P Wang, N L Hou, et al., *Sci. Rep.* **13**, 13211 (2023).
- [24] E Namjoo, A Safaei Bezgabadi, and M Monajati, *Opt. Quantum Electron.*, under revision (2025).
- [25] L Yin, PhD dissertation, Rochester University, Rochester (2009).
- [26] T Zhu, M R C Mahdy, Y Cao, et al., *Opt. Express* **24**, 18436–18444 (2016).
- [27] M A Butt, *Photonics* **11**, 198 (2024).
- [28] Z Ostovar, H R Bakhtiarizadeh, and A Safaei Bezgabadi, *Opt. Quant. Electron.* **57**, 194 (2025).
- [29] L Yin, Q Lin, and G P Agrawal, *Opt. Lett.* **32**, 391-393 (2007).
- [30] L Zhang, Q Lin, Y Yue, et al., *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* **18**, 1799–1806, (2012).
- [31] N Singh, M Xin, D Vermeulen, et al., *Light Sci. Appl.* **7**, 17131 (2017).
- [32] C Lafforgue, S Guerber, J M Ramirez, et al., *Photon. Res.* **8**, 352-358 (2020).
- [33] A Ishizawa, K Kawashima, R Kou, et al., *Opt. Express* **30**, 5265 (2022).
- [34] M Sinobad, A DellaTorre, R Armand, et al., *Opt. Lett.* **45**, 5008, 2020.
- [35] I Rebolledo-Salgado, Z Ye, S Christensen, et al., *Optics Express* **30**, 8641 (2022).
- [36] F Leo, S P Gorza, S Coen, B. Kuyken and G Roelkens, *Opt. Lett.* **40**, 123-126 (2015).