

## طراحی موجبر نواری سیلیکونی و مشخصه‌های اپتیکی آن

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

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

پست الکترونیکی: a.safaei@kgut.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۰۷؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۴/۰۷/۲۵)

### چکیده:

در این مقاله یک موجبر پله‌ای با استفاده از نرم افزار کامسول طراحی شده و مشخصات اپتیکی آن شبیه‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهد که این موجبر دارای دو مد انتشاری شامل یک مد عرضی الکتریکی (TE) و یک مد عرضی مغناطیسی (TM) است. برای این دو مد، رخ‌نمای 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 است و با طول موج رشد چندانی ندارد، به‌علاوه 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 می‌دهد که با توجه به ویژگی‌های پالس تزریق شده، پهن‌شدگی طیفی یک اکتاوی در خروجی موجبر ایجاد می‌شود.

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

کم، پهنای باند وسیع و تحمل بالا در برابر خطاهای ساخت

است. این ویژگی‌ها برای توسعه مدارهای مجتمع فوتونیک<sup>۱</sup>

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].

### ۱. مقدمه

فوتونیک سیلیکونی در سال‌های اخیر پیشرفت بسیاری کرده و

به دلیل مزایای خاصی مانند پنجره شفاف وسیع، تضاد ضریب

شکست بسیار بالا، سازگاری با فناوری CMOS<sup>۱</sup> (نیم‌رسانای

اکسید-فلز مکمل)، 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 اضافه

بسیار کم، نسبت خاموشی بسیار بالا، تداخل سیگنال بسیار

۱. Complementary Metal-Oxide Semiconductor

۲. Photonic Integrated Circuit

پتانسیل اصلاح فاز، تولید شکل موج، شکل‌دهی پرتو و شکل‌دهی پالس را در بسیاری از سامانه‌های فوتونیک نشان می‌دهد [۸].

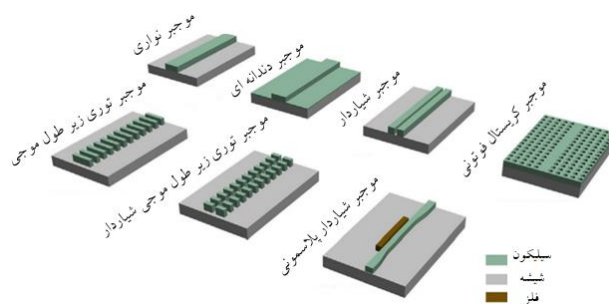
تاکنون مطالعات متعددی بر روی موجبرهای سیلیکونی چند مدی از نوع نواری<sup>۱</sup>، دندان‌های<sup>۲</sup>، مشبک زیرطول موجی<sup>۳</sup>، بلور فوتونی و غیره انجام گرفته و هنوز هم ادامه دارد [۹ و ۱۰]. در شکل ۱، طرح‌واره چند نمونه از موجبرهای سیلیکونی آمده است.

لازم به ذکر است که موجبرهای سیلیکونی به صورت گسترده در ناحیه تراهرتز هم به کار 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 اختلاط چهار موجی<sup>۴</sup> تولید کنند [۱۱]. در سال ۲۰۲۲، موجبر سیلیکونی به منظور تبدیل طول موجی قابل تنظیم در ناحیه تراهرتز مبتنی بر پدیده ناپایداری مدولاسیون طراحی گردید [۱۲]. در سال ۲۰۲۵ موجبر سیلیکونی دندان‌های ویژه‌ای طراحی شد که می‌توانست طیف ابرپوستاری را ایجاد کند به گونه‌ای که گستره وسیع طیفی از محدوده مادون قرمز تا تراهرتز را دربر می‌گرفت [۱۳].

بنابراین با توجه به اهمیت موضوع، هدف اولیه ما طراحی یک موجبر سیلیکونی دو مدی و تعیین مشخصه‌های نوری آن است.

جدول ۱. مقادیر ثابت‌های عددی رابطه (۱)

$B_1$	۱۰/۶۶۸۴۲۹۳
$B_2$	۰/۰۰۳۰۴۴۷۴۸
$B_3$	۱/۵۴۱۳۳۴۰۸
$C_1$	۰/۳۰۱۵۱۶۴۸۵ $\mu\text{m}$
$C_2$	۱/۱۳۴۷۵۱۵ $\mu\text{m}$
$C_3$	۱۱۰۴ $\mu\text{m}$



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

به همین دلیل، دستگاه‌های کنترل قطبش مانند قطبش‌سنج‌ها، تقسیم‌کننده‌های پرتوی قطبشی و چرخاننده‌های قطبشی با عملکرد بالا، بر پایه موجبرهای سیلیکونی با دوشکستی زیاد<sup>۱</sup> 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 نشان داد که موجبرهایی با سطح مقطع بزرگ (نسبت به طول موج) می‌توانند رفتار تک‌مدی داشته باشند [۴]. این مفهوم توسط سورف 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 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 دیجیتالی برای مدیریت پاشندگی معرفی شده که

۱. High Birefringent

۲. Strip Waveguide

۳. Rib Waveguide

۴. Subwavelength Grating (SWG) Waveguide

۵. Four-Wave Mixing

## ۲. فیزیک مسئله، روش و پارامترهای شبیه‌سازی

به‌طور 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.

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

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

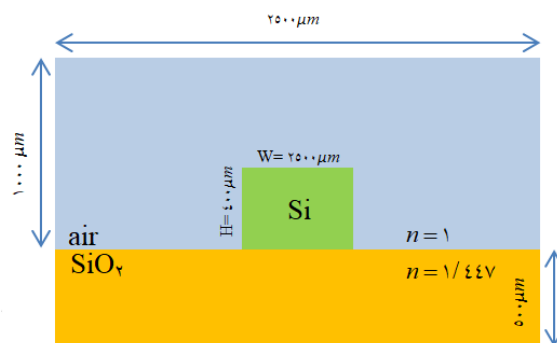
به صورت عددی یا با استفاده از نرم افزارهای موجود مانند کامسول یا لومریکال حل شود. در رابطه (۱)،  $k$ ،  $F(x, y)$ ، ضریب شکست  $n(\omega)$  و  $\beta(\omega)$  به ترتیب قسمت عرضی میدان الکتریکی، عدد موج در خلأ، ضریب شکست ماده و ثابت انتشار هستند.

ابتدا با استفاده از نرم افزار کامسول در قسمت دو بعدی یک موجبر نواری با پهنای  $550 \mu\text{m}$  میکرومتر و ارتفاع  $400 \mu\text{m}$  میکرومتر طراحی کرده و سپس در قسمت مواد، با استفاده از کتابخانه نرم‌افزار کامسول جنس مواد موجبر مشخص می‌شود. فضای بالای موجبر هوا فرض شده و پایین موجبر شیشه از جنس  $\text{SiO}_2$  در نظر گرفته شده است. همچنین جنس هسته، سیلیکون خالص انتخاب شده است. طرح‌واره موجبر پیشنهادی در شکل ۲ نمایش داده شده است.

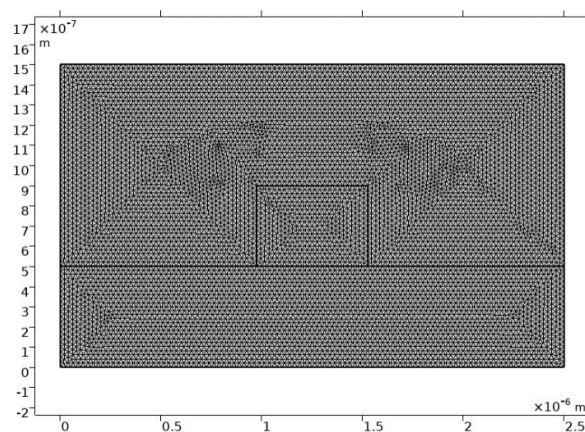
همچنین ضریب شکست هوا و شیشه به ترتیب ۱ و  $1/447$  در نظر گرفته شده و ضریب شکست سیلیکون خالص از رابطه سل‌میر [۱۹]:

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

در نرم افزار لحاظ شده است (مقادیر ثابتهای رابطه بالا در جدول ۱ ذکر شده‌اند). البته می‌توان برای زیر لایه (شیشه) هم، رابطه سل‌میر آن را برای ضریب شکست در نظر گرفت.



شکل ۲. طرح‌واره موجبر سیلیکونی پیشنهادی.



شکل ۳. مش نواحی مختلف موجبر پیشنهادی.

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 رخ‌نمای 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].

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/بهره موجبر نقش ایفا می‌کند.

همچنین سطح مقطع موثر مدی که یکی دیگر از مشخصه‌های اپتیکی موجبرها است 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،

$$\gamma(\lambda_c) = \frac{2\pi n_p}{\lambda_c A_{eff}} \quad (5)$$

اهمیت بالایی دارد [۱۷]. در رابطه (۵)،  $n_p$  ضریب شکست غیرخطی هسته موجبر بوده و  $\lambda_c$  طول موج مرکزی پالس ورودی به موجبر است (در عمل ضریب شکست غیرخطی تابع طول موج است اما در برخی از کاربردها در یک بازه طول موجی مشخص آن را به‌صورت 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  $m^2W^{-1} \times 10^{-18} \times 2/5$  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 است.

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

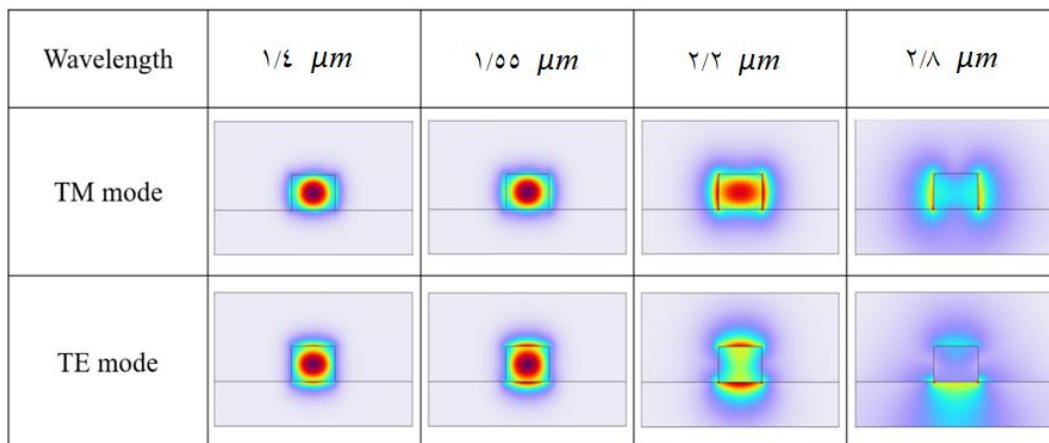
پاشندگی یکی از ویژگی‌های اساسی موجبرهاست که ظرفیت انتقال اطلاعات را تحت تاثیر قرار می‌دهد. وجود پاشندگی باعث کشیده شدن پالس نوری و در نتیجه تداخل بین مدها می‌شود [۲۰]. اما پاشندگی همیشه به عنوان یک عامل منفی در نظر گرفته نمی‌شود. به عنوان مثال در پدیده تولید ابرپیوستار، پاشندگی سهم مهم و بسزایی دارد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

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

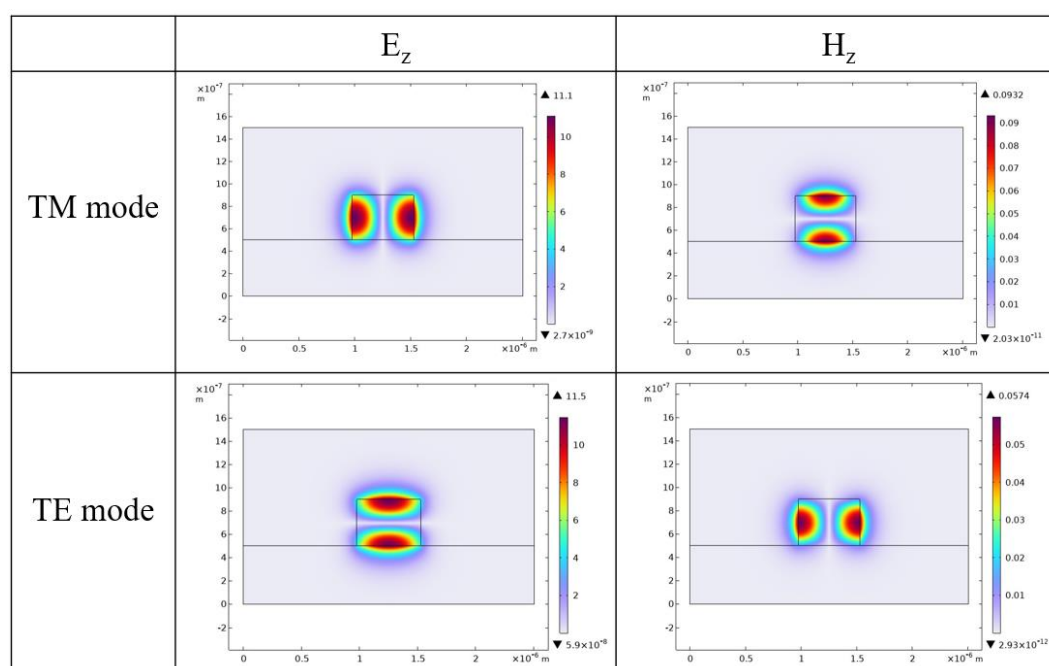
به‌دست می‌آید [۱۷ و ۱۸]، که در آن  $n_{eff}$  و  $c$  به ترتیب ضریب شکست موثر مد و سرعت نور در خلاء هستند. کمیت  $\beta_p$  ضریب پاشندگی مرتبه دوم بوده و بیانگر پاشندگی سرعت گروه است. همان‌گونه که از رابطه (۳) مشخص است، پاشندگی موجبر ( $D$ ) و پارامتر پاشندگی سرعت گروه ( $\beta_p$ ) از لحاظ مقدار مثبت 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 به‌دست آوردن پاشندگی، با توجه به رابطه (۳) از ضریب شکست موثر به صورت عددی مشتق‌گیری



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



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

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 بیان شده دارای دو مد انتشاری شامل یک مد عرضی الکتریکی (TE) و یک مد عرضی مغناطیسی (TM) است. از طول موج  $2/8$  میکرومتر به بعد ضریب شکست موثر یکی از مدها کمتر از ضریب شکست زیر لایه ( $SiO_2$ ) می‌شود و به‌طور فیزیکی از این‌جا به بعد این مد غیر انتشاری خواهد

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.

### ۳. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی کامسول

موجبر مفروض برای بازه طول موجی  $1/4$  میکرومتر تا  $2/8$  میکرومتر مورد بررسی قرار گرفته است. این محدوده طول

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 اتلاف 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 پاسخی غیرفیزیکی است هر چند معمولاً از قسمت موهومی ضریب شکست موثر مدها به دلیل کوتاه بودن طول موجبرهای روی تراشه صرف نظر 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].

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 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 است.

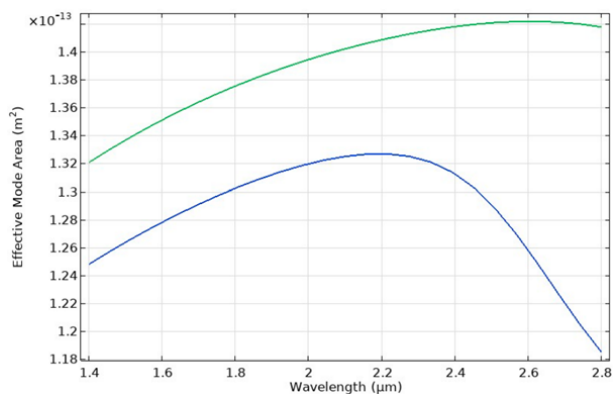
با توجه به نتایج به دست آمده از نرم افزار کامسول، درصد محصور شدگی مد TE و TM در موجبر طراحی شده در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر به ترتیب ۸۳٪ و ۷۶٪ حاصل شده است (این طول موج به دلیل کاربردهای متنوعی که دارد انتخاب شده است). همچنین مقدار افت در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر برای مد TE و TM به ترتیب ۳/۵ dB/cm و ۲/۵ dB/cm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

بود [۱۰ و ۱۷]. در شکل ۴، رخ‌نمای میدان الکتریکی این دو مد در صفحه عرضی برای چند طول موج نشان داده شده است.

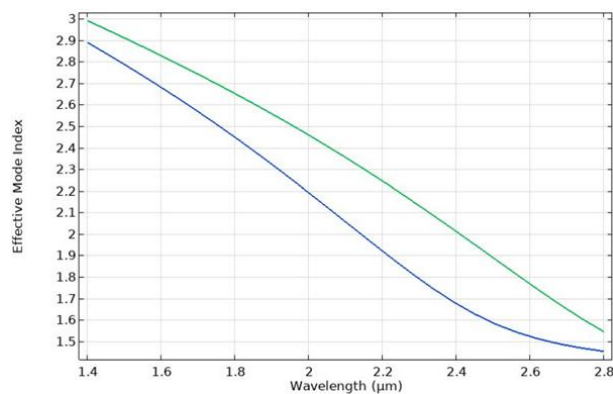
از شکل ۴ مشاهده می‌شود که در طول موج‌های ۱/۴ میکرومتر و ۱/۵۵ میکرومتر، میدان الکتریکی در هسته موجبر به خوبی متمرکز است و هر چه طول موج بزرگتر می‌شود رخ‌نمای میدان الکتریکی در مرزهای هسته قرار گرفته و یک نوع خاص از میدان ناپایا را ایجاد می‌کنند [۱۷ و ۲۶]. این اتفاق برای مد TE در طول موج کوتاه‌تری نسبت به مد TM رخ می‌دهد. البته میدان ناپایا، حالت انتشاری مخصوص به خود را دارد زیرا ضریب شکست موثر مدها بزرگ‌تر از ضریب شکست شیشه است [۱۷، ۲۶ و ۲۷]. اما ذکر این نکته ضروری است که این موج مانند یک موج الکترومغناطیسی معمولی منتشر نمی‌شود [۲۷]. امواج ناپایا در میکروسکوپ میدان-نزدیک، حسگرهای زیستی، لایه نشانی نانو مواد و غیره کاربرد دارند [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 به کار گرفته شود، برای کاربردهای ذکر شده قابل استفاده است.

در شکل ۵، مولفه میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی در راستای انتشار برای هر دو مد در طول موج ۱/۴ 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 TM 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 می‌شوند.

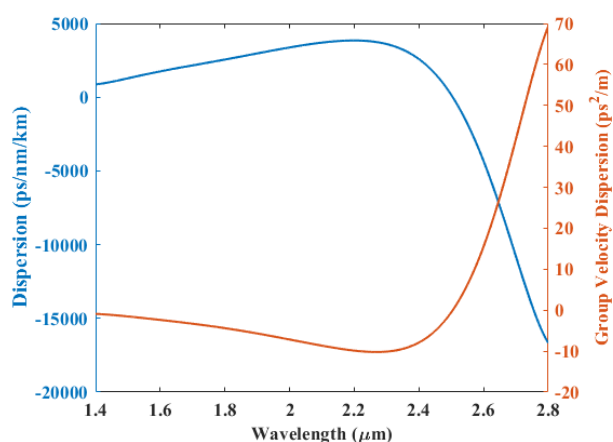
یکی دیگر از ویژگی‌های اپتیکی بسیار مهم در موجبرها، ضریب شکست موثر مدی است که از روی آن پاشندگی موجبر (رابطه ۳) محاسبه می‌گردد. شکل ۶، ضریب شکست موثر مدها را نشان داده که می‌توان نتیجه گرفت برای این ساختار و در بازه طول موجی مورد بررسی ضریب شکست موثر مد TM همواره از مد TE بزرگتر است.



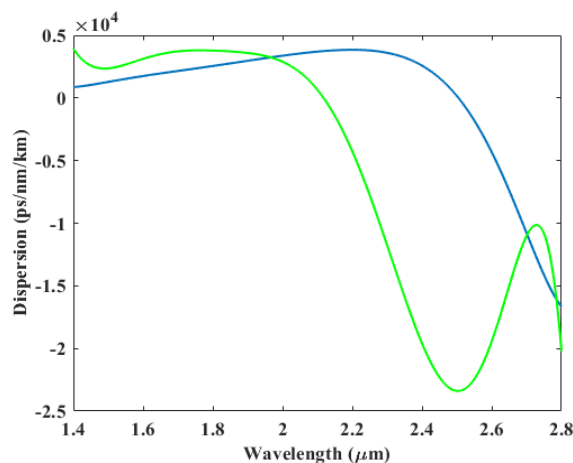
شکل ۸. سطح مقطع موثر برای مد TM (رنگ سبز) و مد TE (رنگ آبی).



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



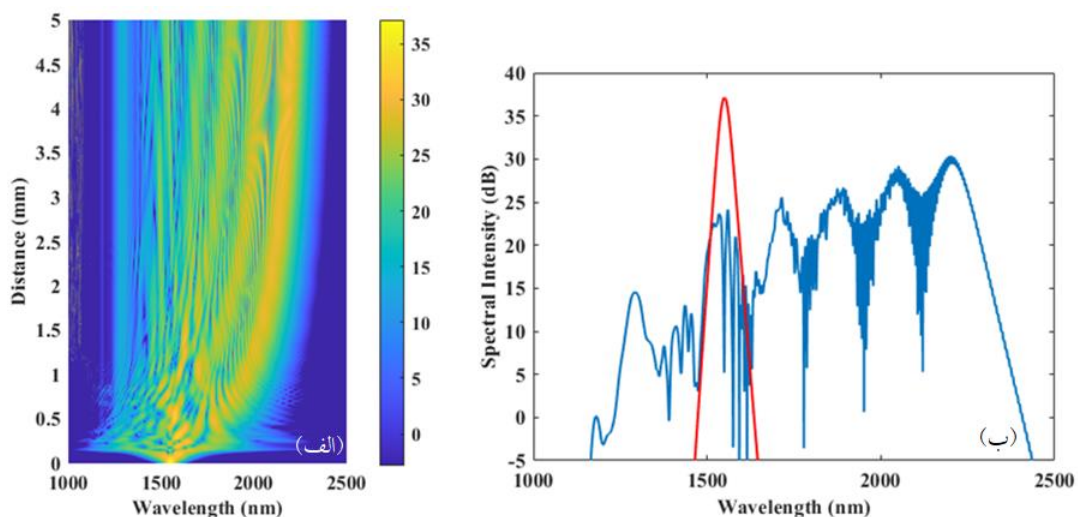
شکل ۹. پاشندگی مد TM (رنگ آبی) و پاشندگی سرعت گروه مربوط به این مد (رنگ نارنجی).



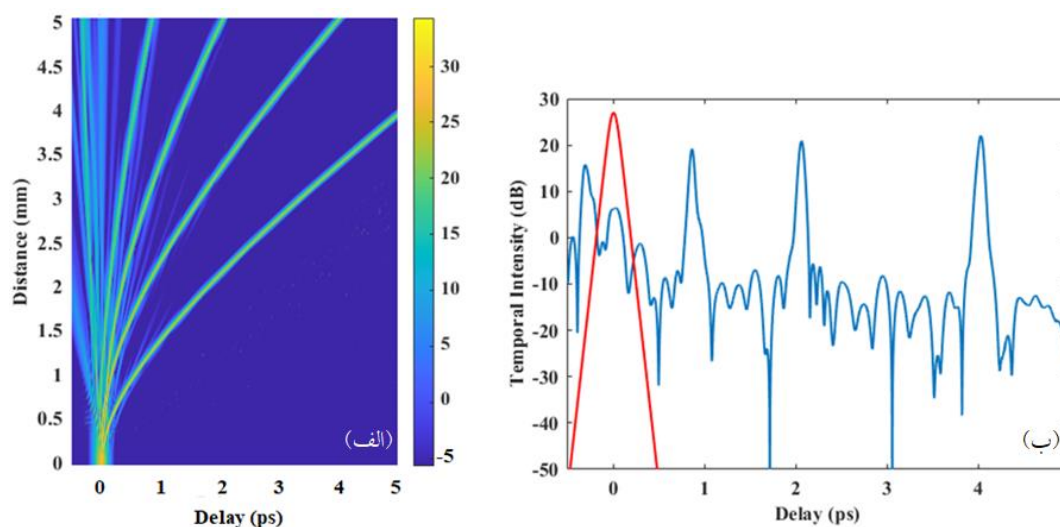
شکل ۷. پاشندگی مد TM (رنگ سبز) و مد TE (رنگ آبی).

به عنوان مثال در هنگام انتشار سالیتون نوری در موجبرها، اگر سالیتون در ناحیه با پاشندگی غیرعادی منتشر شود، پدیده جابه‌جایی خود-سامدی سالیتون<sup>۱</sup> سازوکار غالب است و اگر سالیتون در ناحیه با پاشندگی عادی منتشر شود، پدیده مدوله‌سازی خود-فازی سهم بیشتری خواهد داشت [۲۸]. طول موج‌های پاشندگی صفر و تعداد آن‌ها نیز در نحوه انتشار پالس نوری در موجبرها بسیار موثر است. به‌طور کلی پاشندگی و پدیده‌های غیرخطی در برهم‌کنش نور با ماده، فیزیک حاکم بر منابع نوری ابرپیوستار را توصیف می‌کنند.

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 به‌دست 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 TM در نزدیکی ۲/۵ میکرومتر قرار داشته و برای مد TE در ۲/۱۲ میکرومتر حاصل شده است. نواحی قبل از این طول موج‌ها، نواحی با پاشندگی غیرعادی (پاشندگی مثبت) و بعد از این طول موج‌ها نواحی با پاشندگی عادی (پاشندگی منفی) هستند [۱۷].



شکل ۱۰: الف. تحول طول موجی طیف ابریوستار در طول ۵ میلی‌متر از موجبر طراحی شده. ب. رنگ آبی: رخ‌نمای طول موجی طیف ابریوستار ایجاد شده در انتهای موجبر و رنگ قرمز: نور ورودی به موجبر با طول موج مرکزی ۱۵۵۰ نانومتر.



شکل ۱۱: الف. تحول زمانی نور ابریوستار در طول ۵ میلی‌متر از موجبر طراحی شده. ب. رنگ آبی: رخ‌نمای زمانی نور ابریوستار ایجاد شده در انتهای موجبر و رنگ قرمز: نور ورودی به موجبر در حوزه زمان.

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

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

در شکل ۱۰. الف، 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 سالیوتونی در طول ابتدایی موجبر اتفاق می‌افتد. پدیده شکافت سالیوتونی در اثر برهم‌کنش آثار پاشدگی مراتب بالا با اثر خود-سراشیبی و اثر رامان القایی رخ می‌دهد. بخشی از پهن‌شدگی طیفی ناشی از این پدیده است.

در شکل ۱۱. الف، 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. الف، مشخص می‌شود که پدیده شکافت سالیوتونی رخ داده به گونه‌ای است که سالیتون ورودی به ۴ سالیتون مرتبه پائین‌تر شکافته شده است. پالس‌های سالیوتونی شکافته شده نسبت به جبهه اصلی موج دارای تاخیر زمانی (عقب‌تر) هستند. این تاخیر به دلیل پاسخ رامان محیط است. با توجه به شکل ۱۱. الف، سالیتون چهارم در زمان تاخیری طولانی‌تری به خروجی موجبر می‌رسد و به همین دلیل در بازه زمانی رسم شده برای خروجی این سالیتون پدیدار نشده است (شکل ۱۱. ب).

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.

همچنین با تعریف رابطه (۴) در نرم افزار کامسول، سطح مقطع موثر مدی محاسبه می‌شود. به‌طور کلی سطح مقطع موثر مدی در تعیین پارامتر غیرخطی موجبرها نقش اساسی دارد. این پارامتر در شکل‌گیری پدیده‌های غیرخطی به‌ویژه پدیده‌های سهیم در فرآیند انتشار پالس نوری در موجبرها موثر است. در شکل ۸، سطح مقطع موثر برای مدهای موجبر مورد نظر رسم شده است. از شکل ۸ مشاهده می‌شود که سطح مقطع موثر برای مد TE ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. از مقدار نتایج بدست آمده برای سطح مقطع موثر مدی مشخص می‌شود موجبر مفروض در مقایسه با اکثر تارهای نوری، بلور فوتونی از سطح مقطع موثر مدی کوچکتری برخوردار است که این نتیجه منجر به ایجاد پارامتر غیرخطی بزرگتری می‌شود. به‌طور کلی هرچه این پارامتر مقدار بزرگتری داشته باشد می‌توان برای ایجاد یک پدیده غیرخطی از موجبر کوتاه‌تری استفاده کرد. به‌طور فیزیکی استفاده از موجبر با طول کوتاه‌تر یعنی تلفات سیگنال کمتر. البته طول مورد استفاده از موجبر باید بر اساس کاربرد مورد نظر بهینه‌سازی شود.

#### ۴. شبیه‌سازی طیف ابرپیوستار

در این‌جا با بهره‌گیری از معادلات حاکم بر فرآیند تولید طیف ابرپیوستار در موجبرهای سیلیکونی [۲۵ و ۲۹]، به مطالعه طیف ابرپیوستار در موجبر پیشنهادی پرداخته می‌شود. به این منظور فرض می‌شود 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 گونه‌ای 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 است. 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 به‌صورت مشتق‌گیری عددی حاصل شده‌اند.

## ۵. نتیجه گیری

می‌دهد این مد سهم بیشتری در پدیده‌های غیرخطی می‌تواند داشته باشد.

در ادامه با استفاده از مشخصه‌های اپتیکی موجبر طراحی شده و از طریق پاسخ عددی معادلات حاکم بر فرآیند تولید ابرپیوستار در موجبرهای سیلیکونی، به شبیه‌سازی طیف ابرپیوستار در موجبر پیشنهادی پرداخته شد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که پس از انتشار پالس ورودی در ۵ میلی‌متر از موجبر، پهن شدگی طیفی بین ۲۴۵۰-۱۲۰۰ نانومتر ایجاد می‌شود. همچنین از رخ‌نمای زمانی نتیجه گرفته می‌شود که پدیده شکافت سالیوتونی نیز اتفاق می‌افتد. در این پژوهش طول موجبر مورد نظر ۵ میلی‌متر 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 روی تراشه (On-chip) می‌کند. در انتها پیشنهاد می‌شود ابعاد موجبر تغییر داده شود یا ساختارهای دندان‌های در نظر گرفته شود و نتایج مجدداً مورد بررسی قرار گیرند.

در این مقاله، با استفاده از نرم افزار کامسول (بخش 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 شبیه‌سازی نشان داد که موجبر پیشنهادی دارای دو مد انتشاری است. از مقایسه بزرگی مولفه‌های میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی در راستای انتشار، TE یا TM بودن مدها تعیین گردید. با استفاده از مشتق‌گیری 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 پدیده‌های غیرخطی مثل تولید ابرپیوستار حائز اهمیت بوده و سازوکار آن را تحت تاثیر قرار می‌دهد. همچنین مساحت موثر مد TE به‌صورت قابل ملاحظه‌ای از مد دیگر کوچک‌تر بوده که نشان

## ۶. مراجع

1. S Shekhar, W Bogaerts, L Chrostowski, *et al.*, *Nat. Commun.* **15** (2024) 751.
2. N Singh, J Lorenzen, K Wang, *et al.*, *Nat. Photon.* **19** (2025) 307.
3. C Li, M Zhang, H Xu, *et al.*, *Photonix* **2** (2021) 11.
4. K Petermann, *Archiv für Elektronik und Übertragungstechnik* **30** (1976) 139.
5. A G Rickman, G T Reed, and F Namavar, *J. Lightwave Technol.* **12** (1994) 1771.
6. J Lousteau, D Furniss, A B Seddon, *et al.*, *J. Lightwave Technol.* **22** (2004) 1923.
7. Z Zhou, B Bai, and L Liu, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **25** (2018) 1.
8. S Liu, D Liu, Z Yu, *et al.*, *Optica* **10** (2023) 316.
9. J Wang, Y Long, *Sci. Bull.* **63** (2018) 1267.
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** (2012) 8920.
12. H Pakarzadeh, S Hosseinabadi, and I S Amiri, *Silicon* **14** (2022) 6097.
13. H Pakarzadeh, and M Bahrami, *J. Nonlinear Opt. Phys. Mater.* 2550044 (2025).
14. C -S Brès, *et al.*, *Nanophotonics* **12** (2023) 1199.
15. Q. Du, *et al.*, *Photon. Res.* **6** (2018) 506.
16. Y Fang, *et al.*, *Laser & Photonics Rev.* **17** (2023) 2200205.
17. G P Agrawal, "Nonlinear Fiber Optics", Academic Press, San Diego, (2019).
18. P A Agbemabiese and E K Akowuah, *Sci. Rep.* **10** (2020) 21182.
19. B Tattian, *Appl. Opt.* **23** (1984) 4477.
20. L Tévenaz, "Advanced Fiber Optics", EPFL Press, Lausanne, (2011).
21. A Safaei Bezagabadi and M A Bolorizadeh, *Sci. Rep.* **12** (2022) 1.
22. S Sun, G Z Mashanovich, and A C Peacock, *Opt. Express* **32** (2024) 8715.
23. P H Wang, S P Wang, N L Hou, *et al.*, *Sci. Rep.* **13** (2023) 13211.

24. E Namjoo, A Safaei Bezagabadi, and M Monajati, *Opt. Quantum Electron.* **58** (2026) 43.
25. L Yin, PhD dissertation, Rochester University, Rochester (2009).
26. T Zhu, M R C Mahdy, Y Cao, *et al.*, *Opt. Express* **24** (2016) 18436.
27. M A Butt, *Photonics* **11** (2024) 198.
28. Z Ostovar, H R Bakhtiarzadeh, and A Safaei Bezagabadi, *Opt. Quant. Electron.* **57** (2025) 194.
29. L Yin, Q Lin, and G P Agrawal, *Opt. Lett.* **32** (2007) 391.
30. L Zhang, Q Lin, Y Yue, *et al.*, *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* **18** (2012) 1799.
31. N Singh, M Xin, D Vermeulen, *et al.*, *Light Sci. Appl.* **7** (2017) 17131.
32. C Lafforgue, S Guerber, J M Ramirez, *et al.*, *Photon. Res.* **8** (2020) 352.
33. A Ishizawa, K Kawashima, R Kou, *et al.*, *Opt. Express* **30** (2022) 5265.
34. M Sinobad, A DellaTorre, R Armand, *et al.*, *Opt. Lett.* **45** (2020) 5008.
35. I Rebolledo-Salgado, Z Ye, S Christensen, *et al.*, *Optics Express* **30** (2022) 8641.
36. F Leo, S P Gorza, S Coen, B. Kuyken and G Roelkens, *Opt. Lett.* **40** (2015) 123.