بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۴-۱۲ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

مطالعه پراکندگی رامان القایی تپ حامل اندازه حرکت زاویه‌ای مداری در فیبر نوری

سیده فائزه موسوی، رحمان نوروزی

زنجان، بلوار استاد ثبوتی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه، دانشکده فیزیک

چکیده - در دهه‌های اخیر تمایل به استفاده از اندازه حرکت زاویه‌ای مداری (*OAM*) به‌عنوان درجه آزادی جدید جهت مدولاسیون اطلاعات در کانال‌های مخابرات نوری گسترش یافته است. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که مدولاسیون اطلاعات بر اساس *OAM* قادر به افزایش چشمگیر ظرفیت انتقال داده در شبکه های نسل آتی می‌باشد. تبدیل طول موج و تقویت تمام نوری امواج حامل *OAM*، امکان بکارگیری آنها را در سیستم‌های مخابراتی تجاری بـر پایه تکنیک هم‌تافتگری تقسیم طول موج (*WDM*) نیز فراهم می‌سازد. در این مقاله فرایند غیرخطی پراکندگی رامان القایی (*SRS*) مطالعه و اثر آن بر تبدیل طول موج و تقویت تپ‌های حامل *OAM* بررسی شده است. نتایج محاسبات نشان‌دهنده‌ی بقای *OAM* در حین تبدیل طول موج و لذا حفظ اطلاعات مدوله شده می‌باشد.

کلید واژه- اندازه حرکت زاویه‌ای مداری، پراکندگی رامان القایی، تبدیل طول موج، فیبر نوری.

Study of Stimulated Raman scattering for pulse carrying orbital angular momentum in optical fiber

S. Faezeh Mousavi, Rahman Nouroozi

Physics department, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan

Abstract- In the past decades, interests in exploiting Orbital Angular Momentum (OAM) as a new degree of freedom for encoding the information in optical communication channels have been enhanced. Research results show that OAM modulation can increase the data transmission capacity of next generation networks. All-optical wavelength conversion and amplification of OAM carriers provide the possibility of using them in commercial communication systems based on Wavelength Division Multiplexing (WDM) technique. In this paper, nonlinear Stimulated Raman Scattering (SRS) interaction and its effect on wavelength conversion and amplification of pulses carrying OAM have been studied. The results prove the conservation of OAM during the wavelength conversion that leads to conservation of modulated information.

Keywords: Orbital Angular Momentum, Optical Fiber, Stimulated Raman Scattering, Wavelength Conversion.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر محدودیت‌های تکنولوژیکی و اثرات غیرخطی موجب کاهش سرعت رشد ظرفیت انتقال داده در سیستم‌های مخابراتی مدوله شده با روش‌های متداول فعلی (مدولاسیون دامنه، فرکانس، قطبش و فاز) شده است [۱]. لذا استفاده از تکانه زاویه‌ای مداری[۱] (OAM) به عنوان درجه آزادی جدیدی جهت مدولاسیون سیگنال‌های انتشاری حامل اطلاعات مورد بررسی قرار گرفته است. امواج حامل OAM دارای توزیع فاز متناسب با $\exp(-jl\phi)$ می‌باشند؛که در آن ، ϕزاویه سمتی و l عدد صحیحی است که به آن بار توپولوژیکی[۲] گفته می‌شود. هریک از فوتون‌های چنین باریکه‌هایی دارای اندازه حرکت زاویه‌ای مداری به مقدار $L=l\hbar$ است. متداول‌ترین نوع باریکه‌های حامل OAM، مدهای لیزر لاگرگوسی است [۲]. با توجه به اینکه اندازه حرکت زاویه‌ای مداری می‌تواند هر مقدار صحیحی متناسب با $\hbar$ را به خود اختصاص دهد، استفاده از این سیگنال‌های مدوله شده، امکان افزایش چشم‌گیر ظرفیت انتقال اطلاعات در سیستم‌های مخابراتی را فراهم می‌سازد [۳]. انتشار مدهای مدوله شده با OAM به صورت تجربی در فیبرهای نوری گردابی[۳] با پروفایل ضریب شکست حلقوی مورد آزمایش قرار گرفته است [۴]. بنابراین بررسی پدیده‌های مختلف ناشی از انتشار امواج حامل OAM در فیبر، شرایط بکارگیری آنها را در شبکه‌های مخابراتی تجاری ممکن می‌سازد.

یکی از پدیده‌های مهم غیرخطی در فیبر نوری پراکندگی رامان القایی۴ (SRS) است که منجر به تغییر طول موج نور پراکنده شده در محدوده‌ای وسیع و تقویت آن می‌گردد. ازاین رو فیبرهای نوری به عنوان تقویت کننده‌ی رامان پهن باند (نسبت به تقویت کننده‌های EDFA) و لیزرهای رامان قابل تنظیم بکار می‌روند. این اثر همچنین می‌تواند عملکرد سیستم‌های نوری چند کاناله را با تبدیل طول موج و لذا انتقال انرژی از یک کانال به کانال‌های دیگر به شدت تحت تاثیر قرار دهد. با گزینش هر بسامد در پهنای گسترده بهره‌ی SRS در فیبر نوری سیلیکایی (تقریباً ۴۰THz)، می‌توان از این پراکندگی به‌عنوان مبدل طول موج تمام نوری در سیستم‌های مخابراتی بر پایه‌ی تکنیک هم‌تافتگری تقسیم طول موج[۵](WDM) استفاده نمود. WDM تکنولوژی متداولی برای ترکیب سیگنال‌ها با طول موج‌های متفاوت و انتشار آنها توسط یک فیبر نوری است [۵] و تبدیل طول موج تمام نوری راه حل مناسبی برای مشکل انسداد کانال در آن می‌باشد [۶]. دراین مقاله ابتدا مبانی نظری اثر SRS در فیبر نوری بیان می‌شود. سپس با در نظر گرفتن توزیع میدان الکتریکی لاگرگوسی برای موج پمپ ورودی، تبدیل طول موج باریکه‌های حامل OAM و تقویت باریکه‌ی پراکنده شده در این فرایند غیرخطی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مبانی نظری

یکی از پراکندگی‌های القایی غیرخطی در فیبر نوری، اثر SRS است که باعث پراکندگی نور انتشاری از مولکول‌های در حال ارتعاش (فونون‌های اپتیکی) سیلیکا می‌گردد. فوتون‌های پمپ با بسامد زاویه‌ای ω_p در طی این پراکندگی ناکشسان، به واسطه‌ی برانگیخته شدن به تراز ارتعاشی مولکول با بسامد Ω، دچار تغییر بسامد می‌شوند. در این حالت دو نوع موج جدید با بسامدهای $\omega_s=\omega_p-\Omega$ (استوکس) و $\omega_{as}=\omega_p+\Omega$ (آنتی‌استوکس) تولید و تقویت می‌شوند. در شرایط تعادل گرمایی که جمعیت تراز پایه بیش از تراز ارتعاشی است، پراکندگی استوکس غالب می‌باشد [۵ و۷]. شکل (۱) شمایی از نحوه‌ی پراکنده شدن نور در اثر SRS و تولید موج‌های استوکس و آنتی‌استوکس را بر اساس ترازهای انرژی بیان می‌کند. میزان بهره‌ی SRS در فیبرهای سیلیکایی دارای محدوده‌ی بسامدی وسیعی است که مقدار بیشینه‌ی آن در $\Omega/2\pi = 13$ THz رخ می‌دهد.

میدان الکتریکی مربوط به امواج انتشاری در فرایند SRS را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی زیر توصیف نمود:

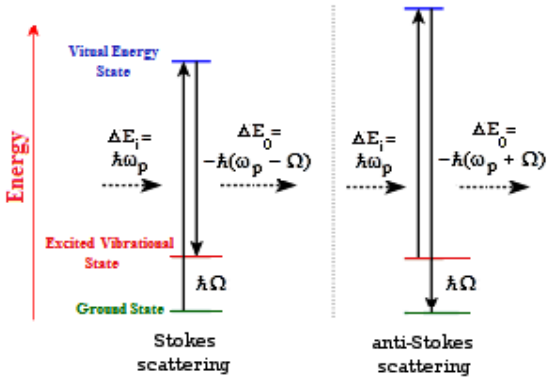
$$E(r,t)=\frac{1}{2}\{A_p e^{i(\beta_{0p}z-\omega_p t)}+A_s e^{i(\beta_{0s}z-\omega_s t)}\} \qquad (۱)$$

که در آن ω_i بسامد زاویـه‌ای، β_{0i} ثابت انتشار و A_j

[۱] Orbital Angular Momentum
[۲] Topological Charge
[۳] vortex
[۴] Stimulated Raman Scattering
[۵] Wavelength Division Multiplexing

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]



شکل ۱: نمودار تراز انرژی پراکندگی رامان القایی: نور پمپ فرودی با بسامد ω_p جذب و موج استوکس با بسامد $\omega_s = \omega_p - \Omega$ از مولکول در حال ارتعاش پراکنده می‌شود (نمودار سمت چپ). مولکول در حال ارتعاش با جذب موج پمپ، موج آنتی‌استوکس را در بسامد $\omega_s = \omega_p + \Omega$ تولید می‌کند (نمودار سمت راست).

پوش کندتغییر دامنه تپ‌های پمپ ($j=p$) و استوکس ($j=s$) را بیان می‌کنند. معادلات جفت شده‌ی حاکم بر انتشار تپ‌های پمپ و استوکس به این قرار است [۵]:

$$\frac{\partial A_p}{\partial z}+\frac{1}{v_{gp}}\frac{\partial A_p}{\partial t}+\frac{i}{2}\beta_{2p}\frac{\partial^2}{\partial t^2}+\frac{\alpha_p}{2}A_p = i\gamma_p[|A_p|^2+(2-f_R)|A_s|^2]A_p-\frac{g_p}{2}|A_s|^2A_p \quad (۲)$$

$$\frac{\partial A_s}{\partial z}+\frac{1}{v_{gs}}\frac{\partial A_s}{\partial t}+\frac{i}{2}\beta_{2s}\frac{\partial^2}{\partial t^2}+\frac{\alpha_s}{2}A_s = i\gamma_s[|A_s|^2+(2-f_R)|A_p|^2]A_s+\frac{g_s}{2}|A_p|^2A_s$$

در این روابط v_{gj} سرعت گروه، β_{2j} پارامتر پاشندگی، g_j ضریب بهره‌ی رامان، α_j ضریب اتلاف فیبر و $\gamma_j = n_2\omega_{0j}/cA_{eff}$ پارامتر غیرخطی تپ‌های انتشاری پمپ ($j=p$) و استوکس ($j=s$) است. همچنین n_2 ضریب شکست غیرخطی فیبر، A_{eff} سطح مقطع موثر فیبر و $f_R = ۰/۱۸$ سهم کسری پاسخ رامان تاخیری نسبت به قطبش غیرخطی است. جملات اول و دوم سمت راست روابط فوق به ترتیب اثر مدولاسیون خودفاز[۶] (SPM) و مدولاسیون فاز متقابل[۷] (XPM) را نشان می‌دهند که طبق اثر غیرخطی کر منجر به تغییرات فاز تپ‌های انتشاری می‌گردند [۵].

برای مطالعه اثر SRS بر امواج حامل OAM، مد LG که از حل معادله موج هلمهولتز[۸] در دستگاه مختصات استوانه‌ای (ρ,φ,z) به دست می‌آید، مورد بررسی قرار گرفته است. توزیع دامنه این مد، $A_{l,p}$، به این قرار است [۸]:

$$A_{l,p}(\rho,\varphi,z) = A_0\frac{w_0}{w(z)}\left(\frac{\rho}{w(z)}\right)^{|l|}L_p^{|l|}\left(\frac{2\rho^2}{w^2(z)}\right) e^{-\frac{\rho^2}{w^2(z)}}e^{-i\left(k\frac{\rho^2}{2R(z)}+kz+l\varphi-(|l|+2p+1)\zeta(z)\right)} \quad (۳)$$

در این رابطه، k عدد موج، w_0 شعاع کمر باریکه و $w(z)$ و $R(z)$ به‌ترتیب پهنا و انحنای باریکه در فاصله z می‌باشند. همچنین، A_0 ضریب بهنجارش، $\zeta(z)$ جابجایی فاز گوی[۹] و $L_p^{|l|}$ تابع چندجمله‌ای لاگر تعمیم یافته شامل l تکینگی سمتی و p تکینگی شعاعی است. در صورتی که p صفر باشد، توزیع عرضی شدت مد LG دونات شکل با شعاع داخلی متناسب با $|l|$ می‌باشد. برای تعیین مقدار OAM مد LG می‌توان از تداخل آن و یک موج با جبهه موج کروی بهره برد. طرح فریز ناشی از این تداخل، مارپیچی شکل است و تعداد بازوها و جهت چرخش آن (راستگرد و چپگرد)، به‌ترتیب اندازه و علامت OAM (مثبت و منفی) را مشخص می‌کند [۲].

۳- نتایج محاسبات

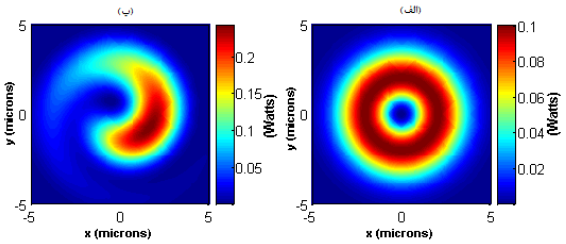
به منظور مطالعه‌ی نظری اثر SRS و تقویت و تبدیل طول موج ناشی از آن برای موج حامل OAM، روابط (۲) برای انتشار تپ گوسی شکل پمپ با پهنای زمانی $\tau = ۳۳$ ps و توزیع فضایی لاگرگوسی ($L=+1\hbar$) در طول موج ۱/۵۵ nm و توان بیشینه‌ی ۱۰۰ mW با استفاده از روش تبدیل فوریه‌ی گام شکسته[۱۰] و الگوریتم رونگه-کوتا[۱۱] به صورت عددی حل شده است. لذا توزیع عرضی و زمانی تپ ورودی به فیبر می‌باشد. شکل ۳-الف و ۳-ب به‌ترتیب توزیع فضایی توان مربوط به تپ پمپ ورودی در مرکز توزیع زمانی تپ و طرح تداخلی آن با جبهه موج کروی را نشان می‌دهد. این شکل مؤید مقدار $p=0$ و $L=+1\hbar$ برای تپ پمپ ورودی است.

[6] Self-Phase Modulation
[7] Cross Phase Modulation
[8] Helmholtz wave equation
[9] Gouy Phase Shift
[10] Split-Step Fourier
[11] Runge Kutta

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

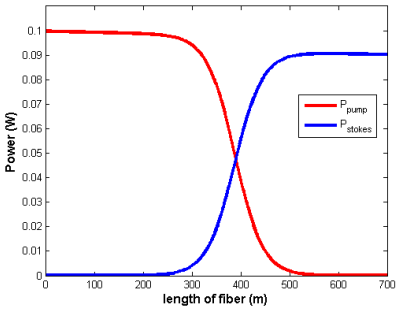
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

انتشار تپ مورد نظر در فیبری با سطح مقطع موثر



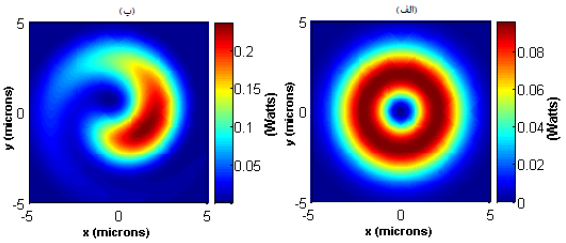
شکل ۲: الف) توزیع توان تپ پمپ ورودی و ب) طرح تداخل آن با یک موج گوسی با جبهه‌ی موج کروی.

$88\,\mu m^2$، ضریب غیرخطی $۲/۱۰\times۳۵^{-۲۰}\,m^2/W$، ضریب اتلاف $۰/۲\,dB/km$، ضریب پاشندگی $۵\,ps/nm.km$ و بهره‌ی رامان $\sim۰/۴\,1/W.m$ برای جابجایی استوکس $۱۳\,\Omega=/۲\,THz$ محاسبه شد. شکل (۳) تغییرات توان تپ پمپ ورودی با توزیع فضایی LG و تپ استوکس تولیدی در اثر SRS را طی انتشار در فیبر نوری نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل مشخص است، میزان توان تپ استوکس تولیدی در طول فیبر افزایش می‌یابد. لذا در طول مناسبی از فیبر توان پمپ کاملاً به تپ استوکس تقویت شده با طول موج قابل تنظیم در محدوده‌ی بهره‌ی رامان، منتقل می‌شود.



شکل ۳: تغییرات توان تپ پمپ ورودی (قرمز) و تپ استوکس تولید شده (آبی) در اثر پدیده SRS نسبت به طول فیبر نوری.

توزیع فضایی توان در مرکز توزیع زمانی تپ استوکس تولید و تقویت شده در فیبر به طول ۷۰۰ m و طرح تداخل آن با جبهه‌ی موج کروی نیز به‌ترتیب در شکل ۴-الف و ۴-ب نشان داده شده است. وجود یک بازوی ساعتگرد در طرح تداخلی فوق تاییدی بر تولید تپ استوکس حامل OAM با مقدار $L=+1\hbar$ و لذا بقای اندازه و علامت کمیت OAM در حین تبدیل طول موج در فرایند غیرخطی SRS می‌باشد. به‌عبارت دیگر با تبدیل طول موج، اطلاعات مدوله شده بر اندازه حرکت زاویه‌ای مداری نور انتشاری در فیبر حفظ شده است.



شکل ۴: الف) توزیع توان تپ استوکس خروجی از اثر SRS و ب) طرح تداخل آن با یک موج گوسی با جبهه‌ی موج کروی.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله تبدیل طول موج و تقویت تپ انتشاری حامل OAM با استفاده از اثر غیرخطی SRS در فیبر نوری مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین با بررسی توزیع شدت تپ ورودی پمپ و تپ استوکس تولید شده و طرح تداخلی هر یک از آنها با موجی مرجع با جبهه موج کروی، نشان داده شد که مقدار OAM در حین تبدیل طول موج ناشی از فرایند SRS حفظ می‌شود. لذا می‌توان از اثر SRS به‌عنوان مبدل طول موج و تقویت کننده‌ی پهن‌باند تمام نوری امواج مدوله شده با درجه آزادی OAM در سیستم‌های مخابرات نوری بر پایه WDM استفاده نمود. علاوه‌براین، برقراری شرایط تطابق فاز جهت بهره‌مندی از اثر غیرخطی ترکیب چهار موج[۱۲] (FWM) و تبدیل طول موج امواج استوکس حاصل از SRS به امواج آنتی‌استوکس حامل OAM در محدوده بسامدی وسیع از اهداف پیش روی این مطالعه می‌باشد.

مراجع

[1] D. J. Richardson, Filling the Light Pipe, Science, Vol. 330, pp. 327-328, 2010.

[2] M. Padgett and L. Allen, Light with a twist in its tail, Contemporary Physics, V. 41, 2000.

[3] S. Li and J. Wang, A Compact Trench-Assisted Multi-Orbital-Angular-Momentum Multi-Ring Fiber for Ultrahigh-Density Space-Division Multiplexing (19 Rings322 Modes), Scientific Reports, V. 4, 3853, 2014.

[4] N. Bozinovic, & et. al., Terabit-Scale Orbital Angular Momentum Mode Division Multiplexing in Fibers, Science, V. 340, 2013.

[5] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 3rd ed., Academic Press, San Diego, 2001.

[6] B. Ramamurthy and B. Mukherjee, Wavelength Conversion in WDM Networking, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 16, 1061 (1998).

[12] Four Wave Mixing

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

[7] S. P. Singh, & et. al., Nonlinear Scattering Effects in Optical Fibers, Progress In Electromagnetics Research, PIER 74, 379–405, 2007.
[8] B. Saleh & M. Teich, *Fundamentals of photonics*, 2nd ed., Wiley, New York, 2007.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.