بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

بررسی پراکندگی رامان برانگیخته در لیزرهای تار نوری پیوسته با توان خروجی کیلووات

معین کردی بروجنی [۱] ، آذردخت مظاهری [۱]، محمود سلطان الکتابی [۲] و مهدی دهقان [۲]

[۱] دانشگاه صنعتی مالک اشتر

[۲] دانشگاه اصفهان

چکیده– در این مقاله، پراکندگی رامان برانگیخته در لیزرهای تار نوری با توان خروجی کیلووات مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا فرآیند رشد موج رامان و کاهش توان موج لیزر در کاواک لیزر تار نوری بررسی شده است. سپس توان آستانه رامان برانگیخته برای دمش از ابتدا و انتهای تار نوری تعیین شده است. همچنین برای نخستین بار نموداری ارائه شده است، تا آن جا که اطلاع داریم، که توان آستانه رامان را برای دمش لیزر تار نوری از دو جهت تعیین می‌کند.

کلید واژه- پراکندگی رامان برانگیخته، تار نوری دو غلافی، لیزر تار نوری

Investigation of Stimulated Raman Scattering in Continuous-Wave Fiber Lasers with Kilowatt Output

M. Kordi borujeni[1], A. Mazaheri[1], M. Soltanolkotabi[2] and M. Dehgan[2]

[1] Malek_e_Ashtar University of Technology

[2] University of Isfahan

Abstract- In this paper, stimulated Raman scattering (SRS) is investigated in Continuous-Wave (CW) fiber lasers that have kilowatt output. At first, Raman wave growth and laser wave depletion are investigated. After that, SRS power thresholds for forward and backward pumpings are determined. Also, we have presented a diagram that we can find threshold power for two-end pumping. As far as we know, this diagram is presented for the first time

Keywords: Double-clad fiber, Fiber laser, Stimulated Raman scattering.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]

۱-مقدمه

اگر لیزرهای تار نوری ایتربیم به روش دو غلافی و توسط ترکیبی از لیزرهای نیم رسانا با توان خروجی زیاد دمش شوند، می‌توانند خروجی پیوسته‌ای تا چند صدوات و یا حتی چند کیلووات، به صورت تک مد، داشته باشند[۱]. بیشترین توان خروجی که از یک لیزر تار نوری پیوسته به صورت تک مد به دست آمده، ۱۰ کیلووات بوده است[۲].

پراکندگی رامان برانگیخته و اثرات گرمایی اصلی‌ترین محدودیت‌های ساخت لیزرهای تارنوری با توان خروجی کیلووات است[۳]. برای توان‌های دمش بیشتر از توان آستانه رامان، قسمتی از توان موج لیزر به موج رامان انتقال می‌یابد. به این ترتیب، موج رامان به سرعت شروع به رشد می‌کند و بازده خروجی لیزر کاهش می‌یابد.

در این مقاله به بررسی پراکندگی رامان برانگیخته در لیزرهای تار نوری می‌پردازیم. رشد موج رامان و تاثیر آن بر روی خروجی موج لیزر بررسی می‌شود. توان آستانه پراکندگی رامان برای دمش از ابتدا و انتهای تار نوری تعیین می‌شود. همچنین توان آستانه رامان را برای دمش از دو جهت تار مشخص می‌گردد.

۲- الگو سازی لیزر و نتایج شبیه سازی

رفتار یک لیزر تار نوری دو غلافی ایتربیم با در نظر گرفتن پراکندگی رامان برانگیخته به وسیله معادلات نرخ جفت شده زیر، توضیح داده می‌شود [۳]:

$$\frac{N_2}{\tau}=\frac{\Gamma_P\lambda_P}{hcA}[\sigma_a(\lambda_P)N_1-\sigma_e(\lambda_P)N_2](P_P^+ + P_P^-)+ \frac{\Gamma_S\lambda_S}{hcA}[\sigma_a(\lambda_S)N_1-\sigma_e(\lambda_S)N_2](P_S^+ + P_S^-) \quad (۱)$$

$$\frac{dP_P^\pm}{dz}=\pm\Gamma_P[\sigma_e(\lambda_P)N_2-\sigma_a(\lambda_P)N_1]P_P^\pm \mp \alpha(\lambda_P)P_P^\pm \quad (۲)$$

$$\frac{dP_S^\pm}{dz}=\pm\Gamma_S[\sigma_e(\lambda_S)N_2-\sigma_a(\lambda_S)N_1]P_S^\pm \mp \alpha(\lambda_S)P_S^\pm \mp \frac{\lambda_R g_R}{\lambda_S A_{eff}}P_R^\pm P_S^\pm \quad (۳)$$

$$\frac{dP_R^\pm}{dz}=\pm\frac{g_R}{A_{eff}}P_S^\pm P_R^\pm \pm \alpha(\lambda_R)P_R^\pm \quad (۴)$$

شرایط مرزی موجود بر روی آینه‌ها ((توری‌های براگ)) نیز به صورت زیر است:

$$P_S^+(0)=R_{1S}P_S^-(0) \quad \text{و} \quad P_S^-(L)=R_{2S}P_S^+(L) \quad (۵)$$

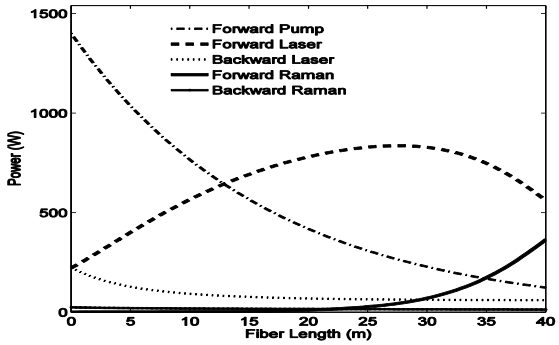
$$P_R^+(0)=R_{1R}P_R^-(0) \quad \text{و} \quad P_R^-(L)=R_{2R}P_R^+(L) \quad (۶)$$

نقاط $z=0$ و $z=L$ به ترتیب ابتدا و انتهای تار نوری هستند.

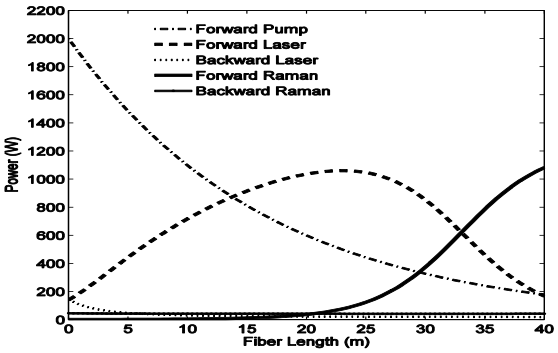
فرض می‌کنیم که طول تار نوری ایتربیوم L باشد و آلایندگی در آن به صورت یکنواخت توزیع شده است. در روابط بالا، $N=N_1+N_2$ مقدار چگالی یون ایتربیوم در هسته تار نوری، $N_2(z)$ چگالی جمعیت در تراز بالا لیزر، σ_{ap} و σ_{ep} به ترتیب سطح مقطع جذب و گسیل القایی در طول موج دمش، σ_{aS} و σ_{eS} به ترتیب سطح مقطع جذب و گسیل القایی در طول موج لیزر است. A سطح مقطع هسته تار نوری و A_{eff} سطح مقطع موثر هسته تار نوری می‌باشد. $P_p^\pm(z)$ توان موج دمش، $P_S^\pm(z)$ توان موج لیزر و $P_R^\pm(z)$ توان موج استوکس مرتبه اول رامان است ($\pm$ بیانگر جهت انتشار پیش‌رو و پس‌رو موج است). Γ_P و Γ_S، به ترتیب ضریب‌های هم‌پوشانی و ν_P و ν_S بسامدهای موج دمش و موج لیزر، h ثابت پلانک، c سرعت نور، τ زمان فروافت خود به‌خودی تراز لیزر، α_P و α_S و α_R به ترتیب ضریب جذب محیط میزبان برای موج‌های دمش، لیزر و رامان است. g_R نیز ضریب بهره پراکندگی رامان برانگیخته می‌باشد. R_1 ضریب بازتاب آینه ورودی (توری براگ ورودی) و R_2 ضریب بازتاب آینه خروجی (توری براگ خروجی) کاواک لیزر است.

با توجه به شریط مرزی و استفاده از روش تیراندازی معادلات جفت شده حل می‌شوند. در روش تیراندازی مقدار اولیه‌ای حدس زده می‌شود. با استفاده از این مقدار اولیه و با روش رونگ کوتا مرتبه چهارم معادلات جفت شده حل می‌شوند و جواب آخر به دست می‌آید. از سوی دیگر با استفاده از مقدار اولیه حدس زده شده و شرایط مرزی موجود، جواب آخر هم ارز دیگری به دست می‌آید. اگر اختلاف دو جواب آخر به دست آمده کمتر از خطای مورد نظر باشد، مقدار اولیه حدس زده شده و جواب آخر به دست آمده صحیح هستند. در غیر این صورت، مقدار اولیه باید تصحیح گردد. برای تصحیح مقدار اولیه از روشی که در مرجع [۴] آمده، استفاده شده است.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]



شکل۱ (ب): رشد موج رامان و کاهش موج لیزر برای دمش از ابتدای تار نوری با توان ورودی ۱۴۰۰ وات

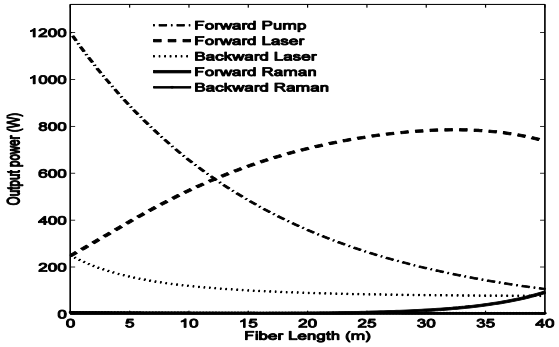


شکل۱ (د): رشد موج رامان و کاهش موج لیزر برای دمش از ابتدای تار نوری با توان ورودی ۲۰۰۰ وات

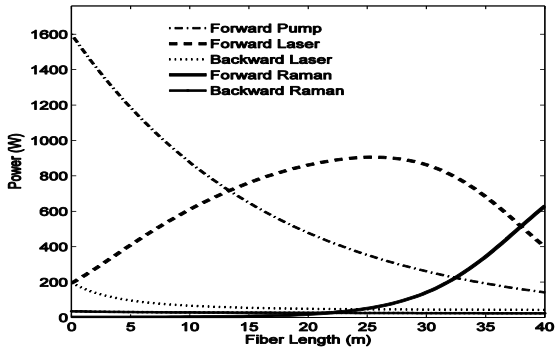
مشخصات لیزر تار نوری که شبیه سازی شده است به صورت زیر می‌باشد:

$L = ۴۰\,\mathrm{m}$ طول تار نوری آلاییده به ایتربیم می‌باشد، $\lambda_p = ۹۱۵\ \mathrm{nm}$ طول‌موج دمش شده، $\lambda_S = ۱۰۶۴\ \mathrm{nm}$ طول موج لیزر است. $R_{1p,2p} = ۴٪$ ، $R_{1S} = ۹۹/۳٪$، $R_{2S} = ۱۰/۳٪$، $R_{1R,2R} = ۴٪$، $\Gamma_p = ۰.۰۰۲۵$، $\Gamma_S = ۰/۸۲$، $\tau = ۱/۳\mathrm{ms}$، $D_c = ۲۰\ \mu m$ قطر هسته تار نوری دوغلافی است و همچنین $\alpha_p = ۰/۰۰۳\ m^{-1}$ و $\alpha_S = ۰/۰۰۵\ m^{-1}$ و $\alpha_R = ۰/۰۰۵\ m^{-1}$ می‌باشد. دیگر مشخصات تار در سایت اینترنتی نوفرن آمده است[۵].

نمودارهای شبیه‌سازی شده برای توان‌های بیشتر از توان آستانه پراکندگی رامان، برای دمش از ابتدای تار نوری در شکل ۱ به نمایش گذاشته شده است. این نمودارها فرآیند رشد موج رامان و کاهش توان موج لیزر را نشان می‌دهد. با افزایش توان دمش ورودی، نقطه آغازین رشد موج رامان از انتهای خروجی تار نوری به سمت ابتدای آن جابه‌جا می‌شود. رشد موج رامان درون کاواک لیزر خیلی



شکل۱ (الف): رشد موج رامان و کاهش موج لیزر برای دمش از ابتدای تار نوری با توان ورودی ۱۲۰۰ وات



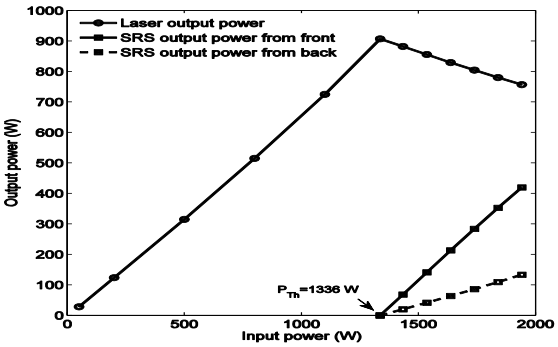
شکل۱ (ج): رشد موج رامان و کاهش موج لیزر برای دمش از ابتدای تار نوری با توان ورودی ۱۶۰۰ وات

سریع است. با این وجود برای توان‌های دمش خیلی بیشتر از توان آستانه رامان، هنگامی که تقریبا تمام توان از موج لیزر به موج رامان انتقال یافت، رشد موج رامان کم می‌شود و نقطه شروع آن جابه‌جایی زیادی نخواهد داشت. این مطلب در شکل‌های ۱ کاملا مشخص است.

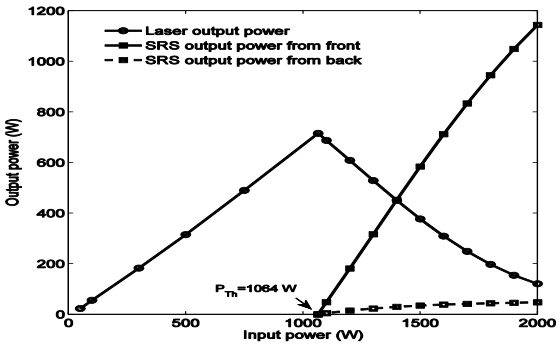
توان آستانه پراکندگی رامان برانگیخته معمولا بیشتر از توان آستانه پراکندگی بریلوئن برانگیخته است[۶]، اما با استفاده از روش‌هایی می‌توان توان آستانه بریلوئن را افزایش داد به گونه‌ای که حتی از توان آستانه رامان بیشتر گردد، برای مثال می‌توان پهنای طیفی لیزر را افزایش داد.

اگر نمودار توان خروجی موج لیزر و موج رامان بر حسب توان دمش ورودی آن رسم شود، می‌توان توان آستانه رامان را مشخص کرد(شکل ۲ و ۳). برای دمش از ابتدای تار نوری توان آستانه ۱۰۶۴ وات و برای دمش از انتهای تار ۱۳۳۶ وات است. پیش از اینکه اثر رامان رخ دهد، بازده لیزر تقریبا۶۰ درصد است. بنابراین توان بیشینه خروجی لیزر برای دمش ابتدا، ۶۳۸ وات و برای دمش از

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]



شکل۲: توان خروجی موج لیزر و موج رامان برحسب توان دمش



شکل۳: توان خروجی موج لیزر و رامان برحسب توان دمش ورودی

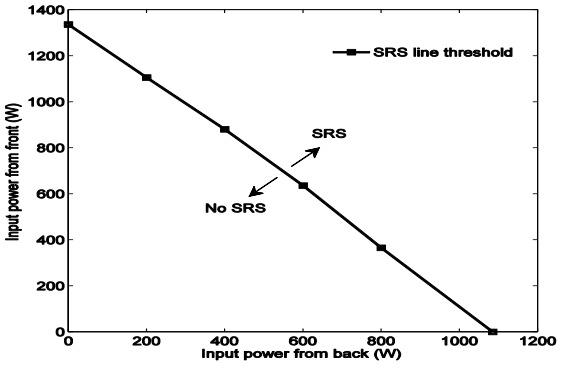
انتها ۸۰۰ وات است. اما برای توان‌های دمش بیش از توان آستانه پراکندگی رامان برانگیخته:

۱) برای دمش از ابتدا ، شیب خروجی موج لیزر ۰/۷۹- و شیب خروجی موج رامان برای ابتدا ۱/۳۴ و برای انتها ۰/۱۱ می‌باشد.

۲) برای دمش از انتهای تار، شیب خروجی موج لیزر ۰/۲۶- و شیب رشد خروجی موج رامان برای ابتدا ۰/۶۷ و برای انتها ۰/۲۳ می‌باشد.

اگر توان دمش ورودی خیلی بزرگتر از توان آستانه رامان باشد، شیب رشد خروجی موج رامان و کاهش موج لیزر دیگر خطی نخواهد بود. براساس نتایج شبیه‌سازی، رشد موج رامان و کاهش موج لیزر به صورت تابعی مرتبه دوم از توان دمش ورودی است، که با کاهش رشد موج رامان در شکل‌های۱(ج) و۱(د) رابطه مستقیم دارد.

اگر لیزر تار نوری از دو انتها دمش شود، توان آستانه رامان مقداری بین توان آستانه آن برای دمش از ابتدا و انتهای تار نوری است و با استفاده از شکل ۴ مشخص می‌شود. محور افقی این نمودار توان دمش شده از ابتدای تار و محور قائم آن توان دمش شده از انتهای تار است. منحنی رسم شده نیز توان آستانه رامان است. به این ترتیب نموداری به دست آمده، که در نقاط زیرین آن اثر رامان برانگیخته رخ نمی‌دهد و برای نقاط بالای آن، این اثر رخ خواهد داد. تا آنجا که اطلاع داریم، این نمودار برای نخستین بار ارائه شده است. نتایج شبیه سازی‌های این مقاله، از نظر کلی(ساختار نمودارها و مرتبه توان آستانه) با دیگر نتایج منتشر شده مطابقت دارد[۳].



شکل ۴: توان آستانه رامان برانگیخته برای دمش از دو جهت تار نوری

۳-نتیجه‌گیری

در این مقاله، به بررسی پراکندگی رامان برانگیخته در لیزرهای تار نوری با توان خروجی کیلووات پرداخته شد. فرآیند رشد موج رامان در کاواک لیزر و تاثیر آن بر خروجی موج لیزر بررسی گردید و توان‌های آستانه رامان برای دمش از ابتدا و انتهای تار نوری و همچنین برای دمش از دو جهت تعیین گردید.

مراجع

[1] Xiao, Y., et al. 1-kilowatt CW all-fiber laser oscillator pumped with wavelength-beam-combined diode stacks. **Optics Express** 20.3 (2012): 3296-3301.

[2] V, Gapontsev, F. A. Fomin & M. Abramov, Diffraction limited ultra-high-power fiber lasers. **Advanced Solid-State Photonics. Optical Society of America**, 2010.

[3] Wang, C. Xu, H. Po, *Analysis of Raman and thermal effects in kilowatt fiber laser*, **Optics communications**. 242(2004) 487-502

[4] Z. Lali-Dastjerdi, F. Kroushavi, M.H. Rahmani, *An efficient shooting method for fiber amplifiers and lasers*, **Optics and Laser Technology**, 40.8 (2008): 1041-1046.

[5] www.nufern.com

[6] G. P. Agrawal, *Nonlinear fiber optics*, 3rd edition

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]