بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ 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

شبیه‌سازی پراکندگی بریلوئن القایی در لیزر فیبری پرتوان دوغلافی آلائیده با ایتربیوم

مسلم جوادی منش، مهدی قائدرحمتی، جعفر بختیارشوهانی، جلال جلالی، مجتبی رحیمی و هادی نوذری

موسسه دکتر اردشیر حسین‌پور

چکیده - در این پژوهش با حل معادلات نرخ، اثر پراکندگی بریلوئن القایی (SBS) در لیزر فیبری پیوسته پرتوان دوغلافی آلائیده با ایتربیوم با پهنای طیفی باریک بررسی شده است. در این لیزرها اثر SBS بیشترین تاثیر را در کاهش توان خروجی دارد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کاهش طول‌موج دمش و بازتابندگی آینه ورودی و همچنین انتخاب دمش پسرو، موجب افزایش آستانه بریلوئن می گردد. آستانه بریلوئن وابستگی زیادی به طول فیبر، قطر هسته فیبر و پهنای باند فرکانسی سیگنال لیزری دارد.

کلید واژه- ایتربیوم، پراکندگی بریلوئن القایی، لیزر فیبری پرتوان.

Simulating the Stimulated Brillouin Scattering (SBS) in the Ytterbium-doped high power double-clad fiber laser

Moslem Javadimanesh, Mehdi Ghaedrahmati, Jafar Bakhtiyar Shohani, Jalal Jalali,Mojtaba Rahimi and Hadi Nozari

Institute of Dr. Ardeshir Hosseinpour

Abstract- In this work, stimulated Brillouin scattering (SBS) effect in narrow spectral width Ytterbium-doped high power double-clad CW fiber laser is investigated by solving the rate equations. In these lasers, SBS effect has the most influence on output power. Results of simulation indicate that decreasing the pump wavelength, reflectivity of input mirror and selection of backward pumping configuration leads to increasing Brillouin threshold which highly depends on fiber length, core diameter and laser bandwidth.

Keywords: Ytterbium, Stimulated Brillouin Scattering, High power fiber laser.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]

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

۱- مقدمه

طیف خروجی لیزرهای فیبری پیوسته پرتوان را می‌توان به دو دسته پهن و باریک تقسیم کرد. در لیزرهای فیبری با پهنای طیفی باریک، اثرات غیرخطی محدودیت مهمی است که باید در نظر گرفته شوند. مهمترین اثر غیرخطی در لیزرهای فیبری با پهنای طیفی باریک، پراکندگی بریلوئن القایی (SBS) است[۱, ۲]. SBS حاصل برهمکنش بین پرتو انتشار یافته شده در فیبر با فونون‌های صوتی درون ماده است. این فونون-های صوتی با انتشار در فیبر مانند یک توری پراش عمل کرده و پرتو فرودی را در جهت عکس بازتاب می‌کنند[۳]. در این مقاله با حل عددی معادلات دیفرانسیل جفت شده برای توان های دمش، سیگنال، بریلوئن و همچنین معادله وارونگی جمعیت، آستانه‌ی توان دمش لازم برای تولید SBS و تاثیر پارامترهای فیبر بر آن بررسی شده است.

۲- مدل تئوری

در فرایند پراکندگی بریلوئن خودبخودی، یک فوتون از تابش فرودی به یک فوتون پراکنده شده و یک فونون تبدیل می شود. تابش پراکنده شده فرکانسی کمتر از تابش فرودی دارد که موج استوکس نامیده می‌شود. وقتی توان دمش به مقدار مشخصی می‌رسد، بریلوئن شروع به تقویت یافتن می‌کند. سرانجام، تابش منتشر شده یک توری چگالی متحرک تولید کرده و تابش فرودی را در جهت عکس پراکنده می‌کند. معادلات نرخ لیزر فیبری پیوسته با در نظر گرفتن اثر SBS، به صورت زیر بیان می‌شوند[۳, ۴].

$$N_1(z)+N_2(z)=N \qquad (۱)$$

$$\frac{dP_p^{\pm}(z)}{dz}=\pm\Gamma_p.[(\sigma_a(\lambda_p)+\sigma_e(\lambda_p))N_2(z)-\sigma_a(\lambda_p)N].P_p^{\pm}(z) \mp \alpha_p P_p^{\pm}(z) \qquad (۲)$$

$$\frac{dP_s^{\pm}(z)}{dz}=\pm\Gamma_s.[(\sigma_a(\lambda_s)+\sigma_e(\lambda_s))N_2(z)-\sigma_a(\lambda_s)N].P_s^{\pm}(z) \mp \alpha_s P_s^{\pm}(z) \mp \frac{g_B}{A_{eff}} P_B^{\mp}(z)P_s^{\pm}(z) \qquad (۳)$$

$$\frac{dP_B^{\pm}(z)}{dz}=\mp\alpha_B P_B^{\pm}(z) \pm \frac{g_B}{A_{eff}} P_B^{\pm}(z)P_s^{\mp}(z) \qquad (۴)$$

$$\frac{N_2}{\tau}=\frac{\Gamma_p\lambda_p}{hcA}[\sigma_a(\lambda_p)N_1-\sigma_e(\lambda_p)N_2](P_p^{+}+P_p^{-})+\frac{\Gamma_s\lambda_s}{hcA}[\sigma_a(\lambda_s)N_1-\sigma_e(\lambda_s)N_2](P_s^{+}+P_s^{-}) \qquad (۵)$$

در اینجا $P_s^{\pm}$، $P_p^{\pm}$ و $P_B^{\pm}$ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی توان سیگنال، دمش و بریلوئن هستند. کمیت N غلظت یون‌های ایتربیوم و N_1 و N_2 به ترتیب چگالی جمعیت ترازهای پایه و برانگیخته را نشان می‌دهند. پارامتر α اتلاف زمینه در فیبر و σ_e و σ_a به ترتیب سطح مقطع‌های گسیل و جذب ایتربیوم هستند [۵]. λ_p و λ_s به ترتیب طول‌موج دمش وسیگنال هستند. τ طول عمر گسیل خودبخودی است. فرکانس بریلوئن به میزان ۱۶GHz کمتر از فرکانس سیگنال است. پارامتر A نیز مساحت آلائیده شده با ایتربیوم و Γ_p (Γ_s، Γ_B) ضریب همپوشانی بین دمش (سیگنال، بریلوئن) و ناحیه‌ی آلائیده شده است. A_{eff} مساحت مدی مؤثر وابسته به سیگنال و بریلوئن است که به قطر هسته و دهانه‌ی عددی فیبر وابسته است. پارامتر g_B بهره بریلوئن است که به پهنای باند فرکانسی سیگنال و بریلوئن بستگی دارد[۳]. شرایط مرزی مربوط به معادلات (۱) تا (۵) به صورت زیر است.

$$\begin{aligned}
&P_s^{+}(0)=R_{s0}P_S^{-}(0)\\
&P_s^{-}(L)=R_{sL}P_S^{+}(L)\\
&P_p^{+}(0)=P_{(0)}+R_{p0}P_p^{-}(0)\\
&P_p^{-}(L)=P_{(L)}+R_{pL}P_p^{+}(L)\\
&P_B^{+}(0)=R_{B0}P_B^{-}(0)\\
&P_B^{-}(L)=R_{BL}P_B^{+}(L)
\end{aligned} \qquad (۶)$$

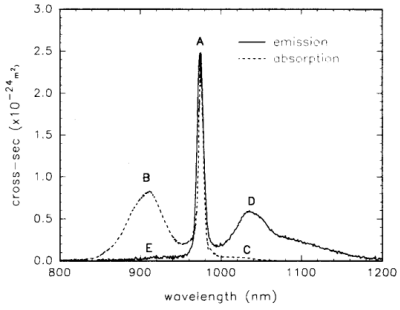
که در آن R_{p0} (R_{B0}، R_{s0}) و R_{pL} (R_{BL}، R_{sL}) به ترتیب برابر با ضریب بازتاب در طول‌موج دمش (سیگنال، استوکس) در ابتدا ($z=0$) و انتهای فیبر ($z=L$) هستند. معادلات (۱) تا (۵) با استفاده از شرایط مرزی (۶) و روش رانگ-کوتای مرتبه ۴ حل شده و توان خروجی لیزر پرتوان دوغلافی آلائیده با ایتربیوم محاسبه می‌شود. در ادامه توان دمش آستانه‌ی تولید SBS (SBST) را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۳- نتایج شبیه‌سازی و بحث

در شبیه‌سازی‌ها از پارامترهای $\lambda_p=975nm$، $\lambda_s=1082nm$، $N=6\times10^{25}m^{-3}$، $R_{s0}=R_{B0}=0.99$، $R_{sL}=R_{p0}=0.04$، $R_{pL}=R_{BL}=0.04$، $\sigma_{es}=4.2\times10^{-25}m^2$، $\sigma_{as}=3.1\times10^{-27}m^2$، $\sigma_{ep}=2\times10^{-24}m^2$، $\sigma_{ap}=2\times10^{-24}m^2$، $\tau=0.8ms$، $\alpha_s=5\times10^{-3}m^{-1}$، $\alpha_p=3\times10^{-3}m^{-1}$، $NA=0.05$، طول فیبر ۲۰m، قطر غلاف داخلی ۴۰۰μm و قطر هسته ۱۵μm استفاده شده است. همچنین سطح مقاطع جذب و گسیل در طول‌موج‌های مختلف در شکل (۱) نشان داده شده است [۵].

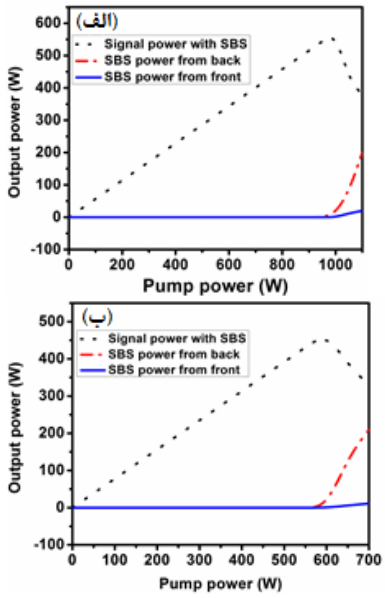
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]



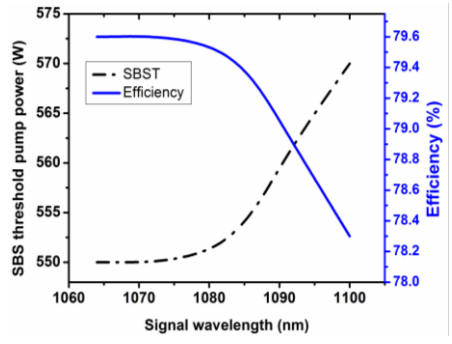
شکل۱: سطح مقاطع جذب و گسیل برای ایتربیوم [۵]

شکل (۲) تغییرات توان خروجی را برای دو طول‌موج دمش (الف) ۹۱۵nm و (ب) ۹۷۵nm نشان می‌دهد.



شکل۲: تغییرات توان خروجی برحسب توان دمش برای طول‌موج دمش (الف) ۹۱۵nm و (ب) ۹۷۵nm

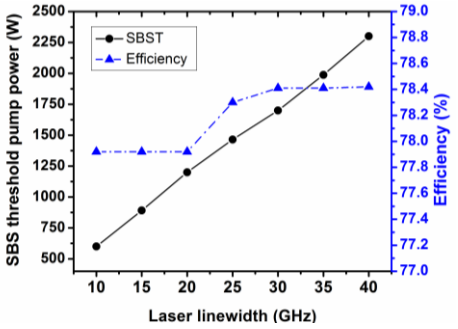
اگرچه کاهش طول‌موج دمش، موجب افزایش SBST شده است، اما بازده اپتیکی را به دلیل کاهش سطح مقطع جذب دمش، ۲۰٪ کاهش می‌دهد. تغییرات SBST و بازده لیزر نسبت به طول‌موج سیگنال خروجی در شکل (۳) نشان داده شده است. مقادیر سطح مقاطع جذب و گسیل در طول‌موج‌های مختلف از نمودار تجربی شکل (۱) استفاده شده است.



شکل۳: تغییرات SBST و بازده برحسب طول‌موج سیگنال خروجی

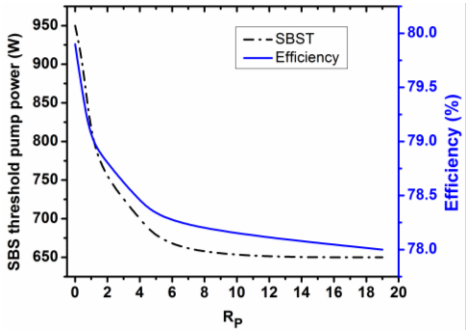
با افزایش طول‌موج سیگنال خروجی از ۱۰۶۴nm تا ۱۱۰۰nm، که متناظر است با تغییر طول‌موج استوکس از ۱۰۶۴/۰۶nm تا ۱۱۰۰/۰۶nm، SBST فقط ۲۰W افزایش یافته و از طرفی بازده لیزر تقریبا ۱٪ کاهش می‌یابد.

بنابراین طول‌موج سیگنال تاثیر زیادی در کاهش آستانه SBS ندارد. پهنای باند فرکانسی سیگنال لیزری تاثیر زیادی بر بهره SBS دارد، بنابراین می‌تواند SBST را به شکل قابل توجهی تغییر دهد. این تغییرات در شکل (۴) دیده می‌شود.



شکل۴: تغییرات SBST بازده لیزر نسبت به پهنای باند فرکانسی سیگنال لیزری

با افزایش پهنای باند فرکانسی سیگنال از ۱۰GHz به ۴۰GHz، طبق جمله‌ی آخر رابطه ۴، SBST به صورت خطی از ۶۰۰W به ۲۲۵۰W افزایش می‌یابد. همچنین می‌توان گفت بازده لیزر تقریبا ثابت و برابر با ۷۸٪ است. به منظور بررسی تاثیر نحوه‌ی دمش بر SBST، پارامتر R_p را به صورت نسبت توان دمش پیشرو (z=0) به توان دمش پسرو (z=L) تعریف می‌کنیم. نمودار تغییرات SBST و بازده لیزر بر حسب Rp در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل۵: تغییرات SBST بازده لیزر برحسب نسبت توان دمش پیشرو (z=0) به توان دمش پسرو (R_p) (z=L)

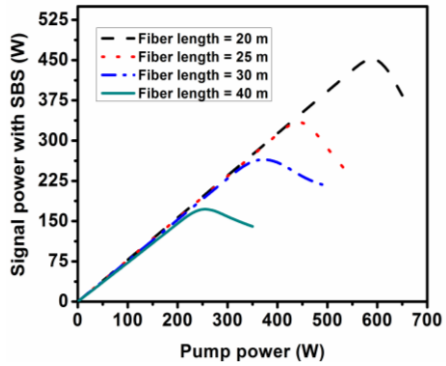
با افزایش R_p، توان آستانه SBS و بازده لیزر کاهش می‌یابند، تا جایی که تقریبا ثابت می‌شوند. در R_p=0، جایی که تمام توان دمش از Z=L وارد فیبر می‌شود، SBST و بازده لیزر به بیشینه‌ی مقدار خود می‌رسند. بنابراین دمش پسرو فیبر با

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

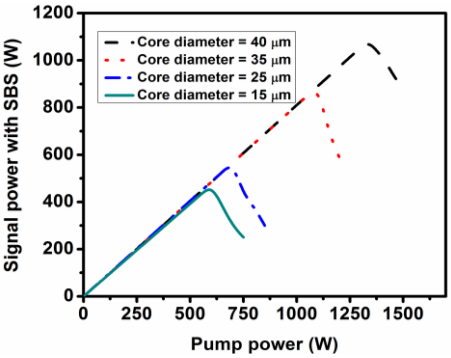
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]

بیشینه بازده، حدود ۳۰۰W توان آستانه تولید SBS را افزایش می‌دهد.

تغییرات SBST نسبت به طول و قطر هسته فیبر در شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده شده است.



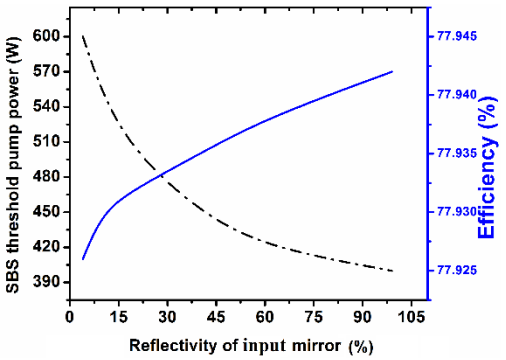
شکل۶: تغییرات توان سیگنال در حضور SBS به ازای طول‌های مختلف فیبر



شکل۷: تغییرات توان سیگنال در حضور SBS به ازای قطرهای مختلف هسته فیبر

کاهش طول فیبر از ۴۰m به ۲۰m باعث افزایش SBST از ۲۵۰W به ۶۰۰W می‌شود. همچنین افزایش قطر هسته فیبر از ۱۵μm به ۴۰μm باعث افزایش SBST از ۶۲۰W به ۱۳۷۰W خواهد شد. در شکل‌های (۶) و (۷) بازده اپتیکی لیزر تقریبا ثابت و برابر با ۷۷٪ است.

تغییرات SBST و بازده لیزر نسبت به بازتابندگی آینه ورودی لیزر، در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل۸: تغییرات SBST و بازده لیزر نسبت به بازتابندگی آینه ورودی لیزر

طول‌موج استوکس ۰/۰۶nmکمتر از طول‌موج سیگنال است. اگر آینه ورودی لیزر توری براگ فیبری با پهنای باند طیفی ۰/۱nm باشد، بازتابندگی آینه ورودی برای طول‌موج سیگنال و استوکس ۹۹٪ است. در این حالت مطابق با شکل (۸)، SBST حدودا ۴۰۰W است. بنابراین SBST با افزایش بازتابندگی آینه ورودی لیزر در طول‌موج استوکس از ۴٪ به ۹۹٪ حدود ۲۰۰W کاهش می‌یابد. از طرفی بازده لیزر در بازتابندگی‌های مختلف تقریبا ثابت و برابر با ۷۸٪ است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با حل عددی معادلات نرخ لیزر فیبری پیوسته در حضور SBS، تاثیر پارامترهای مختلف فیبر و منبع دمش بر توان دمش آستانه تولید SBS بررسی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که کاهش طول‌موج دمش، باعث افزایش SBST و از طرفی کاهش بازده اپتیکی لیزر می‌شود. همچنین دمش پسرو و کاهش بازتابندگی آینه ورودی لیزر موجب افزایش SBST می‌شود. در ادامه این نتیجه حاصل شد که SBST وابستگی شدیدی به پهنای باند فرکانسی سیگنال لیزری دارد و با افزایش آن، SBST به صورت خطی با بازده تقریبا ثابت افزایش می‌یابد. افزایش طول‌موج سیگنال تاثیر کمی در افزایش SBST دارد. همچنین نشان داده شد که کاهش طول فیبر و افزایش قطر هسته‌ی فیبر، توان دمش آستانه SBS را به شکل چشمگیری افزایش می‌دهد.

مراجع

[۱] J. W. Dawson, M. J. Messerly, R. J. Beach, M. Y. Shverdin, E. A. Stappaerts, A. K. Sridharan, *et al.*, "Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power," *Optics express*, vol. 16, pp. 13240-13266, 2008.

[۲] J. Zhu, P. Zhou, Y. Ma, X. Xu, and Z. Liu, "Power scaling analysis of tandem-pumped Yb-doped fiber lasers and amplifiers," *Optics express*, vol. 19, pp. 18645-18654, 2011.

[۳] G. Liu and D. Liu, "Numerical analysis of stimulated Brillouin scattering in high-power double-clad fiber lasers," *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 120, pp. 24-28, 2009.

[۴] M. Hekmat, M. Dashtabi, S. Manavi, E. Hassanpour, and R. Massudi, "Study of the stimulated Brillouin scattering power threshold in high power double-clad fiber lasers," *Laser Physics*, vol. 23, p. 025104, 2012.

[۵] H. Pask, R. J. Carman, D. C. Hanna, A. C. Tropper, C. J. Mackechnie, P. R. Barber, *et al.*, "Ytterbium-doped silica fiber lasers: versatile sources for the 1-1.2 μm region," *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, vol. 1, pp. 2-13, 1995.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]