



## شبیه‌سازی پراکندگی بریلوئن القایی در لیزر فیبری پرتوان دوغلافی آلاییده با ایتربیوم

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

موسسه دکتر اردشیر حسین‌پور

چکیده - در این پژوهش با حل معادلات نرخ، اثر پراکندگی بریلوئن القایی (SBS) در لیزر فیبری پیوسته پرتوان دوغلافی آلاییده 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 طول موج دمش و بازتابندگی آینه ورودی و همچنین انتخاب دمش پسرو، موجب افزایش آستانه بریلوئن می‌گردد. 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. Ardeshtir 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.

## ۱- مقدمه

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

$$\begin{aligned} P_s^+(0) &= R_{s0} P_s^-(0) \\ P_s^-(L) &= R_{sL} P_s^+(L) \end{aligned} \quad (6)$$

$$P_p^+(0) = P_{(0)} + R_{p0} P_p^-(0)$$

$$P_p^-(L) = P_{(L)} + R_{pL} P_p^+(L)$$

$$P_B^+(0) = R_{B0} P_B^-(0)$$

$$P_B^-(L) = R_{BL} P_B^+(L)$$

که در آن  $(R_{B0}, R_{s0})$  و  $(R_{BL}, R_{sL})$  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 آلاییده 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  $\lambda_p = 975nm$ ،  $\lambda_s = 1082nm$ ،  $R_{sL} = R_{p0} = 0.04$ ،  $R_{s0} = R_{B0} = 0.99$ ،  $N = 6 \times 10^{25} m^{-3}$ ،  $\sigma_{as} = 3.1 \times 10^{-27} m^2$ ،  $\sigma_{es} = 4.2 \times 10^{-25} m^2$ ،  $R_{pL} = R_{BL} = 0.04$ ،  $\alpha_s = 5 \times 10^{-3} m^{-1}$ ،  $\tau = 0.8ms$ ،  $\sigma_{op} = 2 \times 10^{-24} m^2$ ،  $\sigma_{ep} = 2 \times 10^{-24} m^2$ ،  $\alpha_p = 3 \times 10^{-3} m^{-1}$ ،  $NA = 0.05$ ، طول فیبر ۲۰m، قطر غلاف داخلی ۴۰۰μm و قطر هسته ۱۵۰μm استفاده شده است. همچنین سطح مقاطع جذب و گسیل در طول‌موج‌های مختلف در شکل (۱) نشان داده شده است [۵].

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 بریلون القایی (SBS) است [۱، ۲]. SBS حاصل برهمکنش بین پرتو انتشار یافته شده در فیبر با فونون‌های صوتی درون ماده است. این فونون‌های 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، بریلون 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 بریلون خودبخودی، یک فوتون از تابش فرودی به یک فوتون پراکنده شده و یک فونون تبدیل می‌شود. تابش پراکنده شده فرکانسی کمتر از تابش فرودی دارد که موج استوکس نامیده می‌شود. وقتی توان دمش به مقدار مشخصی می‌رسد، بریلون 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].

$$N_1(z) + N_2(z) = N \quad (1)$$

$$\frac{dP_p^\pm(z)}{dz} = \pm \Gamma_p \cdot [(\sigma_a(\lambda_p) + \sigma_e(\lambda_p))N_2(z) - \sigma_a(\lambda_p)N] \cdot P_p^\pm(z) \mp \alpha_p P_p^\pm(z) \quad (2)$$

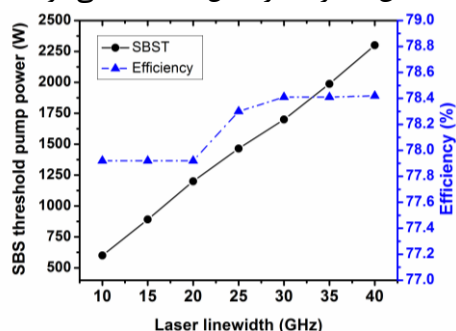
$$\begin{aligned} \frac{dP_s^\pm(z)}{dz} &= \pm \Gamma_s \cdot [(\sigma_a(\lambda_s) + \sigma_e(\lambda_s))N_2(z) - \sigma_a(\lambda_s)N] \cdot P_s^\pm(z) \\ &\mp \alpha_s P_s^\pm(z) \mp \frac{g_B}{A_{eff}} P_B^\mp(z) P_s^\pm(z) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{dP_B^\pm(z)}{dz} = \mp \alpha_B P_B^\pm(z) \pm \frac{g_B}{A_{eff}} P_B^\pm(z) P_s^\mp(z) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{N_2}{\tau} &= \frac{\Gamma_p \lambda_p}{h c A} [\sigma_a(\lambda_p)N_1 - \sigma_e(\lambda_p)N_2] (P_p^+ + P_p^-) + \\ &\frac{\Gamma_s \lambda_s}{h c A} [\sigma_a(\lambda_s)N_1 - \sigma_e(\lambda_s)N_2] (P_s^+ + P_s^-) \end{aligned} \quad (5)$$

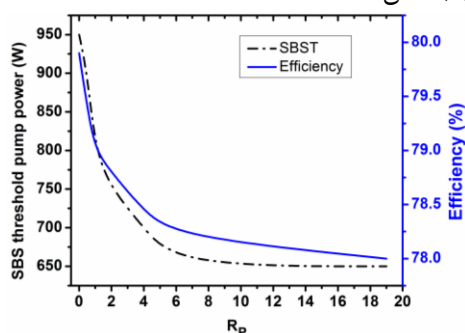
با افزایش طول موج سیگنال خروجی از ۱۰۶۴nm تا ۱۱۰۰nm، که متناظر است با تغییر طول موج استوکس از ۱۰۶۴/۰۶nm تا ۱۱۰۰/۰۶nm، فقط ۲۰W افزایش یافته و از طرفی بازده لیزر تقریباً ۱٪ کاهش می‌یابد.

بنابراین طول موج 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.



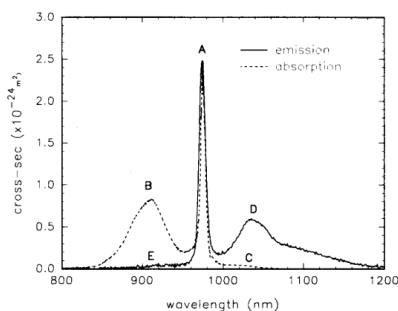
شکل ۴: تغییرات بازده لیزر نسبت به پهنای باند فرکانسی سیگنال لیزری

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 تقریباً 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  $R_p$  در شکل (۵) نشان داده شده است.



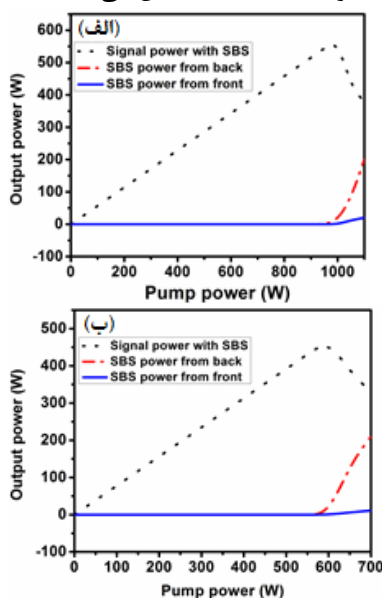
شکل ۵: تغییرات SBST بازده لیزر بر حسب نسبت توان دمش پیشرو ( $z=0$ ) به توان دمش پسرو ( $z=L$ ) ( $R_p$ )

با افزایش  $R_p$ ، توان آستانه SBS و بازده لیزر کاهش می‌یابند، تا جایی که تقریباً 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



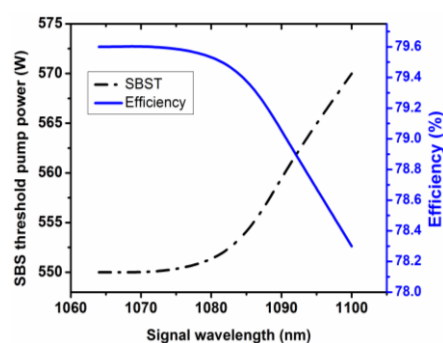
شکل ۱: سطح مقاطع جذب و گسیل برای ایتربیوم [۵]

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



شکل ۲: تغییرات توان خروجی بر حسب توان دمش برای طول موج دمش (الف) ۹۱۵nm و (ب) ۹۷۵nm

اگرچه کاهش طول موج 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 طول موج سیگنال خروجی در شکل (۳) نشان داده شده است. مقادیر سطح مقاطع جذب و گسیل در طول موج‌های مختلف از نمودار تجربی شکل (۱) استفاده شده است.



شکل ۳: تغییرات SBST و بازده بر حسب طول موج سیگنال خروجی

طول موج استوکس  $0.6\text{nm}$  کمتر از طول موج سیگنال است. اگر آینه ورودی لیزر توری براگ فیبری با پهنای باند طیفی  $0.1\text{nm}$  باشد، بازتابندگی آینه ورودی برای طول موج سیگنال و استوکس  $99\%$  است. در این حالت مطابق با شکل (۸)، SBST حدودا  $400\text{W}$  است. بنابراین SBST با افزایش بازتابندگی آینه ورودی لیزر در طول موج استوکس از  $4\%$  به  $99\%$  حدود  $200\text{W}$  کاهش می‌یابد. از طرفی بازده لیزر در بازتابندگی‌های مختلف تقریبا ثابت و برابر با  $78\%$  است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

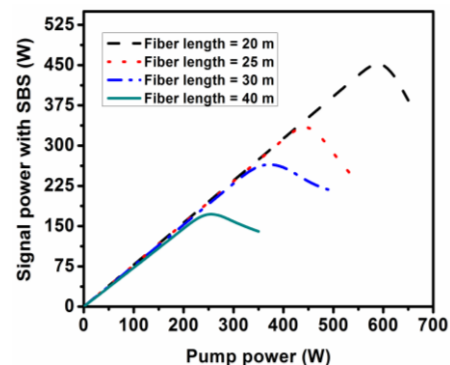
در این پژوهش با حل عددی معادلات نرخ لیزر فیبری پیوسته در حضور SBS، تاثیر پارامترهای مختلف فیبر و منبع دمش بر توان دمش آستانه تولید SBS بررسی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که کاهش طول موج دمش، باعث افزایش SBST و از طرفی کاهش بازده اپتیکی لیزر می‌شود. همچنین دمش پسرو و کاهش بازتابندگی آینه ورودی لیزر موجب 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 طول موج 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

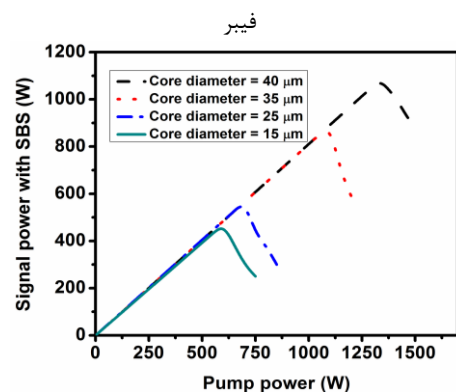
- [۱] J. W. Dawson, M. J. Messerly, R. J. Beach, M. Y. Shverdin, E. A. Stappaerts, A. K. Sridharan, *et al.*, "Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power," *Optics express*, vol. 16, pp. 13240-13266, 2008.
- [۲] J. Zhu, P. Zhou, Y. Ma, X. Xu, 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  $\mu\text{m}$  region," *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, vol. 1, pp. 2-13, 1995.

بیشینه بازده، حدود  $300\text{W}$  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.



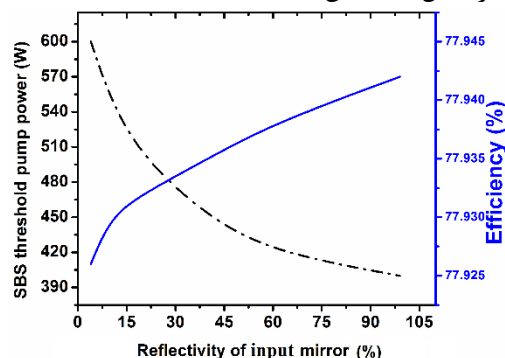
شکل ۶: تغییرات توان سیگنال در حضور SBS به ازای طول‌های مختلف



شکل ۷: تغییرات توان سیگنال در حضور SBS به ازای قطرهای مختلف هسته فیبر

کاهش طول فیبر از  $40\text{m}$  به  $20\text{m}$  باعث افزایش SBST از  $250\text{W}$  به  $600\text{W}$  می‌شود. همچنین افزایش قطر هسته فیبر از  $15\mu\text{m}$  به  $40\mu\text{m}$  باعث افزایش SBST از  $620\text{W}$  به  $1370\text{W}$  خواهد شد. در شکل‌های (۶) و (۷) بازده اپتیکی لیزر تقریبا ثابت و برابر با  $77\%$  است.

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



شکل ۸: تغییرات SBST و بازده لیزر نسبت به بازتابندگی آینه ورودی

لیزر