



لیزر  
پژوهشی  
دانشگاه صنعتی شیراز

بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران  
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران  
۸ تا ۱۰ بهمن ماه ۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز



## شبیه سازی لیزر تار نوری دو غلافی ایتریبیم با توان خروجی زیاد

معین کردی بروجنی<sup>۱</sup>، آذردخت مظاہری<sup>۱</sup>، محمود سلطان الکتابی<sup>۲</sup> و مهدی دهقان<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشگاه صنعتی مالک اشتر

<sup>۲</sup>دانشگاه اصفهان

چکیده- یک لیزر تار نوری با طول موج دمدم ۹۱۵ نانومتر و طول موج خروجی ۱۰۶۴ نانومتر شبیه سازی شده است. طول بهینه تار نوری ۴۰ متر، بازده لیزر برای دمدم از ابتدای تار ۶۰ درصد و برای دمدم از انتهای ۶۲/۴ درصد است. همچنین، توان آستانه پراکندگی بریلوئن برانگیخته برای دمدم از ابتدا و انتهای تار نوری و تاثیری که رشد موج بریلوئن بر موج لیزر دارد، تعیین شده است. توان آستانه بریلوئن برای دمدم از ابتدا ۸۶۶/۸ وات و برای دمدم از انتهای ۱۰۸۹ وات است. در آخر نیز وابستگی توان آستانه بریلوئن به پهنهای خط لیزر مشخص شده است.

کلید واژه- پراکندگی بریلوئن برانگیخته، تار نوری دو غلافی، لیزر تار نوری ایتریبیم

## Simulation of high-power Ytterbium double-clad fiber laser

M. Kordi borujeni<sup>1</sup>, A. Mazaheri<sup>1</sup>, M. Soltanolkotabi<sup>2</sup> and M. Dehgan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Malek\_e\_Ashtar University of Technology

<sup>2</sup> University of Isfahan

Abstract- A high power Ytterbium-doped fiber laser is simulated in this paper. Its pump and output wavelength is 915nm and 1064nm, correspondingly. The output power characteristics of the linear cavity fiber laser have been studied theoretically by solving the rate equations. The optimum length of the fiber and laser efficiency for forward and backward pumpings are obtained 40m, 60% and 62.4%, correspondingly. Also, the threshold powers of stimulated Brillouin scattering are determined for forward pumping, 866.8 W, and backward pumping, 1089 W. Finally, dependence of Brillouin threshold power to laser linewidth is determined.

Keywords: Double-clad fiber, Stimulated Brillouin scattering, Ytterbium fiber laser

$$\frac{dP_S^\pm}{dz} = \pm \Gamma_s [\sigma_e(\lambda_s)N_2 - \sigma_a(\lambda_s)N_1]P_S^\pm \mp \alpha(\lambda_s)P_S^\pm \mp \frac{g_B}{A_{eff}} P_B^\mp P_S^\pm \quad (3)$$

$$\frac{dP_B^\pm}{dz} = \pm \frac{g_B}{A_{eff}} P_S^\mp P_B^\pm \mp \alpha(\lambda_p)P_B^\pm \quad (4)$$

در روابط بالا،  $N = N_1 + N_2$  مقدار چگالی یون ایترబیوم در هسته تارنوری،  $(z)$   $N_2$  چگالی جمعیت در تراز بالا لیزر،  $\sigma_{ap}$  و  $\sigma_{ep}$  به ترتیب سطح مقطع جذب و گسیل القایی در طول موج دمش،  $\sigma_{as}$  و  $\sigma_{es}$  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 تارنوری می‌باشد.  $(z) P_p^\pm$  توان موج دمش،  $(z) P_S^\pm$  توان موج لیزر و  $(z) P_B^\pm$  توان موج استوکس مرتبه اول بریلوئن است ( $\pm$  بیانگر جهت انتشار پیش رو و پس رو موج است).  $\Gamma_p$  و  $\Gamma_s$ ، به ترتیب ضریب‌های همپوشانی  $\nu_p$  و  $\nu_s$  بسامدهای موج دمش و موج لیزر،  $h$  ثابت پلانک،  $c$  سرعت نور،  $\tau$  زمان فروافت خود به‌خودی تراز لیزر،  $\alpha_p$  و  $\alpha_s$  و  $\alpha_B$  به ترتیب ضریب جذب محیط میزان برای موج‌های دمش، لیزر و بریلوئن است.  $g_B$  نیز ضریب بهره پراکندگی بریلوئن می‌باشد و به صورت زیر است:

$$g_B = g_0 \frac{\Delta \nu_B}{\Delta \nu_B + \Delta \nu_s} \quad (5)$$

که در آن  $\Delta \nu_B$  و  $\Delta \nu_s$  به ترتیب پهنای خط موج بریلوئن و لیزر و  $g_0$  نیز ثابت ذاتی بهره بریلوئن است.

برای حل معادلات نرخ جفت شده باید از شرایط مرزی موجود برای بازتاب موج‌های لیزر و بریلوئن استفاده نمود. شرایط مرزی در نقاط  $z=0$  و  $z=L$  به صورت زیر هستند:

$$P_S^+(0) = R_{1S} P_S^-(0) \quad P_S^-(L) = R_{2S} P_S^+(L) \quad (6)$$

$$P_B^+(0) = R_{1B} P_B^-(0) \quad P_B^-(L) = R_{2B} P_B^+(L) \quad (7)$$

با توجه به شرایط مرزی و استفاده از روش تیراندازی معادلات جفت شده حل می‌شوند. برای تصحیح مقدار اولیه از روشی که در مرجع [۳] آمده، استفاده شده است. مشخصات لیزر تارنوری به صورت زیر می‌باشد:

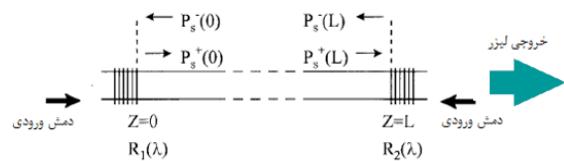
## مقدمه

امروزه، لیزرهای تار نوری دو غلافی آلاجیده شده به ایترబیوم به دلیل بازده بالا، کم حجم بودن، کیفیت پرتو مناسب و امکان کنترل خوب گرما توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۱]. با استفاده از لیزرهای نیم رسانای مناسب برای دمش، می‌توان به توان خروجی پیوسته چند صد واتی در این لیزرهای دست یافت [۲]. گرچه، پایداری خروجی لیزرهای تار نوری می‌تواند به وسیله اثرات غیرخطی محدود گردد. در این میان پراکندگی بریلوئن برانگیخته که آستانه پایین‌تری در لیزرهای پیوسته تار نوری دارد، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است.

در این مقاله، ابتدا یک لیزر تار نوری را با حل معادلات نرخ جفت شده آن، شبیه سازی می‌کنیم و طول بهینه تار نوری، بازده و توان آستانه لیزر را به دست می‌آوریم. سپس، پراکندگی بریلوئن برانگیخته را در نظر گرفته و توان آستانه پراکندگی را برای دمش از ابتدا و انتهای تار تعیین می‌کنیم.

## الگوسازی و نتایج شبیه‌سازی

ساختار یک کاواک لیزر تار نوری پیوسته که از دو جهت دمش می‌شود، به صورت زیر است. طول تار نوری ایترబیوم  $L$ ، ضریب بازتاب توری برآگ ورودی  $R_1$  و ضریب بازتاب توری برآگ خروجی  $R_2$  است.

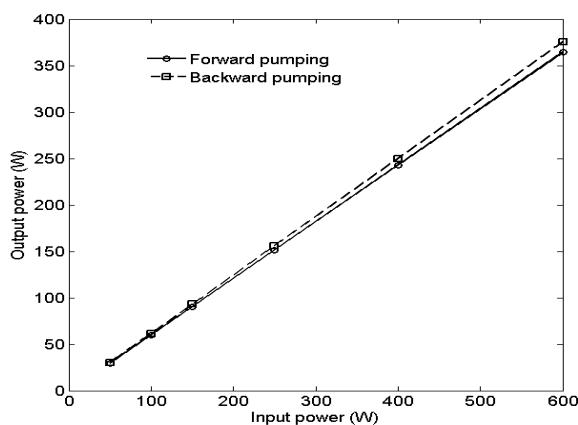


شکل ۱: ساختار دمش از دو جهت یک لیزر تار نوری

معادلات نرخ جفت شده حالت پایا به همراه پراکندگی بریلوئن برای لیزرهای تار نوری پیوسته به صورت زیر است:

$$\frac{N_2}{\tau} = \frac{\Gamma_p \lambda_p}{hcA} [\sigma_a(\lambda_p)N_1 - \sigma_e(\lambda_p)N_2](P_p^+ + P_p^-) + \frac{\Gamma_s \lambda_s}{hcA} [\sigma_a(\lambda_s)N_1 - \sigma_e(\lambda_s)N_2](P_S^+ + P_S^-) \quad (1)$$

$$\frac{dP_p^\pm}{dz} = \pm \Gamma_p [\sigma_e(\lambda_p)N_2 - \sigma_a(\lambda_p)N_1]P_p^\pm \mp \alpha(\lambda_p)P_p^\pm \quad (2)$$



شکل ۴: توان خروجی لیزر بر حسب توان دمش ورودی برابر است (شکل ۳).

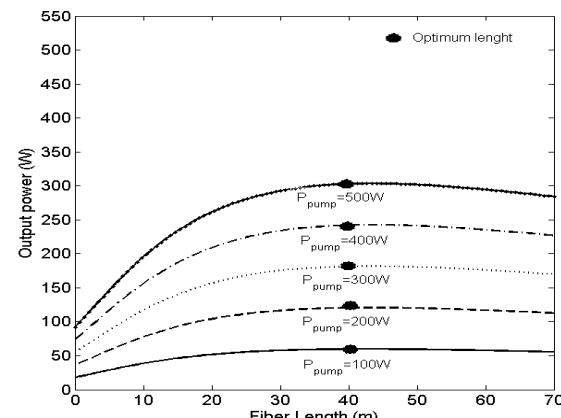
بازده لیزر تار نوری به طول ۴۰ متر با رسم نمودار توان خروجی لیزر بر حسب توان دمش آن به دست می‌آید (شکل ۴). بازده لیزر برای دمsh از ابتدای تار نوری ۶۰ درصد و برای دمsh از انتهای تار نوری  $62/4$  درصد است. دلیل اختلاف بازده لیزر، متفاوت بودن رشد موج لیزر برای دمsh از ابتدای تار نوری و برای دمsh از انتهای تار نوری است [۶]. بنابراین موج لیزر برای دمsh از ابتدای تار نوری بزرگتر است. بازده لیزر خارج شود و اتفاق بیشتری خواهد داشت.

آستانه لیزر کمتر از یک وات می‌باشد. بازده زیاد و توان آستانه کوچک لیزر، از ویژگی‌های لیزرهای تار نوری است. شبیه‌سازی‌های دیگر نیز بر نتایج به دست آمده، تاکید دارند [۶].

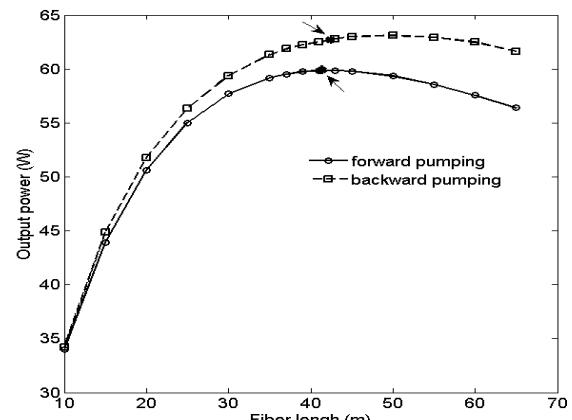
اگر توان دmsh را افزایش دهیم تا از توان آستانه موج بریلوئن بیشتر شود، موج بریلوئن شروع به رشد می‌نماید (شکل ۵ (الف) و ۵ (ب)). با رشد موج بریلوئن بازده خروجی لیزر کاهش می‌یابد. برای دmsh از ابتدای تار، شیب موج لیزر از  $0/065$  به  $0/060$  و برای دmsh از انتهای، شیب موج لیزر از  $0/0624$  به  $0/0386$  کاهش یافته است. از طرفی موج بریلوئن، برای دmsh از ابتدای تار با شیب  $0/05$  و برای دmsh از انتهای تار با شیب  $0/022$  رشد می‌کند. علاوه بر اینکه رشد موج بریلوئن سبب کاهش بازده خروجی لیزر می‌شود، باعث ایجاد خود تپی در داخل تار نوری و آسیب به تار نیز می‌گردد [۷]. در این لیزر تار

طول موج دmsh،  $\lambda_p = 915\text{nm}$  طول لیزر،  $R_{1S,1B} = 99/3$  درصد،  $R_{1p,2p} = 4$  درصد،  $\Gamma_S = 0/082$ ،  $\Gamma_p = 0/0025$  درصد،  $D_c = 20 \mu\text{m}$ ،  $\tau = 1/3 \text{ ms}$  قطر هسته تار نوری،  $\alpha_p = 0/003$ ،  $\Delta\nu_B = 50 \text{ MHz}$ ،  $\Delta\nu_S = 55 \text{ GHz}$  و  $\alpha_B = \alpha_S = 0/005 \text{ m}^{-1}$  است. دیگر مشخصات تار نوری در سایت اینترنتی نوفرن آمده است [۴].

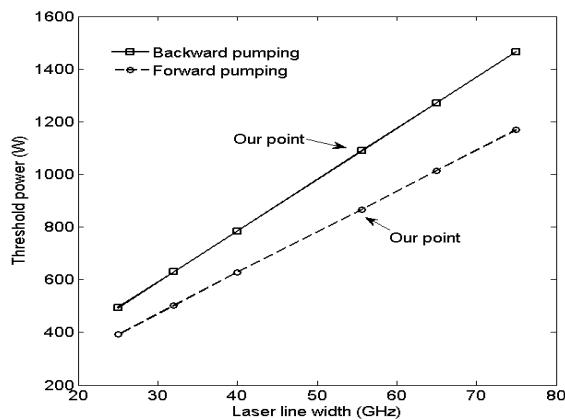
برای توانهای دmsh کوچک (در حدود چند ده وات) طول بهینه لیزر تار نوری به توان دmsh لیزر بستگی دارد. اما اگر توان دmsh در حدود چند صد وات باشد، طول بهینه لیزر به توان دmsh وابسته نخواهد بود [۵]. شکل زیر توان خروجی لیزر را بر حسب طول آنها، برای چند توان دmsh مختلف نشان می‌دهد:



شکل ۲: توان خروجی لیزر بر حسب طول تار نوری برای چند توان دmsh مختلف



شکل ۳: توان خروجی لیزر برای دmsh از ابتدای و انتهای با توان ۱۰۰ وات با توجه به شکل ۲، طول بهینه تار نوری ۴۰ متر می‌باشد و برای توانهای دmsh مختلف یکسان است. از طرف دیگر، طول بهینه برای دmsh از ابتدای و انتهای تار نوری تقریباً



شکل ۶: توان آستانه بریلوئن بر حسب پهنای طیفی لیزر

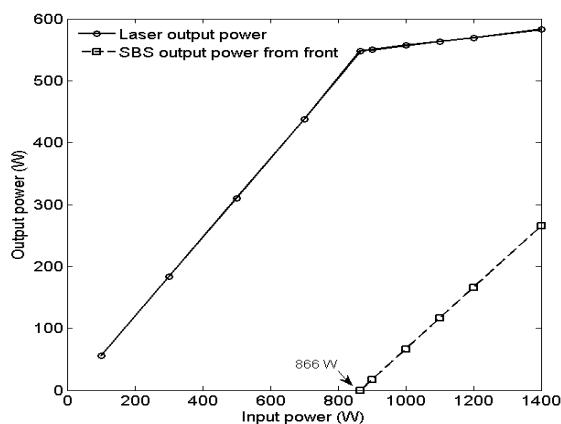
شبیه سازی ها مطابقت می کند [۹ و ۸].

### نتیجه گیری

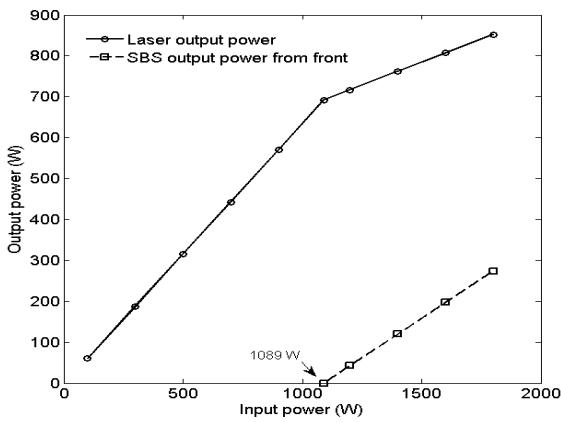
با حل معادلات نرخ جفت شده حالت پایا، یک لیزر تار نوری با طول موج دمش ۹۱۵ نانومتر و طول موج خروجی ۱۰۶۴ نانومتر شبیه سازی گردید. در ابتدا با توجه به مشخصات لیزر، طول بهینه تار و بازده لیزر به دست آمد. پس از آن توان های آستانه پراکندگی بریلوئن برانگیخته و تاثیر آن بر خروجی لیزر برای دمش از ابتدا و انتهای تار مشخص گردید. در آخر نیز وابستگی توان آستانه بریلوئن به پهنای خط لیزر مشخص شد.

### مراجع

- [1] Injeyan, H. and G. Goodno, *High power laser handbook*: McGraw Hill Professional
- [2] Jeong, Y.e., et al., *Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power*. **Optics Express**, 2004. 12(25): p. 6088-6092
- [3] Lali-Dastjerdi, Z., F. Kroushavi, and M.H. Rahmani, *An efficient shooting method for fiber amplifiers and lasers*. **Optics & Laser Technology**, 2008. 40(8): p. 1041-1046
- [4] www.nufern.com
- [5] زره علی دستجردی و همکاران، بهینه سازی لیزر فیبری دوغافی آاییده به ایتریم، چهاردهمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
- [6] Xue, D., Q. Lou, and J. Zhou, Comparison of Yb-doped fiber laser with one-end and double-end pumping configuration. **Optics & Laser Technology**, 2007. 39(4): p. 871-874
- [7] Upadhyaya, B.N., et al., *Effect of steady-state conditions on self-pulsing characteristics of Yb-doped cw fiber lasers*. **Optics Communications**, 2008. 281(1): p. 146-153
- [8] Liu, G. and D. Liu, *Numerical analysis of stimulated Brillouin scattering in high-power double-clad fiber lasers*. **Optik-International Journal for Light and Electron Optics**, 2009. 120(1): p. 24-28
- [9] Hekmat, M.J., et al., *Study of the stimulated Brillouin scattering power threshold in high power double-clad fiber lasers*. **Laser Physics**. 2013. 23(2): p. 025104



شکل ۵ (الف): خروجی موج لیزر و موج بریلوئن برای دمش از ابتدا



شکل ۵ (ب): خروجی موج لیزر و موج بریلوئن برای دمش از انتهای

نوری، برای دمش از ابتدا توان آستانه بریلوئن ۸۶۶/۸ وات و برای دمش از انتهای ۱۰۸۹ وات است. به این ترتیب حداکثر توان خروجی لیزر بدون آسیب از پراکندگی بریلوئن برای دمش از ابتدا و انتهای تار نوری به ترتیب، ۵۲۸ وات و ۶۸۴ وات می باشد.

با توجه به رابطه ۵، هر چه پهنای خط لیزر بزرگتر باشد، ضریب بهره بریلوئن کوچکتر است. بنابراین، توان آستانه پراکندگی بریلوئن برانگیخته بزرگتر خواهد بود. در این شبیه سازی پهنای خط موج لیزر خیلی بزرگتر از پهنای خط موج بریلوئن است ( $\Delta\nu_s \gg \Delta\nu_B$ )، بنابراین وابستگی توان آستانه بریلوئن به پهنای خط لیزر، به صورت خطی است (شکل ۶). پهنای خط لیزر نیز توسط ساختار کاواک و پهنای خط بازتابی توری های براگ در لیزر تعیین می شود. شبیه سازی و نتایج آن برای لیزر تار نوری به همراه پراکندگی بریلوئن برانگیخته از نظر کلی (ساختار نمودارها و مرتبه توان های آستانه) با نتایج دیگر