



بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی



بررسی پراکندگی بریلوین القایی در انواع دمش‌های لیزر فیبری توان بالا

آیدین اشرفی بلگاباد^۱، علیرضا بنانج^۲، اسماعیل اسلامی^۱، محسن فرخ‌نژاد^۱، امین آذری^۱

^۱دانشگاه علم و صنعت، دانشکده‌ی فیزیک، تهران، ایران

^۲پژوهشکده لیزر و اپتیک، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران

چکیده - برانگیختگی بریلوین القایی (SBS) در لیزرهای فیبری توان بالای دوغلافه آلاییده به اتریوم (YDDC) با حل معادلات نرخ حالت‌پایا در حضور SBS در انواع ساختار دمش به صورت تحلیلی مطالعه شده است. توزیع دمش، سیگنال و امواج استوکس در ساختارهای دمش روبه‌جلو و روبه عقب و دمش از دوانتها در امتداد فیبر بررسی شده است. همچنین توزیع چگالی جمعیت معکوس در امتداد فیبر نوری نشان داده شده است. مطالعات نشان می‌دهد که در روش دمش روبه‌جلو، توان استوکس بریلوین روبه عقب مقدار بیشتری را نسبت به دیگر ساختارهای دمش دارد.

کلید واژه: برانگیختگی بریلوین القایی، فیبر دوغلافه‌ی آلاییده به اتریوم، لیزر، لیزرهای فیبری

Investigate of stimulated Brillouin scattering in high-power fiber-lasers at different pumping configurations

Aydin Ashrafi Belgabad¹, Alireza Bananej², Esmaeil Eslami¹, Mohsen Farokhnezhad¹, Amin Azari²

¹Iran University of Science and Technology, Department of Physics, Tehran, Iran

²Laser and Optics Research School, NSTRI, Tehran, Iran

Abstract- Theoretical analysis of stimulated Brillouin scattering (SBS) in high power ytterbium-doped double-clad (YDDC) fiber lasers is presented by solving the steady-state rate equations with regard to SBS at different pumping configurations. Distribution of pump, signal and Stokes waves powers in forward, backward and bi-directional pumping configurations through the fiber are investigated. Also, distribution of population inversion through the fiber is shown. Studies shows that amount of backward Brillouin Stokes power in forward pumping configuration is higher than other configurations.

Keywords: High-Power Fiber Lasers, Lasers, Stimulated Brillouin Scattering, Ytterbium Doped Double-Clad Fiber

۱- معرفی

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

جاییکه N ، غلظت یونهای Yb^{3+} در هسته و $N_1(z)$ و $N_2(z)$ به ترتیب چگالی جمعیت تراز پایین و بالا است به طوری که $N = N_1 + N_2$ می باشد. $P_p^\pm(z)$ توان دمش و $P_s^\pm(z)$ توان سیگنال و $P_B^\pm(z)$ توان استوکس مرتبه اول می باشد. (\pm متناظر با انتشار در جهت روبه جلو و روبه عقب می باشد). از آنجایی که در این کار شرایط آستانه‌ی موج استوکس مرتبه اول بررسی می شود، از امواج استوکس مرتبه بالا می توان صرف نظر کرد. Γ_p و Γ_s به ترتیب فاکتور همپوشانی توانهای دمش و سیگنال می باشند. σ_{ep}, σ_{ap} سطح مقطع جذب و گسیل نور دمش می باشند. σ_{es}, σ_{as} سطح مقطع جذب و گسیل سیگنال لیزری می باشد. A سطح مقطع هسته و A_{eff} سطح مقطع مؤثر می باشد ν_p فرکانس دمش، ν_s فرکانس سیگنال و τ طول عمر گسیل خودبه خودی است. h ثابت پلانک می باشد. $\alpha_p, \alpha_s, \alpha_B$ به ترتیب ضرایب اتلاف پراکندگی پرتو دمش، سیگنال و موج بریلوین می باشد. از آنجایی که طول موج SBS کمتر از ۰.۱ نانومتر با طول موج سیگنال لیزر فاصله دارد بنابراین $\alpha_s \approx \alpha_B$ در نظر گرفته می شود. g_B بهره‌ی بریلوین می باشد که به پهنای خطی لیزر وابسته است. وقتی $\Delta\nu_s$ پهنای خط لیزر بسیار بزرگتر از پهنای باند بهره‌ی SBS ($\Delta\nu_B$) باشد، داریم:

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

جاییکه g_0 ثابت بهره‌ی ذاتی SBS در فیبرهای سیلیکایی می باشد و مقدار آن $5 \times 10^{-11} \text{ mW}^{-1}$ برای فیبر سیلیکا می باشد. $\Delta\nu_B$ پهنای خط ذاتی فرایند بریلوین می باشد مقدار آن تقریباً ۵۰ MHz می باشد [۴].

برای ساختارهای لیزر فیبری دونقطه شرط مرزی برای سیگنال و امواج استوکس وابسته به معادلات دیفرانسیل خطی (۳) و (۴) به صورت زیر داده می شود.

$$P_s^+(0) = R_{1s} P_s^-(0), \quad (6)$$

$$P_s^-(L) = R_{2s} P_s^+(L), \quad (7)$$

$$P_B^+(0) = R_{1B} P_B^-(0), \quad (8)$$

$$P_B^-(L) = R_{2B} P_B^+(L), \quad (9)$$

جاییکه R_{1B}, R_{1s} به ترتیب بازتابندگی آینه‌ی ورودی در طول موجهای لیزر و استوکس می باشند و R_{2B}, R_{2s} به ترتیب بازتابندگی آینه‌ی خروجی در طول موجهای لیزر و استوکس

در سالهای اخیر توان خروجی لیزرهای فیبری پیوسته‌ی دوغلافه آلائیده به اتریبوم در حد پراش به صورت نمایی افزایش یافته است [۱]. توانهای خروجی آنها به چندین کیلووات در رژیم پیوسته رسیده است. تحقیقات بر روی لیزر فیبری آلائیده به اتریبوم به خاطر بازده بالا، کیفیت پرتو زیاد و هزینه کم در کاربردهای صنعتی و علمی شدت گرفته است. حاصل ضرب بزرگ شدت و طول برهمکنش در داخل هسته‌ی فیبر اثرات غیرخطی از قبیل پراکندگی بریلوین القایی و پراکندگی رامان القایی را موجب می شود که اندازه توان خروجی را محدود می کند [۲]. وزن نسبی این فرایندها توسط پهنای خطی مشخص می شود. آستانه‌ی SBS^1 در لیزرهای فیبری با پهنای خط باریک به طور قابل مقایسه‌ای از آستانه‌ی SRS^2 کمتر است؛ بنابراین در لیزرهای فیبری با پهنای خط باریک (کوچکتر از ۶۰۰ مگاهرتز) می توان از SRS صرف نظر کرد [۲]. SBS یک اثر غیرخطی است که از برهمکنش نور سیگنال با امواج صوتی انتشار یافته در داخل فیبر برانگیخته می شود. جلوگیری از اثرات غیرخطی در فیبرها یکی از موضوعات بحرانی در لیزرهای فیبری توان بالا می باشد.

در این مقاله به بررسی نحوه‌ی تولید و انتشار امواج استوکس در داخل فیبر نوری پرداخته شده است. همچنین توزیع توانهای دمش، سیگنال و موج بریلوین و همچنین توزیع جمعیت معکوس در داخل فیبر بررسی شده است.

۲- مدل تئوری و ساختار لیزر

معادلات نرخ حالت پایا برای توصیف دمش، سیگنال و امواج استوکس در لیزر CW به صورت زیر داده می شوند [۳-۵]:

$$\frac{N_2(z)}{N} = \frac{\frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)]\sigma_p\Gamma_p}{h\nu_p A} + \frac{[P_s^+(z) + P_s^-(z)]\sigma_s\Gamma_s}{h\nu_s A}}{\frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)](\sigma_p + \sigma_{sp})\Gamma_p}{h\nu_p A} + \frac{1}{\tau} + \frac{[P_s^+(z) + P_s^-(z)](\sigma_s + \sigma_{ss})\Gamma_s}{h\nu_s A}} \quad (1)$$

$$\frac{dP_p^\pm(z)}{dz} = \pm \Gamma_p [(\sigma_p + \sigma_{sp}) N_2(z) - \sigma_{sp} N] P_p^\pm(z) \mp \alpha_p P_p^\pm(z), \quad (2)$$

$$\frac{dP_s^\pm(z)}{dz} = \pm \Gamma_s [(\sigma_s + \sigma_{ss}) N_2(z) - \sigma_{ss} N] P_s^\pm(z) \mp \alpha_s P_s^\pm(z) \mp \frac{g_B}{A_{eff}} P_s^\mp(z) P_B^\pm(z), \quad (3)$$

¹ Stimulated Brillouin Scattering

² Stimulated Raman Scattering

می‌باشند. در شبیه‌سازی‌های ذیل مقادیر $R_{1s} = 0.99$ و $R_{1B} = R_{2B} = R_{2s} = 0.04$ در نظر گرفته شده است.

شرایط مرزی برای معادلات انتشار دمش در ساختارهای دمش روبه‌جلو، روبه عقب و دمش از دو انتها به صورت زیر می‌باشد.

$$\begin{aligned} P_p^+(0) &= P_p^+, P_p^-(L) = 0, \\ P_p^+(0) &= 0, P_p^-(L) = P_p^-, \\ P_p^+(0) &= P_p^+, P_p^-(L) = P_p^-, \end{aligned} \quad (10)$$

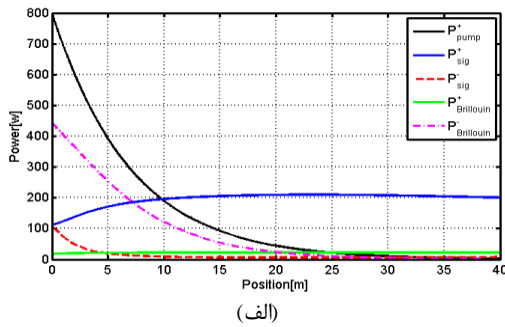
با استفاده از معادلات (۱) - (۱۰)، می‌توان مشخصه‌های خروجی لیزرهای فیبری YDDC با ساختارهای دمش مختلف را به صورت عددی شبیه‌سازی کرد. به منظور بهبود دقت و سرعت شبیه‌سازی ما از روش رانگ-کوتا استفاده کردیم و برای حل مسئله مقدار اولیه از روش نیوتون-راپسون استفاده کرده‌ایم [۶]. توان‌های سیگنال، استوکس روبه‌جلو به صورت زیر داده می‌شود [۵]:

$$\begin{aligned} P_{sig}(out) &= P_s^+(L) - P_s^-(L) = [1 - R_{2s}] \cdot P_s^+(L), \\ P_{Brill-FW}(out) &= P_B^+(L) - P_B^-(L) = [1 - R_{2B}] \cdot P_B^+(L), \end{aligned} \quad (11)$$

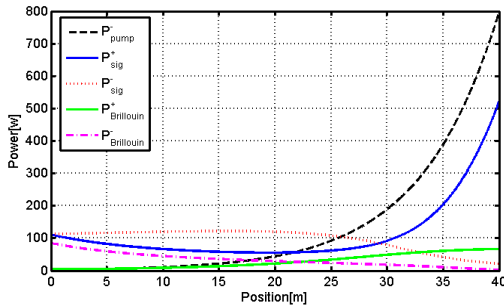
۳- نتایج شبیه‌سازی و بحث

پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها $\lambda_p = 975 \text{ nm}$ ، $\lambda_s = 1082.8 \text{ nm}$ ، $\sigma_{ep} = 2 \times 10^{-24} \text{ m}^2$ ، $\sigma_{ap} = 2 \times 10^{-24} \text{ m}^2$ ، $N = 6 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ ، $\sigma_{es} = 4.2 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ ، $\sigma_{ss} = 3.1 \times 10^{-27} \text{ m}^2$ ، $\Gamma_p = 0.0012$ ، $\tau = 0.8 \text{ ms}$ ، $\alpha_s = 5 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ ، $\alpha_p = 3 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ ، $\Gamma_s = 0.85$ و $\Delta\nu_s = 10 \text{ GHz}$ و فیبر با قطر $D_c = 20 \mu\text{m}$ با روزنه‌ی عددی $NA = 0.05$ می‌باشند [۵].

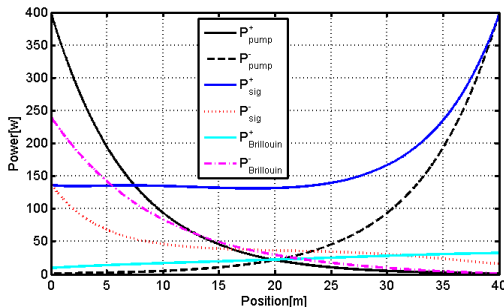
شکل (۱) توزیع توان‌های دمش، سیگنال و امواج استوکس در امتداد فیبر در سه روش دمش روبه‌جلو، روبه عقب و دمش از دو انتها را نشان می‌دهد. در تمام ساختارها توان دمش ۸۰۰ وات و طول فیبر ۴۰ متر در نظر گرفته شده است. شکل (۱ الف) نشان می‌دهد که توان دمش ورودی در امتداد فیبر به صورت نمایی کاهش پیدا می‌کند. توان سیگنال روبه‌جلو تا نزدیکی‌های ۲۳ متر رشد می‌کند و سپس به صورت آرام در امتداد فیبر کاهش می‌یابد. در ساختار دمش روبه‌جلو، توان بریلوین روبه عقب در ابتدای فیبر بسیار بیشتر از ساختارهای دمش دیگر است. مقدار آن در ابتدای فیبر



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۱): توزیع توان‌های دمش سیگنال و استوکس در طول ۴۰ متر فیبر (الف) ساختار دمش روبه‌جلو (ب) دمش روبه عقب و (ج) ساختار دمش از دو انتها

تقریباً ۴۴۳ وات در ساختار دمش روبه‌جلو می‌باشد. این توان قوی می‌تواند آسیب‌های جدی به ادوات اپتیکی، ایزولاتورها، لیزر دیودها و توری‌های براگ برساند. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، توان استوکس بریلوین جمعیت معکوس را می‌دزدد و قابلیت رقابت بهره را برای لیزر می‌گیرد. توان سیگنال خروجی و بازده شیب در این روش به ترتیب ۱۹۳ وات و ۲۴٪ می‌باشد. شکل (۱ ب) نشان می‌دهد که توان دمش جذب شده در داخل فیبر متقارن با شکل (۱ الف) می‌باشد. توان سیگنال روبه‌جلو در ابتدا در داخل فیبر تا ۲۶ متر اول کمتر از توان سیگنال روبه عقب است. بعد از این نقطه توان سیگنال روبه‌جلو به شدت در امتداد فیبر تقویت می‌یابد و در انتهای فیبر به ۵۲۰ وات می‌باشد. توان بریلوین روبه عقب در $z=0$ ۸۵ وات می‌باشد که در امتداد فیبر به آرامی کاهش

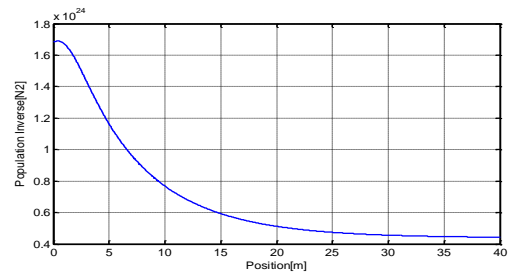
در ابتدای فیبر بیشتر بوده و در امتداد فیبر به شدت کاهش می‌یابد. در ساختار دمش روبه عقب برخلاف ساختار دمش روبه جلو جمعیت معکوس در امتداد فیبر افزایش می‌یابد و به بیشینه مقدار خود در ۳۵ متر می‌رسد و پس از آن به دلیل رشد سریع سیگنال و استفاده سیگنال از جمعیت معکوس، اندکی کاهش می‌یابد؛ و در ساختار دمش از دو انتها جمعیت معکوس در ابتدای فیبر کمی بیشتر از انتهای فیبر می‌باشد.

۴- نتیجه گیری

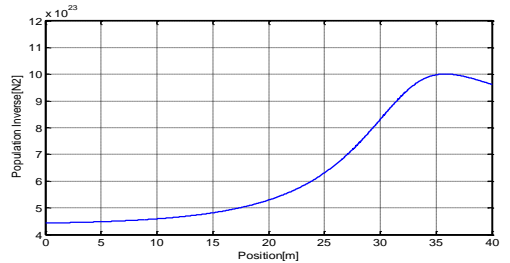
در ساختار دمش روبه جلو به خاطر برهمکنش زیاد فوتون‌های سیگنال با طول فیبر اثر بریلوین بیشتر مشاهده می‌شود. اثر برانگیختگی بریلوین القایی جمعیت معکوس را به سرعت مصرف کرده و در نتیجه از رشد سیگنال در داخل فیبر جلوگیری می‌کند. مشاهده می‌شود که در دمش روبه جلو بیشترین تولید SBS روبه عقب را داریم. در یک توان دمش مشخص و در حضور SBS بازده شیب و توان سیگنال خروجی در دمش روبه جلو بسیار پایین‌تر از مقدار متناظر آن در دیگر روش‌های دمش می‌باشد.

۵- منابع

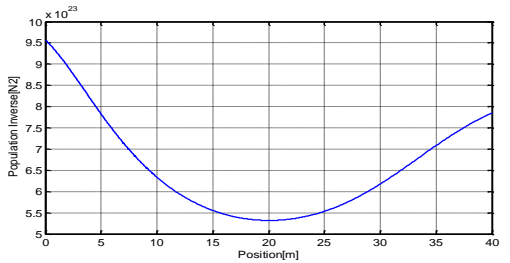
- Jauregui, C., J. Limpert, and A. Tünnermann, *High-power fibre lasers*. Nature Photonics, 2013. 7(11): p. 861-867.
- Agrawal, G.P., *Nonlinear fiber optics*. 2007: Academic press.
- Hekmat, M., et al., *Study of the stimulated Brillouin scattering power threshold in high power double-clad fiber lasers*. Laser Physics, 2013. 23(2): p. 025104.
- 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.
- Yang, H., et al., *Theoretical study of stimulated Brillouin scattering in high-power dual-clad fiber lasers*. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2013. 124(11): p. 1049-1052.
- Luo, Z., et al., *Simplified analytic solutions and a novel fast algorithm for Yb³⁺-doped double-clad fiber lasers*. Optics communications, 2007. 277(1): p. 118-124.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۲): توزیع جمعیت معکوس در امتداد فیبر (الف) ساختار دمش روبه جلو (ب) دمش روبه عقب و (ج) ساختار دمش از دو انتها

می‌یابد. توان استوکس روبه جلو به آرامی در امتداد فیبر افزایش می‌یابد و اندازه‌ی آن در انتهای فیبر به ۶۷ وات می‌رسد. توان سیگنال خروجی و بازده شیب در این ساختار به ترتیب ۵۰۰ وات و ۶۳٪ می‌باشد. شکل (۱ پ) نشان می‌دهد که توزیع توان دمش از دو انتهای فیبر متقارن است. توان‌های دمش به صورت نمایی در امتداد فیبر جذب می‌شوند. توان سیگنال روبه جلو تا نزدیکی‌های ۲۰ متر ثابت است و سپس به شدت افزایش می‌یابد و به بیشترین مقدار خود (۳۹۶ وات) در انتهای فیبر می‌رسد. در این ساختار توان استوکس بریلوین روبه عقب رفتاری شبیه به توان استوکس روبه عقب در ساختار دمش روبه جلو دارد با این تفاوت که مقدار آن نصف مقدار مشابه در ساختار دمش روبه جلو می‌باشد. در این ساختار توان استوکس روبه جلو به آرامی در امتداد فیبر افزایش می‌یابد. توان سیگنال خروجی و بازده شیب در این ساختار به ترتیب ۳۸۰ وات و ۴۸٪ می‌باشد.

شکل (۲) توزیع جمعیت معکوس در امتداد فیبر برای ساختارهای دمش مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در ساختار دمش روبه جلو جمعیت معکوس