



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 بلغاباد^۱، علیرضا بنانج^۲، اسماعیل اسلامی^۱، محسن فرخ‌نژاد^۱، امین آذری^۲

^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 روبه جلو 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 روبه جلو، 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, Esmail 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

در سال‌های اخیر توان خروجی لیزرهای فیبری پیوسته‌ی دوغلافه آلائیده به اتریبوم در حد پراش به‌صورت نمای افزایش‌یافته 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. حاصل‌ضرب بزرگ شدت و طول برهمکنش در داخل هسته‌ی فیبر اثرات غیرخطی از قبیل پراکندگی بریلوین القایی و پراکندگی رامان القایی را موجب می‌شود که اندازه توان خروجی را محدود می‌کند [۲]. وزن نسبی این فرایندها توسط پهنای خطی مشخص می‌شود. آستانه‌ی SBS^1 در لیزرهای فیبری با پهنای خط باریک به‌طور قابل‌مقایسه‌ای از آستانه‌ی SRS^2 کمتر است؛ بنابراین در لیزرهای فیبری با پهنای خط باریک (کوچک‌تر از ۶۰۰ مگاهرتز) می‌توان از SRS صرف‌نظر کرد [۲]. SBS یک اثر غیرخطی است که از برهمکنش نور سیگنال با امواج صوتی انتشاریافته در داخل فیبر برانگیخته می‌شود. جلوگیری از اثرات غیرخطی در فیبرها یکی از موضوعات بحرانی در لیزرهای فیبری توان بالا می‌باشد.

در این مقاله به بررسی نحوه‌ی تولید و انتشار امواج استوکس در داخل فیبر نوری پرداخته‌شده 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 حالت‌پایا برای توصیف دمش، سیگنال و امواج استوکس در لیزر CW به‌صورت زیر داده می‌شوند [۳-۵]:

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

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

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

¹ Stimulated Brillouin Scattering

² Stimulated Raman Scattering

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

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 به‌طوری‌که $N = N_1 + N_2$ می‌باشد. $P_p^\pm(z)$ توان دمش و $P_s^\pm(z)$ توان سیگنال و $P_B^\pm(z)$ توان استوکس مرتبه‌ی اول می‌باشد. ($\pm$ متناظر با انتشار در جهت روبه‌جلو و روبه‌عقب می‌باشد). از آنجایی که در این کار شرایط آستانه‌ی موج استوکس مرتبه‌ی اول بررسی می‌شود، از امواج استوکس مرتبه بالا می‌توان صرف‌نظر کرد. Γ_p و Γ_s به ترتیب فاکتور همپوشانی توان‌های دمش و سیگنال می‌باشند. σ_{ep}, σ_{ap} سطح مقطع جذب و گسیل نور دمش می‌باشند. σ_{es}, σ_{as} سطح مقطع جذب و گسیل سیگنال لیزری می‌باشد. A سطح مقطع هسته و A_{eff} سطح مقطع مؤثر می‌باشد ν_p فرکانس دمش، ν_s فرکانس سیگنال و τ طول عمر گسیل خودبه‌خودی است. h ثابت پلانک می‌باشد. $\alpha_p, \alpha_s, \alpha_B$ به ترتیب ضرایب اتلاف پراکندگی پرتو دمش، سیگنال و موج بریلوین می‌باشد. از آنجایی که طول‌موج SBS کمتر از ۰.۱ نانومتر با طول‌موج سیگنال لیزر فاصله دارد بنابراین $\alpha_s \approx \alpha_B$ در نظر گرفته می‌شود. g_B بهره‌ی بریلوین می‌باشد 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 می‌باشد و مقدار آن $5 \times 10^{-11} mW^{-1}$ برای فیبر سیلیکا می‌باشد. $\Delta\nu_B$ پهنای خط ذاتی فرایند بریلوین می‌باشد مقدار آن تقریباً ۵۰ MHz می‌باشد [۴].

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

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

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

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

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

جاییکه R_{1B}, R_{1s} به ترتیب بازتابندگی آینه‌ی ورودی در طول‌موج‌های لیزر و استوکس می‌باشند و R_{2B}, R_{2s} به ترتیب بازتابندگی آینه‌ی خروجی در طول‌موج‌های لیزر و استوکس

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.

$$P_p^+(0) = P_p^+, \quad P_p^-(L) = 0,$$

$$P_p^+(0) = 0, \quad P_p^-(L) = P_p^-,$$

$$P_p^+(0) = P_p^+, \quad P_p^-(L) = P_p^-, \quad (10)$$

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]:

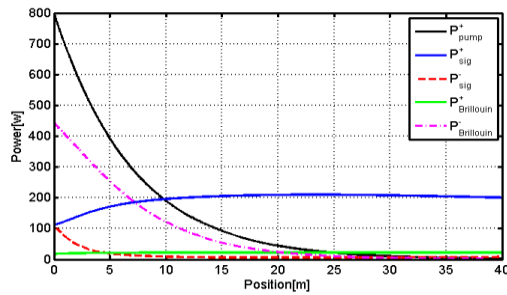
$$P_{sig}(out) = P_s^+(L) - P_s^-(L) = [1 - R_{2s}] \cdot P_s^+(L),$$

$$P_{Brill-FW}(out) = P_B^+(L) - P_B^-(L) = [1 - R_{2B}] \cdot P_B^+(L), \quad (11)$$

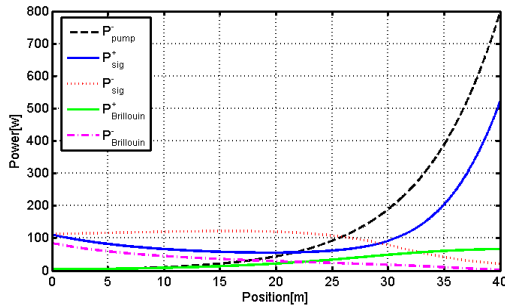
۳- نتایج شبیه‌سازی و بحث

پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها $\lambda_p = 975 \text{ nm}$ ، $\lambda_s = 1082.8 \text{ nm}$ ، $\sigma_{ep} = 2 \times 10^{-24} \text{ m}^2$ ، $\sigma_{ap} = 2 \times 10^{-24} \text{ m}^2$ ، $N = 6 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ ، $\sigma_{es} = 4.2 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ ، $\sigma_{as} = 3.1 \times 10^{-27} \text{ m}^2$ ، $\Gamma_p = 0.0012$ ، $\tau = 0.8 \text{ ms}$ ، $\alpha_s = 5 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ ، $\alpha_p = 3 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ ، $\Gamma_s = 0.85$ 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].

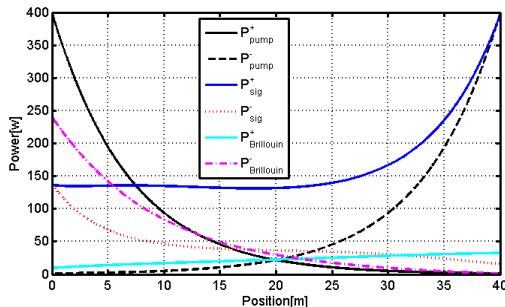
شکل (۱) توزیع توان‌های دمش، سیگنال و امواج استوکس در امتداد فیبر در سه روش دمش روبه‌جلو، روبه عقب و دمش از دو انتها را نشان می‌دهد. در تمام ساختارها توان دمش ۸۰۰ وات و طول فیبر ۴۰ متر در نظر گرفته شده است. شکل (۱ الف) نشان می‌دهد که توان دمش ورودی در امتداد فیبر به صورت نمایی کاهش پیدا می‌کند. توان سیگنال 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 می‌دزد 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 $z=0$ وات می‌باشد که در امتداد فیبر به آرامی کاهش

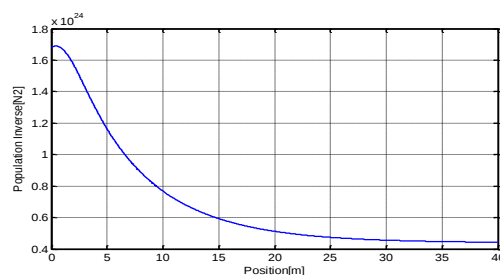
در ابتدای فیبر بیشتر بوده و در امتداد فیبر به شدت کاهش می‌یابد. در ساختار دمش روبه عقب برخلاف ساختار دمش روبه جلو جمعیت معکوس در امتداد فیبر افزایش می‌یابد و به بیشینه مقدار خود در ۳۵ متر می‌رسد و پس از آن به دلیل رشد سریع سیگنال و استفاده سیگنال از جمعیت معکوس، اندکی کاهش می‌یابد؛ و در ساختار دمش از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

۴- نتیجه گیری

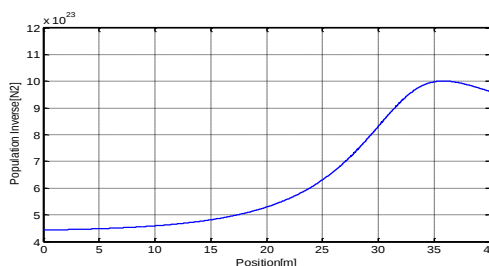
در ساختار دمش روبه جلو به خاطر برهمکنش زیاد فوتون‌های سیگنال با طول فیبر اثر بریلوین بیشتر مشاهده می‌شود. اثر برانگیختگی بریلوین القایی جمعیت معکوس را به سرعت مصرف کرده و در نتیجه از رشد سیگنال در داخل فیبر جلوگیری می‌کند. مشاهده می‌شود که در دمش روبه جلو بیشترین تولید SBS روبه عقب را داریم. در یک توان 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

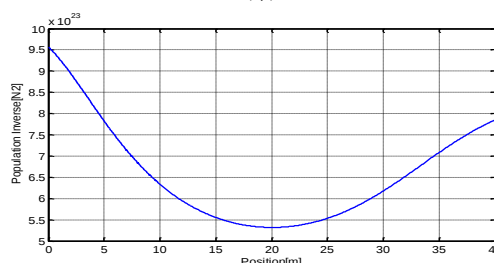
۱. Jauregui, C., J. Limpert, and A. Tünnermann, *High-power fibre lasers*. Nature Photonics, 2013. 7(11): p. 861-867.
۲. Agrawal, G.P., *Nonlinear fiber optics*. 2007: Academic press.
۳. Hekmat, M., et al., *Study of the stimulated Brillouin scattering power threshold in high power double-clad fiber lasers*. Laser Physics, 2013. 23(2): p. 025104.
۴. 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.
۵. 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.
۶. 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