



لیکن
پژوهشگاه
فوتونیک
و مهندسی

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 دمشاهای لیزر فیبری توان بالا

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

^۱دانشگاه علم و صنعت، دانشکده 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 اتریبوم (YDDC) با حل معادلات نرخ حالت پایا 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 معمکوس 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 دوغلافه آلاییده به اتریبوم، لیزر، لیزرهای فیبری

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

Aydin Ashrafi Belgabab¹, 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 $N = N_1 + N_2$ می‌باشد. $P_p^\pm(z)$ توان دمش و (z) توان سیگنال و $P_s^\pm(z)$ توان استوکس مرتبه اول می‌باشد. (\pm) متناظر با انتشار در جهت روبه‌جلو و روبه عقب می‌باشد). از آنجایی که در این کار شرایط آستانه‌ی موج استوکس مرتبه 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 V_p فرکانس دمش، V_s فرکانس سیگنال و τ طول عمر گسیل خودبه‌خودی است. h ثابت پلانک می‌باشد. α_s, α_p و α_B به ترتیب ضرایب اتلاف پراکندگی پرتو دمش، سیگنال و موج بریلووین می‌باشد. از آنجایی که طول موج SBS کمتر از ۰.۱ نانومتر با طول موج سیگنال لیزر فاصله دارد بنابراین $\alpha_B \approx \alpha_s$ در نظر گرفته می‌شود. g_B بهره‌ی بریلووین می‌باشد که به پهنه‌ای خطی لیزر وابسته است. وقتی ΔV_s پهنه‌ای خط لیزر بسیار بزرگ‌تر از پهنه‌ای باند بهره‌ی SBS (ΔV_B) باشد، داریم:

$$g_B = g_0 \frac{\Delta V_B}{\Delta V_s + \Delta V_B} \quad (5)$$

جاییکه g_0 ثابت بهره‌ی ذاتی SBS در فیبرهای سیلیکایی می‌باشد و مقدار آن $5 \times 10^{-11} mW^{-1}$ برای فیبر سیلیکا می‌باشد. ΔV_B پهنه‌ای خط ذاتی فرایند بریلووین 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) به صورت 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_{1s}, R_{2s} به ترتیب بازتابندگی آینه‌ی ورودی در طول موج‌های لیزر و استوکس می‌باشند و R_{1B}, R_{2B} به ترتیب بازتابندگی آینه‌ی خروجی در طول موج‌های لیزر و استوکس

در سال‌های اخیر توان خروجی لیزرهای فیبری پیوسته دوغلافه آلاییده 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 آلاییده 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 بریلووین القایی و پراکندگی رامان القایی را موجب می‌شود که اندازه توان خروجی را محدود می‌کند [۲]. وزن نسبی این فرایندها توسط پهنه‌ای خطی مشخص می‌شود. آستانه‌ی SBS در لیزرهای فیبری با پهنه‌ای خط باریک به طور قابل مقایسه‌ای از آستانه‌ی SRS^۱ کمتر است؛ بنابراین در لیزرهای فیبری با پهنه‌ای 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 انتشار یافته 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 نحوه تولید و انتشار امواج استوکس در داخل فیبر نوری پرداخته شده است. همچنین توزیع توان-های دمش، سیگنال و موج بریلووین و همچنین توزیع جمعیت معکوس در داخل فیبر بررسی شده است.

۲- مدل تئوری و ساختار لیزر

معادلات نرخ حالت‌پایای برای توصیف دمش، سیگنال و امواج استوکس در لیزر CW به صورت زیر داده می‌شوند [۳]:

$$\frac{N_2(z)}{N} = \frac{\frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)]\sigma_{ap}\Gamma_p}{hv_p A} + \frac{[P_s^+(z) + P_s^-(z)]\sigma_{as}\Gamma_s}{hv_s A}}{\frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)](\sigma_{ap} + \sigma_{sp})\Gamma_p}{hv_p A} + \frac{1}{\tau} + \frac{[P_s^+(z) + P_s^-(z)](\sigma_{as} + \sigma_{ss})\Gamma_s}{hv_s A}}, \quad (1)$$

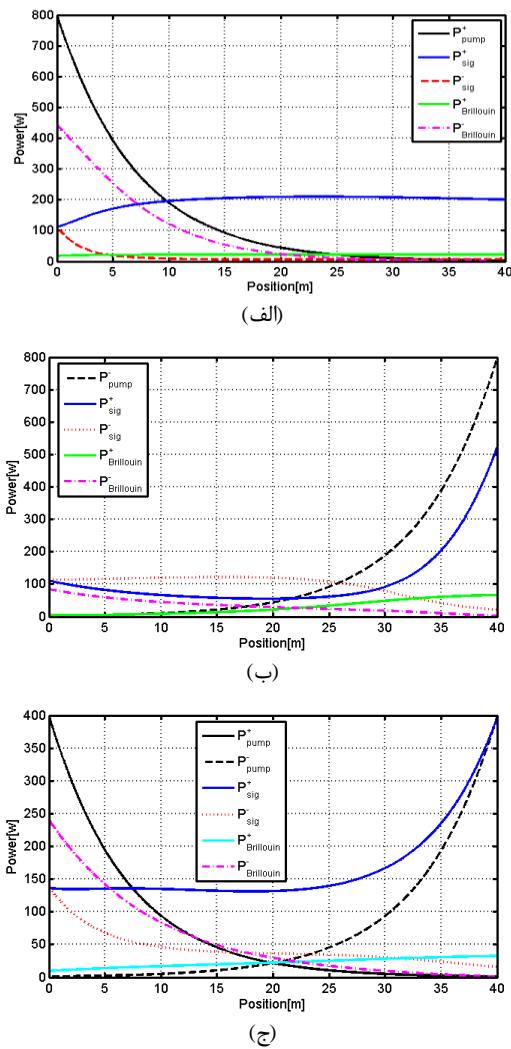
$$\frac{dP_p^\pm(z)}{dz} = \pm\Gamma_p [(\sigma_{ap} + \sigma_{sp}) N_2(z) - \sigma_{ap} N] P_p^\pm(z) \mp \alpha_p P_p^\pm(z), \quad (2)$$

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

$$\mp \alpha_s P_s^\pm(z) \mp \frac{g_B}{A_{eff}} P_s^\mp(z) P_B^\pm(z),$$

¹ Stimulated Brillouin Scattering

² Stimulated Raman Scattering



شکل (۱): توزیع توان های دمش سیگنال و استوکس در طول ۴۰ متر فیبر
(الف) ساختار دمش روبه جلو (ب) دمش روبه عقب و (ج) ساختار دمش از
دو انتهای

تقریباً ۴۴۳ وات در ساختار دمش روبه جلو می باشد. این توان قوی می تواند آسیب های جدی به ادوات اپتیکی، ایزولاتورها، لیزر دیودها و توری های برآگ برساند. همان طور که در شکل دیده می شود، توان استوکس بریلیوین جمعیت معکوس را می دارد و قابلیت رقابت بهره را برای لیزر می گیرد. توان سیگنال خروجی و بازده شیب در این روش به ترتیب ۱۹۳ وات و ۲۴٪ می باشد. شکل (۱ ب) نشان می دهد که توان دمش جذب شده در داخل فیبر متقارن با شکل (۱ الف) می باشد. توان سیگنال روبه جلو در ابتداء در داخل فیبر تا ۲۶ متر اول کمتر از توان سیگنال روبه عقب است. بعد از این نقطه توان سیگنال روبه جلو به شدت در امتداد فیبر تقویت می یابد و در انتهای فیبر به ۵۲۰ وات می باشد. توان بریلیوین روبه عقب در ۸۵ وات می باشد که در امتداد فیبر به آرامی کاهش

می باشد. در شبیه سازی های 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 روبه جلو، روبه عقب و دمش از دو انتهای به صورت زیر می باشد.

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

با استفاده از معادلات (۱) - (۱۰)، می توان مشخصه های خروجی لیزرهای فیبری YDDC با ساختارهای دمش مختلف را به صورت عددی شبیه سازی کرد. به منظور بهبود دقیق و سرعت شبیه سازی ما از روش رانگ-کوتا استفاده کردیم و برای حل مسئله مقدار اولیه از روش نیوتون-راپسون استفاده کردیم [۶]. توان های سیگنال، استوکس روبه جلو به صورت زیر داده می شود [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 شبیه سازی و بحث

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

شکل (۱) توزیع توان های دمش، سیگنال و امواج استوکس در امتداد فیبر در سه روش دمش روبه جلو، روبه عقب و دمش از دو انتهای را نشان می دهد. در تمام ساختارها توان دمش ۸۰۰ وات و طول فیبر ۴۰ متر در نظر گرفته شده است. شکل (۱ الف) نشان می دهد که توان دمش ورودی در امتداد فیبر به صورت نمایی کاهش پیدا می کند. توان سیگنال روبه جلو تا نزدیکی های ۲۳ متر رشد می کند و سپس به صورت آرام در امتداد فیبر کاهش می یابد. در ساختار دمش روبه جلو، توان بریلیوین روبه عقب در ابتدای فیبر بسیار بیشتر از ساختارهای دمش دیگر است. مقدار آن در ابتدای فیبر

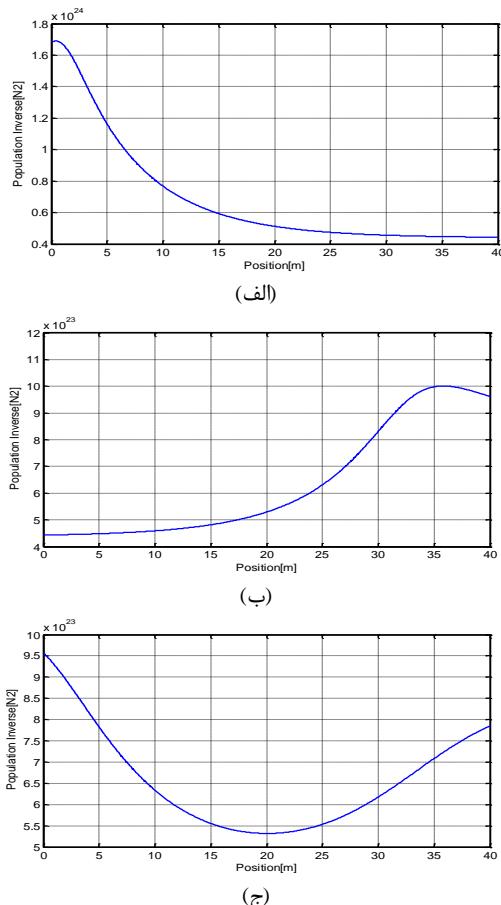
در ابتدای فیبر بیشتر بوده و در امتداد فیبر بهشدت کاهش می‌یابد. در ساختار دمش روبه عقب برخلاف ساختار دمش روبه‌جلو جمعیت معکوس در امتداد فیبر افزایش می‌یابد و به بیشینه مقدار خود در ۳۵ متر می‌رسد و پس از آن به دلیل رشد سریع سیگنال و استفاده سیگنال از جمعیت معکوس، اندکی کاهش می‌یابد؛ و در ساختار دمش از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

۴- نتیجه گیری

در ساختار دمش روبه‌جلو به خاطر برهمنکش زیاد فوتون‌های سیگنال با طول فیبر اثر بریلویین بیشتر مشاهده می‌شود. اثر برانگیختگی بریلویین القایی جمعیت معکوس را به سرعت مصرف کرده و درنتیجه از رشد سیگنال در داخل فیبر جلوگیری می‌کند. مشاهده می‌شود که در دمش روبه‌جلو بیشترین تولید SBS روبه عقب را داریم. در یک توان دمش مشخص و در حضور SBS بازده شبیب 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.



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

می‌یابد. توان استوکس روبه‌جلو به‌آرامی در امتداد فیبر افزایش می‌یابد و اندازه‌ی آن در انتهای فیبر به ۶۷ وات می‌رسد. توان سیگنال خروجی و بازده شبیب در این ساختار به ترتیب ۵۰۰ وات و ۶۳٪ می‌باشد. شکل (۱ پ) نشان می‌دهد که توزیع توان دمش از دو انتهای فیبر متقاضن است. توان‌های دمش به صورت نمایی در امتداد فیبر جذب می‌شوند. توان سیگنال روبه‌جلو تا نزدیکی‌های ۲۰ متر ثابت است و سپس به‌شدت افزایش می‌یابد و به بیشترین مقدار خود (۳۹۶ وات) در انتهای فیبر می‌رسد. در این ساختار توان استوکس بریلویین روبه عقب رفتاری شبیه به توان استوکس روبه عقب در ساختار دمش روبه‌جلو دارد با این تفاوت که مقدار آن نصف مقدار مشابه در ساختار دمش روبه‌جلو می‌باشد. در این ساختار توان استوکس روبه‌جلو به‌آرامی در امتداد فیبر افزایش می‌یابد. توان سیگنال خروجی و بازده شبیب 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 روبه‌جلو جمعیت معکوس