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[۲]،

[۱]دانشگاه علم و صنعت، دانشکده‌ی فیزیک، تهران، ایران

[۲]پژوهشکده لیزر و اپتیک، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران

چکیده - برانگیختگی بریلوین القایی (*SBS*) در لیزرهای فیبری توان بالای دوغلافه آلاییده به اتربیوم (*YDDC*) با حل معادلات نرخ حالت‌پایا در حضور *SBS* در انواع ساختار دمش به‌صورت تحلیلی مطالعه شده است. توزیع دمش، سیگنال و امواج استوکس در ساختارهای دمش روبه‌جلو و روبه عقب و دمش از دوانتها در امتداد فیبر بررسی‌شده است. همچنین توزیع چگالی جمعیت معکوس در امتداد فیبر نوری نشان داده‌شده 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 اتربیوم، لیزر، لیزرهای فیبری

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

Aydin Ashrafi Belgabad[1], Alireza Bananej[2], Esmaeil Eslami[1], Mohsen Farokhnezhad[1], Amin Azari[2]

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

[2]Laser 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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

۱- معرفی

در سال‌های اخیر توان خروجی لیزرهای فیبری پیوسته‌ی دوغلافه آلاییده به اتربیوم در حد پراش به‌صورت نمایی افزایش‌یافته است [۱]. توان‌های خروجی آن‌ها به چندین کیلووات در رژیم پیوسته رسیده است. تحقیقات بر روی لیزر فیبری آلاییده به اتربیوم 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 بررسی‌شده 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]:

$$\frac{N_2(z)}{N}=\frac{\frac{[P_p^+(z)+P_p^-(z)]\sigma_{ap}\Gamma_p}{h\nu_p A}+\frac{[P_s^+(z)+P_s^-(z)]\sigma_{as}\Gamma_s}{h\nu_s A}}{\frac{[P_p^+(z)+P_p^-(z)](\sigma_{ap}+\sigma_{ep})\Gamma_p}{h\nu_p A}+\frac{1}{\tau}+\frac{[P_s^+(z)+P_s^-(z)](\sigma_{as}+\sigma_{es})\Gamma_s}{h\nu_s A}}, \quad (۱)$$

$$\frac{dP_p^{\pm}(z)}{dz}=\pm\Gamma_p[(\sigma_{ap}+\sigma_{ep})N_2(z)-\sigma_{ap}N]P_p^{\pm}(z)\mp\alpha_p P_p^{\pm}(z), \quad (۲)$$

$$\frac{dP_s^{\pm}(z)}{dz}=\pm\Gamma_s[(\sigma_{as}+\sigma_{es})N_2(z)-\sigma_{as}N]P_s^{\pm}(z) \mp\alpha_s P_s^{\pm}(z)\mp\frac{g_B}{A_{eff}}P_s^{\mp}(z)P_B^{\pm}(z), \quad (۳)$$

$$\frac{dP_B^{\pm}(z)}{dz}=\mp\alpha_B P_B^{\pm}(z)\pm\frac{g_B}{A_{eff}}P_s^{\mp}(z)P_B^{\pm}(z), \quad (۴)$$

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 روبه عقب می‌باشد). ازآنجایی‌که 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. α_s,α_p و α_B به ترتیب ضرایب اتلاف پراکندگی پرتو دمش، سیگنال و موج بریلوین می‌باشد. ازآنجایی‌که طول‌موج SBS کمتر از ۰.۱ نانومتر با طول‌موج سیگنال لیزر فاصله دارد بنابراین $\alpha_B\approx\alpha_s$ 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:

$$g_B=g_0\frac{\Delta\nu_B}{\Delta\nu_s+\Delta\nu_B} \quad (۵)$$

جاییکه g_0 ثابت بهره‌ی ذاتی SBS در فیبرهای سیلیکایی می‌باشد و مقدار آن $5\times10^{-11}mW^{-1}$ 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.

$$P_s^+(0)=R_{1s}P_s^-(0), \quad (۶)$$

$$P_s^-(L)=R_{2s}P_s^+(L), \quad (۷)$$

$$P_B^+(0)=R_{1B}P_B^-(0), \quad (۸)$$

$$P_B^-(L)=R_{2B}P_B^+(L), \quad (۹)$$

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

[1] Stimulated Brillouin Scattering
[2] Stimulated Raman Scattering

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]

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

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

$$P_p^+(0)=P_p^+,\ P_p^-(\mathrm{L})=0,$$
$$P_p^+(0)=0,\ P_p^-(\mathrm{L})=\mathrm{P}_p^-,$$
$$P_p^+(0)=P_p^+,\ P_p^-(\mathrm{L})=\mathrm{P}_p^-, \qquad (۱۰)$$

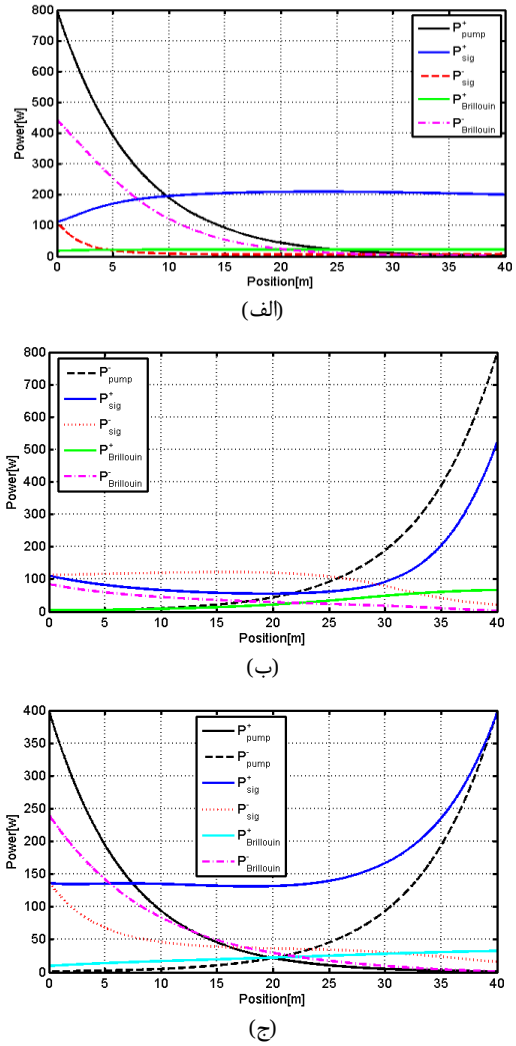
با استفاده از معادلات (۱) – (۱۰)، می‌توان مشخصه‌های خروجی لیزرهای فیبری YDDC با ساختارهای دمش مختلف را به‌صورت عددی شبیه‌سازی کرد. به‌منظور بهبود دقت و سرعت شبیه‌سازی ما از روش رانگ-کوتا استفاده کردیم و برای حل مسئله مقدار اولیه از روش نیوتون-راپسون استفاده کرده‌ایم [۶]. توان‌های سیگنال، استوکس روبه‌جلو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

$$P_{sig}(out)=P_s^+(\mathrm{L})-\mathrm{P}_s^-(\mathrm{L})=[1-\mathrm{R}_{2s}].P_s^+(\mathrm{L}),$$
$$P_{Brill-FW}(\mathrm{out})=P_B^+(\mathrm{L})-\mathrm{P}_B^-(\mathrm{L})=[1-\mathrm{R}_{2B}].P_B^+(\mathrm{L}), \qquad (۱۱)$$

۳- نتایج شبیه‌سازی و بحث

پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها $\lambda_p=975\mathrm{nm}$، $\lambda_s=1082.8\mathrm{nm}$، $N=6\times10^{25}\mathrm{m}^{-3}$، $\sigma_{ap}=2\times10^{-24}\mathrm{m}^2$، $\sigma_{ep}=2\times10^{-24}\mathrm{m}^2$، $\sigma_{as}=3.1\times10^{-27}\mathrm{m}^2$، $\sigma_{es}=4.2\times10^{-25}\mathrm{m}^2$، $\tau=0.8\mathrm{ms}$، $\Gamma_p=0.0012$، $\Gamma_s=0.85$، $\alpha_p=3\times10^{-3}\mathrm{m}^{-1}$، $\alpha_s=5\times10^{-3}\mathrm{m}^{-1}$، $\Delta\nu_s=10\mathrm{GHz}$ و فیبر با قطر $D_c=20\mu\mathrm{m}$ 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 گرفته‌شده است. شکل (۱ الف) نشان می‌دهد که توان دمش ورودی در امتداد فیبر به‌صورت نمایی کاهش پیدا می‌کند. توان سیگنال روبه‌جلو تا نزدیکی‌های ۲۳ متر رشد می‌کند و سپس به‌صورت آرام در امتداد فیبر کاهش می‌یابد. در ساختار دمش روبه‌جلو، توان بریلویین روبه عقب در ابتدای فیبر بسیار بیشتر از ساختارهای دمش دیگر است. مقدار آن در ابتدای فیبر



(الف)

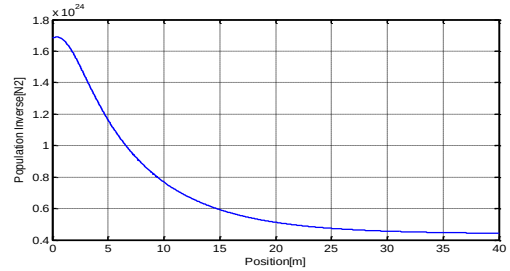
(ب)

(ج)

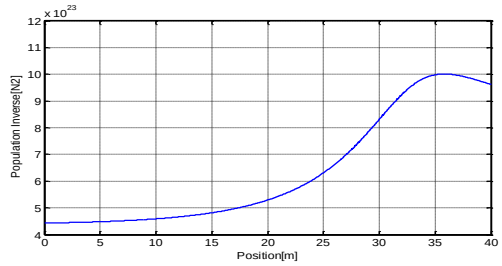
شکل (۱): توزیع توان‌های دمش سیگنال و استوکس در طول ۴۰ متر فیبر (الف) ساختار دمش روبه‌جلو (ب) دمش روبه عقب و (ج) ساختار دمش از دو انتها

تقریباً ۴۴۳ وات در ساختار دمش روبه‌جلو می‌باشد. این توان قوی می‌تواند آسیب‌های جدی به ادوات اپتیکی، ایزولاتورها، لیزردیودها و توری‌های براگ برساند. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، توان استوکس بریلویین 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 جذب‌شده 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. بعدازاین نقطه توان سیگنال روبه‌جلو به‌شدت در امتداد فیبر تقویت می‌یابد و در انتهای فیبر به ۵۲۰ وات می‌باشد. توان بریلویین روبه عقب در z=0، ۸۵ وات می‌باشد که در امتداد فیبر به‌آرامی کاهش

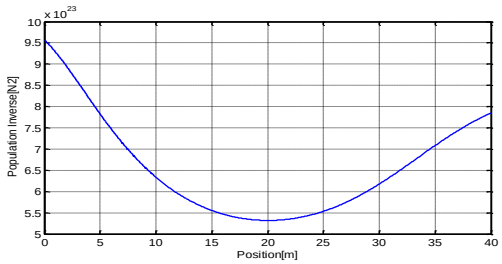
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]



(الف)



(ب)



(ج)

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

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 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 به‌صورت 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 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 روبه‌جلو جمعیت معکوس 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 پس‌ازآن 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 روبه‌جلو به خاطر برهمکنش زیاد فوتون‌های سیگنال با طول فیبر اثر بریلویین بیشتر مشاهده می‌شود. اثر برانگیختگی بریلویین القایی جمعیت معکوس را به‌سرعت 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 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.

٤. 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.

٥. 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.

٦. Luo, Z., et al., *Simplified analytic solutions and a novel fast algorithm for Yb< sup> 3+</sup>-doped double-clad fiber lasers.* Optics communications, 2007. **277**(1): p. 118-124.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]