بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

شبیه‌سازی طیف خروجی در یک لیزر تار نوری با پسخوراند توزیع‌شده‌ی تصادفی مبتنی بر طیف بهره‌ی رامان

فاطمه مزارعی، غلامرضا هنرآسا و حسن پاکارزاده

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

چکیده: در این مقاله، طیف خروجی لیزر تار نوری با پسخوراند توزیع‌شده‌ی تصادفی که امروزه یکی از لیزرهای جدید و مورد توجه به شمار می‌رود، شبیه‌سازی شده است. ابتدا معادلات تعادل توان برای توان ورودی پیوسته و ضریب بهره‌ی ثابت حل می شود و تحول توان پمپ به دست می آید. سپس با وارد کردن طیف بهره‌ی رامان در معادلات تعادل توان وابسته به طول‌موج، طیف خروجی محاسبه و تغییرات اندازه‌ی پهنای طیف خروجی به‌ازای توان‌های ورودی مختلف نشان داده می‌شود. در پایان وابستگی توان خروجی کل رو به عقب به توان ورودی، مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که هرچه توان پمپ ورودی افزایش یابد، پهنای طیف خروجی کاهش می‌یابد.

کلید واژه: لیزر تار نوری با پسخوراند توزیع‌شده‌ی تصادفی، طیف بهره‌ی رامان، روش تعادل توان، پراکندگی ریلی

Simulation of Output Spectrum in a Random Distributed Feedback Fiber Laser Based on Raman Gain Spectrum

Fatemeh Mazarei, Gholamreza Honarasa, Hassan Pakarzadeh

Department of Physics, Shiraz University of Technology, Shiraz

Abstract- In this paper, output spectrum of the random distributed feedback fiber laser that is considered as one of the modern and the most attractive lasers, is simulated. At first, the power balance equations with continuous input power and constant gain coefficient are solved and pump power evolution is obtained. Then, by including the Raman gain spectrum in the wavelength-dependent power balance equations, output spectrum is calculated and changes of output spectrum bandwidth for different input powers, are shown. Finally, dependence of backward total output power on the input power is investigated. The results show that as the input pump power is increased, the width of the output spectrum is decreased.

Keywords:Random distributed feedback fiber laser, Raman gain spectrum, Power balance method, Rayleigh scattering

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

۱- مقدمه

مفهوم تولید نور لیزر در محیط فعال تصادفی بدون کاواک ابتدا در سال ۱۹۶۶ توسط لتوخوو در حین مطالعات تابش بین ستاره‌ای معرفی شد [۱]. مفهوم کلی لیزرهای تصادفی، استفاده از پراکندگی چندگانه‌ی فوتون‌ها در یک محیط مختل شده همراه با تقویت به منظور تولید نور همدوس بدون کمک گرفتن از مشدد لیزری است که باعث شده است این نوع لیزرها در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گیرند.

در سال ۱۹۷۱ لیزرهای پسخوراند توزیع‌شده توسط کوگلنیک و شانک اختراع شد [۲]. در سال ۱۹۹۸ انواع مختلف عمل لیزری تصادفی توسط کائو نشان داده شد [۳و ۴]. همچنین کائوو همکارانش لیزرهای تصادفی را از نظر همدوس و یا غیر همدوس بودن نوع پسخوراند تقسیم‌بندی کردند [۵] . لیزر تصادفی در محیطهای فعال مختلفی از جمله پودرهای فعال [۳و ۴]، محلول‌های رنگی همراه با نانوذرات معلق در آن [۶]، فیلم‌های پلیمری که با رنگ و ذرات آلاییده شده‌اند [۷] می‌تواند اتفاق افتد.

به تازگی، نوع جدید و جذابی از لیزر تصادفی یک بعدی تار نوری معمولی بدون هیچ آینه‌ی مشدد از پیش طراحی شده‌ای موسوم به لیزر تار نوری با پسخوراند توزیع شده‌ی تصادفی نشان داده شده است [۸]. اولین لیزر تار نوری با پسخوراند توزیع شده‌ی تصادفی در سال ۲۰۱۰ ارائه شد و به سرعت جزء گروهی از منابع نوری توسعه یافت که به عنوان اختلال تار نوری ذاتی به شکل پراکندگی ریلی و بهره‌ی رامان توزیع شده مورد استفاده قرار گرفت [۵].

لیزر تار نوری تصادفی نمونه‌ای جالب و کاربردی مهم از یک وسیله‌ی فوتونیکی است که اساس آن بهره‌برداری از اختلال محیط نوری است [۹].

از لحاظ مفهومی در لیزر ارائه شده، نور پس پراکنده‌شده‌ی تصادفی (در اثر پراکندگی ریلی)، توسط اثر رامان تقویت می‌شود که باعث ایجاد بهره‌ای در مسافت بیش از ۱۰۰کیلومتر می‌شود. هرچند بازتاب موثر به دلیل پراکندگی ریلی بسیار کوچک (حدود ۰/۱٪) است، زمانی که بهره‌ی رامان توزیع‌شده به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد آستانه‌ی عمل لیزر ممکن است بیش از حد افزایش یابد. چنین لیزر تار نوری با پسخوراند توزیع شده‌ی تصادفی دارای خواص جالب و جذابی می‌باشد [۸].

از جمله کاربردهای این نوع لیزرها می‌توان به ارتباطات از راه دور و همچنین حسگرها اشاره کرد.

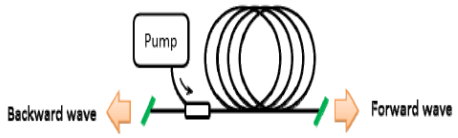
در این مقاله به کمک معادلات توان وابسته به طول موج و وارد کردن طیف بهره‌ی رامان در این معادلات تغییرات طیف توان خروجی را مورد مطالعه قرار می‌دهیم و در نهایت تغییرات پهنای طیف خروجی به‌ازای توان‌های ورودی مختلف را بررسی می‌کنیم.

۲- مدل‌سازی با روش تعادل توان

از جمله مدل‌های ریاضی‌ای که عملکرد لیزرهای تار نوری DFB (distributed feedback) تصادفی را توصیف می‌کنند، روش تعادل توان می‌باشد.

روش تعادل توان بر پایه‌ی تحلیل معادلاتی است که تحول توان میانگین را توصیف می‌کنند. این مدل در تمام اثرات فیزیکی مهم از جمله افت‌های تار نوری، بهره‌ی رامان، تخلیه‌ی پمپ، گسیل خود به خودی تقویت‌شده، پراکندگی روبه عقب ریلی و انتشار از طریق تار به کار می‌رود. این روش برای توصیف ویژگی‌های کلیدی لیزرهای تار نوری DFB تصادفی عملکرد نسبتا خوبی دارد و همچنین به طور گسترده برای طراحی و بهینه کردن لیزرهای تار نوری رامان و تقویت‌کننده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

چیدمان یک لیزر تار نوری DFB تصادفی در شکل۱ قابل مشاهده و معادلات مربوط به این پیکربندی در رابطه (۱) ارائه شده است.



شکل۱: پیکربندی لیزر تار نوری با پسخوراند توزیع‌شده‌ی تصادفی.

(۱)

$$\text{که}\begin{cases}(\alpha_p + d/dz)P_p = -g_{\max}P_p(P_s^+ + P_s^- + 4h\nu_s\Delta\nu)\dfrac{\nu_p}{\nu_s}\\ (\alpha_s \pm d/dz)P_s^{\pm} = -g_{\max}P_p(P_s^{\pm} + 2h\nu_s\Delta\nu) + \varepsilon.P_s^{\mp}\end{cases}$$

در آن P توان و زیروندهای p و s به ترتیب امواج پمپ و استوکس را نشان می‌دهند. بالانویس‌های + و − به ترتیب برای امواج تولید شده‌ی پیشرو (انتشار در جهت محور z) و پسرو (در خلاف جهت محور z) به کار برده می‌شوند. ضریب α افت خطی و $g_{\max}$ ضریب بیشینه‌ی بهره‌ی رامان را در

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

قله‌ی طیف تقویت نشان می‌دهد. ν فرکانس تابش، $\Delta\nu$ پهنای باند طیف بهره‌ی رامان، ε پراکندگی رو به عقب ریلی است که از حاصلضرب α_s در فاکتور پراکندگی رو به عقب یعنی Q به دست می‌آید. این فاکتور با مقیاس‌های هندسی تار اندازه‌گیری می‌شود و قسمتی از تابش پراکنده‌شده‌ای است که مجددا توسط موجبر تار دریافت شده و در خلاف جهت شروع به انتشار می‌کند.

شرایط مرزی برای این نوع لیزرها به صورت زیر است.

$$\begin{cases} P_p(0) = \mathrm{P}_{in} \\ P_s^+(0) = P_s^-(L) = 0 \end{cases} \quad (۲)$$

که در رابطه‌ی (۲)، P_{in} توان پمپ ورودی و L طول تار است.

۳- طیف خروجی

برای اینکه بتوان طیف خروجی را برای این نوع لیزر محاسبه کرد وابستگی طول‌موجی توان یعنی $\mathrm{P_s}(\lambda)$ و طیف بهره‌ی رامان ($g(\lambda)$) در رابطه‌ی (۱) وارد می‌شوند. در نهایت شکل معادلات توان در رابطه (۱) به معادلات (۳) تبدیل می‌شوند.

(۳)

$$\begin{cases} (\alpha_p + d/dz)P_p = -g_{\max}P_p\left(\int g(\lambda)\mathrm{P}_s^+(\lambda)\mathrm{d}\lambda \right. \\ \qquad \left. + \int g(\lambda)\mathrm{P}_s^-(\lambda)\mathrm{d}\lambda + 4\mathrm{h}\nu_s\Delta\nu\right)\frac{\nu_p}{\nu_s} \\ (\alpha_s \pm d/dz)P_s^{\pm}(\lambda) = g(\lambda)P_p(\mathrm{P}_s^{\pm}(\lambda) \\ \qquad + 2\mathrm{h}\nu_s\Delta\nu) + \varepsilon.\mathrm{P}_s^{\mp}(\lambda) \end{cases}$$

در معادلات (۳) تابع طیف بهره‌ی رامان با کمک روابط زیر محاسبه می‌گردد. بهره‌ی رامان از دو قسمت همسانگرد (g_a) و ناهمسانگرد (g_b) تشکیل شده است:

$$g(\omega) = \mathrm{g}_a(\omega) + \mathrm{g}_b(\omega) \quad (۴)$$

هر یک از این قسمت‌ها به دو تابع پاسخ غیر خطی رامان (R) و پاسخ زمانی (h) وابسته‌اند و با توجه به روابط زیر بهره‌ی رامان به دست می‌آید [۱۰].

رابطه‌های(۵) و (۶) پاسخ غیر خطی رامان را نشان می‌دهند.

$$R_a = f_a h_a(\tau) \quad (۵)$$

$$R_b = f_b h_b(\tau) + f_c h_a(\tau) \quad (۶)$$

پاسخ زمانی با کمک روابط (۷) و (۸) به دست می‌آید.

$$\mathrm{h}_a(\tau) = \tau_1(\tau_1^{-2} + \tau_2^{-2})\exp(-\tau/\tau_2)\sin(\tau/\tau_1) \quad (۷)$$

$$\mathrm{h}_b(\tau) = [(2\tau_b - \tau)/\tau_b{}^2]\exp(-\tau/\tau_b) \quad (۸)$$

با جایگذاری روابط مربوط به پاسخ زمانی (روابط ۷ و ۸) در روابط پاسخ غیر خطی رامان (روابط ۵و ۶) و با محاسبه‌ی تبدیل فوریه‌ی آن می‌توان به روابط مربوط به بهره‌ی رامان به صورت زیر دست یافت.

$$\mathrm{g}_a(\omega) = 2\gamma\,\mathrm{f}_R\,\mathrm{Im}[\tilde{\mathrm{R}}_a(\omega)] \quad (۹)$$

$$\mathrm{g}_b(\omega) = 2\gamma\,\mathrm{f}_R\,\mathrm{Im}[\tilde{\mathrm{R}}_b(\omega)] \quad (۱۰)$$

تبدیل فوریه‌ای که در روابط(۹) و (۱۰) وجود دارد از طریق رابطه‌ی (۱۱) به دست می‌آید:

$$\tilde{R}_j(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_j(\tau)\exp(\mathrm{i}\,\omega\tau)\mathrm{d}\tau \quad , j = a,b \quad (۱۱)$$

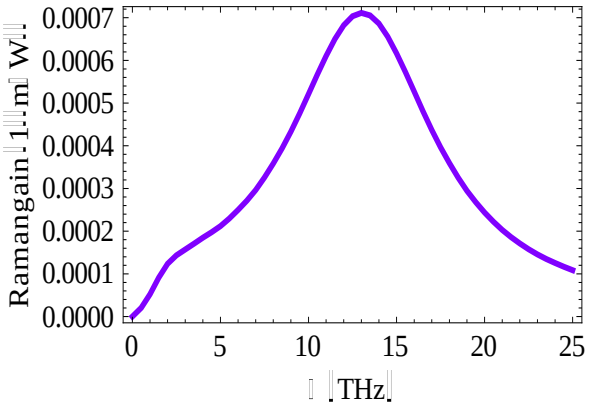
مقادیر عددی پارامترهای موجود در روابط بالا به شکل زیر هستند.

$$f_a = 0.75 \text{ ،} \tau_b = 96fs \text{ ،} \tau_2 = 32fs \text{ ،} \tau_1 = 12.2fs \text{ ،}$$

$$f_R = 0.245 \text{ ،} f_c = 0.04 \text{ ،} f_b = 0.21$$

۴- نتایج و بحث‌های مربوطه

با کمک حل معادلات (۱) و شرایط مرزی مربوط به رابطه (۲) تحول توان پمپ ($P_p(\mathrm{z})$) در طول تار را محاسبه می‌کنیم. سپس طیف بهره‌ی رامان را با کمک روابط مربوط به آن مطابق با شکل ۲ به دست می‌آوریم.



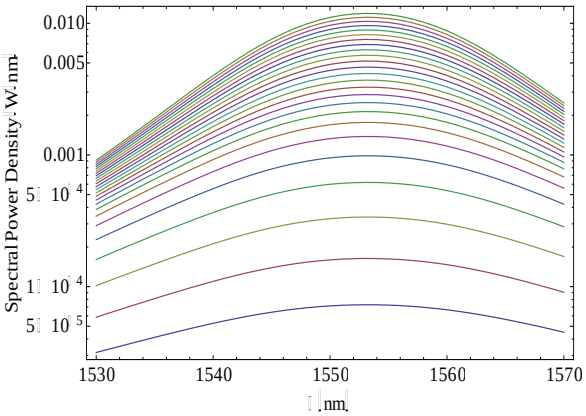
شکل۲: طیف بهره‌ی رامان.

با جایگذاری طیف رامان (شکل۲) در رابطه (۳) و با کمک $P_p(\mathrm{z})$ به دست آمده از رابطه (۱) طیف توان خروجی به دست می‌آید. در شکل۳ طیف توان خروجی به‌ازای توان‌های ورودی مختلف نشان داده شده‌است.

چنانچه در شکل ۳ مشاهده می‌شود با افزایش توان ورودی مختلف (از ۰/۲W تا ۱/۸W) پهنای طیف توان خروجی باریک‌تر شده و تغییرات طیف به حالت پایدار نزدیک‌تر می‌شود.

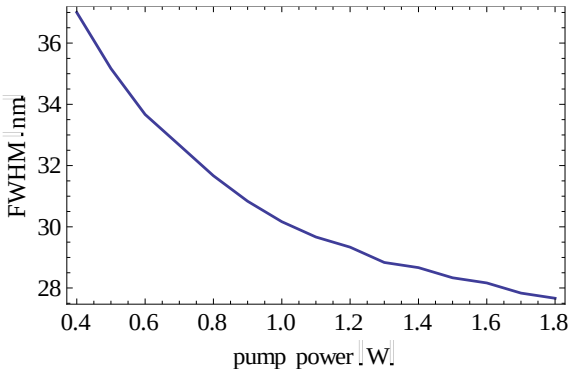
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]



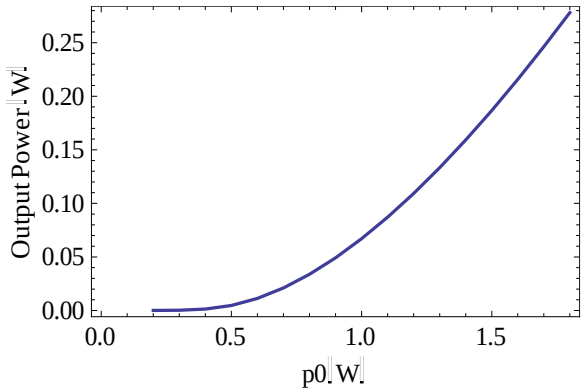
شکل۳: تحول طیف توان خروجی به‌ازای توان‌های ورودی مختلف.

برای درک بهتر، تغییرات اندازه‌ی پهنای طیف توان خروجی به‌ازای توان‌های ورودی مختلف در شکل۴ رسم شده است.



شکل۴: تغییرات اندازه‌ی پهنای طیف توان خروجی به‌ازای توان‌های ورودی مختلف.

شکل۴ نشان می‌دهد وابستگی مقدار پهنای توان خروجی به توان ورودی بدین صورت است که با افزایش توان ورودی پهنای طیف توان خروجی کاهش می‌یابد.



شکل۵: تغییرات توان خروجی رو به عقب به‌ازای توان‌های ورودی مختلف

در انتها توان استوکس خروجی رو به عقب را برای تمام طول‌موج‌های مد نظر با کمک رابطه‌ی $\int P_S^-(\lambda)d\lambda$، برحسب توان پمپ (ورودی) به دست آورده و در شکل۵ نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که توان آستانه‌ی لیزر تقریبا ۰/۶W است و با افزایش توان ورودی، توان خروجی نیز افزایش می‌یابد.

۵- نتیجه‌گیری

لیزر تار نوری با پسخوراند توزیع‌شده‌ی تصادفی به سبب پیکربندی ساده و بدون آینه‌ای که دارد از جمله لیزرهای مهم در حال حاضر به شمار می‌رود. در رهیافت ارائه‌شده و با وارد کردن طیف بهره‌ی رامان در معادلات تعادل توان با وجود توان ورودی پیوسته، می‌توان طیف توان خروجی و تغییرات و وابستگی آن به توان ورودی را محاسبه کرد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش توان ورودی پهنای طیف توان خروجی کاهش و توان خروجی افزایش می‌یابد.

مراجع

[1] V. S. Letokhov, “Stimulated radio emission of the interstellar medium”; Jetp Lett., Vol. 4,No. 11, pp. 321, 1966.

[2] H. Kogelnik, C.V. Shank, “Stimulated emission in a periodic structure”; Appl. Phys. Lett. Vol. 18, No. 4, pp. 152-154, 1971.

[3] H. Cao, Y. Zhao, H. Ong, S. Ho, J. Dai, J. Wu and R. Chang, “Ultraviolet lasing in resonators formed by scattering in semiconductor polycrystalline films”; Appl. Phys. Lett., Vol. 73, No. 25, pp. 3656–3658, 1998.

[4] H. Cao, Y. Zhao, S. Ho, E. Seelig, Q. Wang and R. Chang, “Random laser action in semiconductor powder”; Phys. Rev. Lett., Vol. 82, No. 11, pp. 2278, 1999.

[5] H. Cao, “Review on latest developments in random lasers with coherent feedback”; J. Phys. A: Math. Gen., Vol. 38, pp. 10497–10535, 2005.

[6] N. M. Lawandy, R. M. Balachandran, A. S. L. Gomes and E. Sauvain, “Laser action in strongly scattering media”; Nature, Vol. 368, No. 6470, pp. 436–438, 1994.

[7] G.Zacharakis, N. A. Papadogiannis, G. Filippidis and T. G. Papazoglou, “Photon statistics of laserlike emission from polymeric scattering gain media”; Opt. Lett, Vol. 25, No. 12, pp. 923, 2000.

[8] S. K. Turitsyn, S. A. Babin, D. V. Churkin, I. D. Vatnik, M. Nikulin, E. V. Podivilov, “Random distributed feedback fibre lasers”; Physics Reports, Vol. 542, No. 2, pp. 133-193, 2014.

[9] D. V. Churkin, S. Sugavanam, I. D. Vatnik, Z. Wang, E. V. Podivilov, S. A. Babin, Y. Rao, S. K. Turitsyn, “Recent advances in fundamentals and applications of random fiber laser”; Adv. Opt. Photonics, Vol. 7, No. 3, pp. 516, 2015.

[10] Q. Lin, G. P. Agrawal, “Raman response function for silica fibers”, Opt. Let., Vol. 31, No. 21, pp. 3086, 2006.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]