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

شبیه‌سازی و بهینه‌سازی تقویت‌کننده‌ی فیبری ایتربیوم توان بالا برای پالس‌های نانوثانیه

حسین خلیلی راد[۱]، ابوالقاسم زیدآبادی نژاد[۱]، محمد جواد حکمت[۱و۲]

[۱]دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان
[۲]آزمایشگاه تحقیقاتی لیزر فیبری، صنایع اپتیک اصفهان

در این مقاله به شبیه‌سازی و بهینه‌سازی تقویت‌کننده‌ی فیبری دو-غلاف ایتربیوم (*YDDC*) برای تقویت‌کنندگی پالس‌های نانوثانیه با نرخ تکرار کیلوهرتز پرداخته می‌شود. در ابتدا مدل معادلات نرخ دینامیکی برای تقویت‌کننده‌ی فیبری *YDDC* معرفی می‌شوند و حل عددی معادلات با روش تفاضل محدود (*FDM*) توضیح داده می‌شود. با استفاده از این مدل مشخصه‌های مختلف تقویت‌کننده‌ی فیبری *YDDC* مانند تحول شکل پالس ، انرژی پالس خروجی و توان متوسط گسیل خود به خودی تقویت شده (*ASE*) بین دو پالس بر حسب انرژی پالس ورودی پالس شبیه‌سازی می‌شوند. در نهایت طول تقویت‌کننده برای حداکثر توان متوسط خروجی در طول‌موج‌های پمپ *915 nm* و *976 nm* برای پمپ رو به جلو، رو به عقب و دو طرفه بهینه‌سازی می‌شود.

کلید واژه- تقویت‌کننده‌ی فیبری دو-غلاف ایتربیوم پالسی، معادلات نرخ دینامیکی، گسیل خود به خودی تقویت شده، بهینه سازی تقویت‌کنندگی پالس. روش تفاضل محدود (FDM)

Simulation and Optimization of High Power Ytterbium-Doped Fiber Amplifier for Nanosecond Pulses

Hossein Khalili Rad[1], Abolghasem Zeidaabadi Nezhad[1], Mohammad Javad Hekmat[1,2]

[1]Isfahan University of Technology
[2]Fiber Laser Research Lab, Isfahan Optics Industry

In this paper, the simulation and optimization of Ytterbium-Doped Double-Clad (YDDC) fiber amplifier for amplification of nanosecond pulses with kilohertz repetition rate is presented. First dynamic rate equation model for YDDC fiber amplifier is presented and numerical solution with finite difference method (FDM) is explained. Using this model, several characteristics of YDDC fiber amplifiers such as evolution of pulse waveform, output pulse energy and average output power of inter-pulse Amplified Spontaneous Emission (ASE) versus input pulse energy is simulated. Eventually amplifier length is optimized for maximum average output power in the 915-nm and 976-nm wavelength for forward, backward and bidirectional pump.

Keywords: Ytterbium-doped Double-Clad pulse fiber amplifier, dynamic rate equations, amplified Spontaneous emission, optimization of pulse amplifier.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30]

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

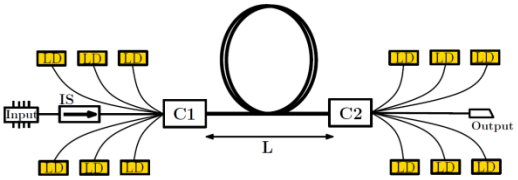
۱- مقدمه

لیزرهای پالسی نانوثانیه با قله‌ی توان بالا کاربردهای متنوعی در صنعت، مخابرات و امور نظامی مانند حکاکی، جوشکاری لیزری، فاصله‌یابی، سنجش از راه دور، مخابرات نوری با اعماق فضا، لیدار و غیره دارند [۱]. یک روش پیاده‌سازی لیزرهای پالسی نانوثانیه استفاده از تقویت‌کننده‌ی توان با نوسانگر اصلی (MOPA) است. در این روش انرژی یک نوسانگر توسط یک تقویت‌کننده‌ی توان بالا افزایش می‌یابد. این روش قابلیت‌های زیادی مانند تنظیم شکل، عرض، نرخ تکرار پالس خروجی را ممکن می‌سازد [۲]. با پیاده‌سازی تقویت‌کننده‌ی توان بالا با فیبرهای با آلایش ایتربیوم دو- غلاف (YDDC) می‌توان از مزایای تقویت‌کننده‌ی فیبری مانند کیفیت پرتوی بالا، بازدهی بالا، اطمینان- پذیری بالا، فشردگی و غیره در این آرایش بهره برد [۳]. در این مقاله به تحلیل تئوری و بهینه‌سازی لیزر پالسی نانوثانیه با آرایش MOPA توسط تقویت‌کننده‌ی فیبری دو-غلاف (FMOPA) پرداخته شده است. در بخش-۲ مدل تئوری تقویت‌کننده فیبری پالسی، در بخش-۳ نتایج شبیه‌سازی تقویت کننده‌ی فیبری YDDC و نهایتاً در بخش-۴ طول بهینه تقویت کننده فیبری YDDC برای پالس‌های نانوثانیه را ارائه می‌دهیم.

۲- پیکره‌بندی و مدل تئوری تقویت‌کننده‌ی فیبری YDDC

پیکره بندی یک تقویت‌کننده‌ی YDDC که از دو طرف توسط کوپلرهای C1 و C2 پمپ شده، در شکل ۱ نشان داده شده است. در این شکل IS ایزولاتور ورودی است. فیبر فعال به طول L از انتها برش زاویه‌دار داده شده تا از بازتاب سطح جلوگیری شود. معادلات نرخ توصیف‌کننده‌ی تقویت‌کننده‌ی فیبری YDDC به صورت زیر هستند [۴]

$$\begin{aligned}\frac{dN_2(z,t)}{dt}&=\frac{\Gamma_p\lambda_p}{hcA}\left[\sigma_a(\lambda_p)N_1(z,t)-\sigma_e(\lambda_p)N_2(z,t)\right]\\&\times\left[P_p^+(z,t)+P_p^-(z,t)\right]-\frac{N_2}{\tau}\\&+\frac{\Gamma}{hcA}\sum_{k=1}^{K}\lambda_k\left[\sigma_a(\lambda_k)N_1(z,t)-\sigma_e(\lambda_k)N_2(z,t)\right]\\&\times\left[P^+(z,t,\lambda_k)+P^-(z,t,\lambda_k)\right]\end{aligned}\qquad(۱)$$



شکل ۱: پیکره بندی یک تقویت‌کننده‌ی فیبری نمونه که از دو طرف پمپ شده. L: طول فیبر YDDC. C1 و C2: کوپلرهای ورودی و خروجی. LD لیزر دیودهای پمپ. IS: ایزولاتور ورودی.

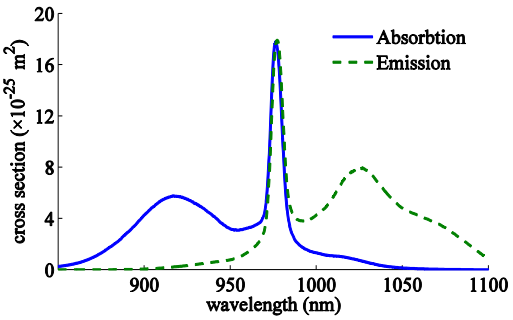
$$N=N_1+N_2\qquad(۲)$$

$$\begin{aligned}\frac{dP_p^{\pm}(z,t)}{dz}&=-\Gamma_p\left[\sigma_a(\lambda_p)N_1(z,t)-\sigma_e(\lambda_p)N_2(z,t)\right]\\&\times P_p^{\pm}(z,t)-\alpha(\lambda_p)P_p^{\pm}(z,t)\end{aligned}\qquad(۳)$$

$$\begin{aligned}\frac{dP^{\pm}(z,t,\lambda_k)}{dz}&=-\Gamma\left[\sigma_a(\lambda_k)N_1(z,t)-\sigma_e(\lambda_k)N_2(z,t)\right]\\&\times P^{\pm}(z,t,\lambda_k)-\alpha(\lambda_k)P^{\pm}(z,t,\lambda_k)\\&+2\sigma_e(\lambda_k)N_2(z,t)\frac{hc^2}{\lambda_k^3}\Delta\lambda\qquad k=1,\ldots,K\end{aligned}\qquad(۴)$$

که در آن $\frac{dP^{\pm}}{dz}=\pm\frac{\partial P^{\pm}}{\partial z}+\frac{1}{\upsilon}\frac{\partial P^{\pm}}{\partial t}$ می‌باشد. در معادلات (۱) تا (۴)، N غلظت ناخالصی ایتربیوم می‌باشد که در طول فیبر یکنواخت فرض شده است. N_1 و N_2 به ترتیب جمعیت‌های تراز پایه و بالا به صورت تابع زمان t و مختصه z هستند. $P_p^{\pm}(z,t)$ توان پمپ و $P^{\pm}(z,t,\lambda_k)$ توان ASE در هر کانال می‌باشد ($\pm$ به ترتیب متناظر با انتشار به جلو و عقب است). در حضور سیگنال مستقیم $P^{+}(z,t,\lambda_s)$ نشان دهنده‌ی توان سیگنال است. υ و υ_p سرعت‌های گروه پمپ و ASE در هر کانال هستند. σ_a و σ_e به ترتیب سطح مقطع‌های جذب و گسیل یون‌های ایتربوم هستند که در شکل ۲ نشان داده شده است. λ_p (λ_k) طول‌موج پمپ (کانال‌های ASE) و τ طول‌عمر تراز بالای یون‌های ایتربیوم (تقریباً برابر ۸۴۰-μs)، A سطح‌مقطع هسته آلایش شده‌ی فیبر، Γ_p (Γ) ضریب همپوشانی میان پمپ (ASE) در فیبر آلایش شده است. α ضریب تضعیف فیبر است. c سرعت نور در خلأ و h ثابت پلانک است. شرایط مرزی مربوط به معادلات دیفرانسیل جزئی (۱) تا (۴) در (۵) داده شده است

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30]



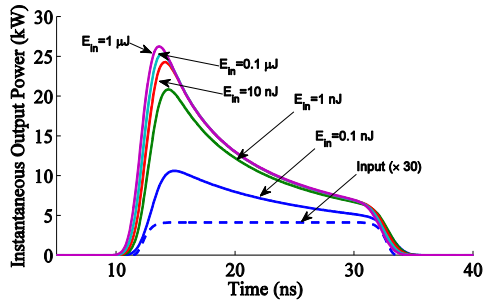
شکل ۲: نمودار سطح مقطع گسیل و جذب یون‌های ایتربیوم (Yb)که در شبیه سازی استفاده شده است.

$$\begin{aligned} &P_p^+(0)=P_1 \qquad P_p^-(L)=P_2 \\ &P^+(0,t,\lambda_k)=0, P^-(L,t,\lambda_k)=0 \\ &\qquad k=0,\dots K, \quad \text{and} \quad k\neq s \\ &P^+(0,t,\lambda_s)=P_{in}(t) \qquad P^-(L,t,\lambda_s)=0 \end{aligned} \tag{۵}$$

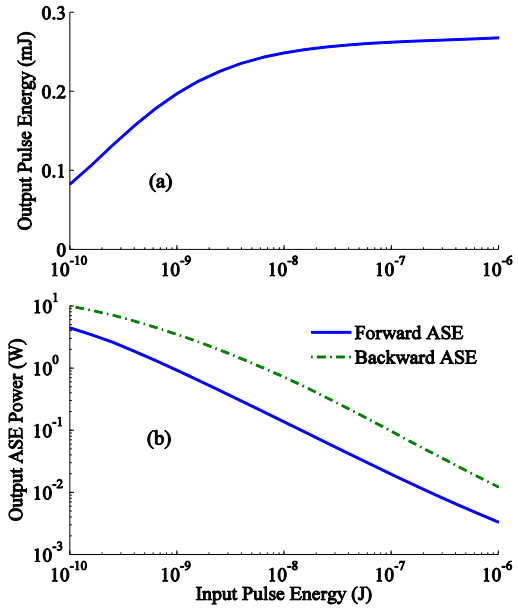
معادلات (۱)-(۵) یک دستگاه معادله دیفرانسیل جزئی با $2K+2$ معادله است. برای دقت کافی، طیف ASE را از $\lambda_1 = 1020\,\text{nm}$ تا $\lambda_K = 1100\,\text{nm}$ و پهنای باند ASE را برابر $\Delta\lambda = 2\,\text{nm}$ انتخاب می‌کنیم. با این انتخاب‌ها $K=41$ به دست می‌آید. می‌توان این معادلات را با روش تفاضل محدود (FDM) حل کرد [۵]، [۶]. در این‌جا از طرح معروف به پاد بادسو (Up-wind scheme) به فرم زیر برای گسسته‌سازی معادلات فوق استفاده شده است [۷]

$$\begin{aligned} &\frac{\partial P^+}{\partial t}=\frac{P^+_{n,k+1}-P^+_{n,k}}{\Delta t} \qquad \frac{\partial P^+}{\partial z}=\frac{P^+_{n,k}-P^+_{n-1,k}}{\Delta z} \\ &\frac{\partial P^-}{\partial t}=\frac{P^-_{n,k+1}-P^-_{n,k}}{\Delta t} \qquad \frac{\partial P^-}{\partial z}=\frac{P^-_{n+1,k}-P^-_{n,k}}{\Delta z} \end{aligned} \tag{۶}$$

در معادلات (۶)، $P^+(z,t)$ و $P^-(z,t)$ به ترتیب امواج منتشر شونده رو به جلو و رو به عقب هستند. k و n به ترتیب نشان دهنده‌ی نقاط زمان و مکان است. Δt و Δz باید در شرط پایداری $\upsilon\Delta t/\Delta z<1$ صدق کنند. برای به دست آوردن شرایط اولیه، معادلات نرخ حالت دائم ($\partial/\partial t=0$) را با روش تکرار رانج- کوتا حل می‌کنیم. روش حل فوق در محیط کدنویسی FORTRAN-95 پیاده‌سازی شده استدر این شبیه‌سازی‌ها از فیبر دو-غلاف ایتربیوم با قطر هسته و غلاف پمپ به ترتیب برابر ۲۰ و ۴۰۰ µm و ضریب جذب پمپ ۳ dB/m در طول‌موج ۹۷۶ nm و سطح مقطع‌های شکل ۲ استفاده شده است.



شکل ۳: توان لحظه‌ای خروجی تقویت‌کننده‌ی فیبری YDDC برای پالس‌های ورودی سوپر-گوسی با عرض ۲۰ ns و انرژی ۰/۱-nJ تا ۱-µJ.



شکل ۴: نمودار (a) انرژی پالس خروجی تقویت‌کننده (b) گسیل خود به خودی تقویت شده خروجی رو به جلو و رو به عقب، بر حسب انرژی پالس ورودی.

۳- نتایج شبیه‌سازی

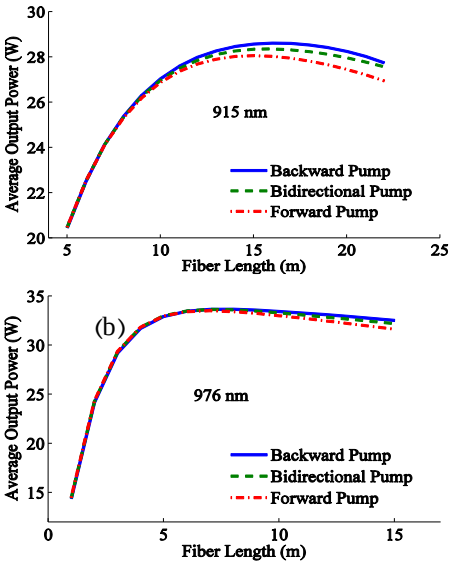
به منظور بررسی اثر تقویت‌کننده بر شکل پالس، شکل ۳ خروجی تقویت‌کننده‌ی فیبری YDDC را برای پالس ورودی سوپر-گوسی با رابطه‌ی $\exp[-(t/t_0)^{2m}]$ و عرض پالس ۲۰ ns و انرژی ۰/۱-nJ تا ۱-µJ، نشان می‌دهد. با انتخاب $m=11$ تقریب خوبی از خروجی لیزر دیودهایی که مستقیماً مدوله شده اند به دست می‌آید. از این شکل دیده می‌شود که با افزایش انرژی پالس ورودی، انرژی پالس خروجی(مساحت زیر پالس) نیز افزایش می‌یابد، اما با افزایش بیشتر، به دلیل پدیده‌ی اشباع، سرعت افزایش انرژی پالس خروجی کاهش می‌یابد. همچنین برای ورودی‌های قوی‌تر خروجی تقویت‌کننده دچار اعوجاج

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30]

شده بیشتری است. در واقع بخش جلویی پالس حین انتشار در فیبر بیشتر تقویت می‌شود در حالی که بخش انتهایی پالس تقویت کمتری را می‌بینند. شکل ۴، انرژی پالس خروجی بر حسب انرژی پالس ورودی را برای پالس‌های گوسی با عرض ۴۰ ns و طول‌موج پمپ ۹۱۵ nm و توان پمپ ۴۰ W نشان می‌دهد. چون پمپ رو به جلو اعمال شده، توان ASE رو به عقب همواره از ASE رو به جلو بیشتر است. از شکل ۴(a) مشاهده می‌شود که که بعد از $E_{in}=10^{-8}$ J انرژی پالس ورودی تغییر زیادی نمی‌کند و تقویت‌کننده اشباع شده است ولی توان ASE رو به عقب در $E_{in}=10^{-8}$ J غیر قابل چشم پوشی (≈۰/۷ W) است .در شکل ۴(b) با افزایش انرژی پالس ورودی ، توان گسیل خود به خودی تقویت‌شده کاهش می‌یابد. برای حذف ASE کل باید انرژی پالس ورودی را حداقل برابر $E_{in}=1\ \mu J$ انتخاب کنیم.

۴- طول بهینه

شکل ۵ تغییرات توان متوسط خروجی بر حسب طول فیبر را برای دو طول‌موج ۹۱۵ nm و ۹۷۶ nm و توان پمپ ۴۰ W، برای سه روش مختلف پمپ، نشان می‌دهد. $E_{in}=1\ \mu J$ انتخاب شده است. از شکل نتیجه می‌شود که مقدار طول فیبر بهینه تقریباً به روش پمپ کردن بستگی ندارد و برای طول‌موج ۹۱۵ nm و ۹۷۶ nm به



شکل ۵: توان متوسط خروجی بر حسب طول فیبر YDDC برای طول موج پمپ (a) λ_p = ۹۱۵-nm (b) λ_p = ۹۷۶-nm و توان پمپ ۴۰-W.

ترتیب برابر ۱۵ و ۷ متر است. طول بهینه برای طول‌موج ۹۷۶ nm کوتاه‌تر از ۹۱۵ nm است که دلیل آن سطح مقطع جذب بزرگتر در ۹۷۶ nm می‌باشد. همچنین توان متوسط در طول‌موج ۹۷۶ nm بزرگ‌تر از طول‌موج ۹۱۵ nm است که دلیل آن بازدهی کوانتومی بالاتر طول‌موج ۹۷۶ nm است. پمپ رو به عقب بیشترین و پمپ رو به جلو کمترین توان خروجی را می‌دهند. از این شکل‌ها مشاهده می‌شود که توان متوسط خروجی به بلند بودن فیبر نسبت به مقدار بهینه کمتر حساس است که دلیل آن رفتار شبه چهار ترازی یون Yb در طول‌موج سیگنال ۱۰۶۴ nm است.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله با حل عددی معادلات نرخ دینامیکی، مشخصه‌های مختلف تقویت‌کننده‌ی فیبری YDDC بررسی شد. مشاهده شد که پالس سوپرگوسی حین انتشار در تقویت‌کننده به دلیل اشباع دچار اعوجاج می‌شود. برای استخراج کامل انرژی ذخیره شده در فیبر و همچنین حذف ASE رو عقب باید انرژی پالس ورودی بالا باشد. طول بهینه در طول‌موج پمپ ۹۱۵ nm و ۹۷۶ nm با یکدیگر اختلاف زیادی دارند و توان متوسط خروجی ۹۷۶ nm بیشتر از ۹۱۵ nm می‌باشد. همچنین پمپ رو به عقب بیشترین و پمپ رو به جلو کمترین توان متوسط خروجی را تولید می‌کنند ولی اختلاف آن‌ها قابل چشم‌پوشی است.

مراجع

[1] Wright M.W. and Valley G.C., *Yb-doped fiber amplifier for deep-space optical communications*, **J. Lightw. Technol.** 23 (2005) 1369-1374.

[2] Limpert, J., Höfer, S., Liem, A., Zellmer, H. ,Tünnermann, A., Knoke, S. and Voelckel, H., *100-W average-power, high-energy nanosecond fiber amplifier*, **Applied Physics B.** 75 (2002) 477-479

[3] Digonnet M.J.F., *Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and Amplifiers, Revised and Expanded*, **Taylor & Francis**, 2001.

[4] Hardy, Amos and Oron, R., *Signal amplification in strongly pumped fiber amplifiers*, **IEEE J. Quantum Electron.** 33 (1997) 307-313.

[5] Yong, Wang. and Hong Po, *Dynamic characteristics of double-clad fiber amplifiers for high-power pulse amplification*, **J. Lightw. Technol.** 21 (2003) 2262-2270.

[6] Yong, Wang., *Optimization of pulse amplification in ytterbium-doped double-clad fiber amplifiers*, **J. Lightw. Technol.** 23 (2005) 2139-2147

[7] Li X., *Optoelectronic Devices: Design, Modeling, and Simulation*, **Cambridge University Press**, 2009.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30]