

بررسی عددی تقویتگر فیبری لیزر پالسی نانوثانیه ای در محیط بهره ی هم آلاینده ی اربیوم- ایتربیوم

عباس جابرمردی، آتوسا سادات عربانیان و رضا مسعودی

دانشگاه شهید بهشتی - پژوهشکده ی لیزر و پلاسما

چکیده - در این مقاله نتایج طراحی تقویت گر پالس لیزر نانوثانیه ای بر پایه ی محیط بهره فیبری هم آلاینده اربیوم- ایتربیوم، با طول موج مرکزی ۱۵۵۰ نانومتر را ارائه داده و تغییرات ASE در طول فیبر فعال دارای دمش پیوسته را بدون حضور سیگنال مطالعه می کنیم. همچنین تغییرات زمانی بیشینه ی ASE در حضور پالس سیگنال بررسی شده و تقویت پالس سیگنال فرودی با پهنای زمانی ۱۰ نانوثانیه و شکل پالس مربعی و توان ۰.۳ وات را شبیه سازی می کنیم.

کلید واژه- لیزر پالسی نانوثانیه، هم آلاینده ی اربیوم ایتربیوم، نوسان ساز اصلی تقویت کننده ی توان، تابش خود به خودی تقویت شده

Numerical Study of Fiber Amplifier of Nanosecond Laser Pulse in Er:Yb Codoped Gain Medium.

Abbas Jabermoradi, Atoosa Sadat Arabanian, and Reza Massudi

Shahid Beheshti University-laser & plasma research institute

Abstract- We report on the design of a nanosecond Er:Yb co-doped fiber amplifier with 1550nm central wavelength and verify ASE variation along the continuously pumped active fiber in absence of signal pulse. In addition, the temporal variation of ASE maxima in the presence of the signal pulse is investigated and amplification of the squared signal pulse with duration of 10ns and the power of 0.3-W.

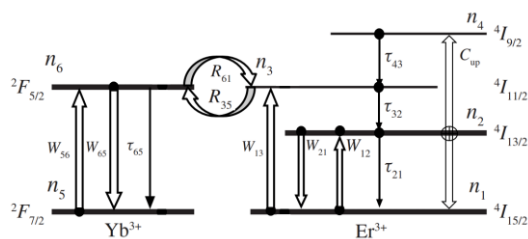
Keywords: nanosecond pulsed laser, erbium-ytterbium codoped, Master Oscillator Power Amplifier, Amplified Spontaneous Emission

۱- مقدمه

روی بازده و توان خروجی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- تئوری و معادلات ریاضی

ترازهای انرژی محیط بهره‌ی هم‌آلاییده‌ی اربوم-ایتربیوم در شکل ۱ نمایش داده شده است. جذب باریکه‌ی دمش توسط یون‌های تراز ${}^2F_{7/2}$ ایتربیوم و تراز ${}^4I_{15/2}$ اربوم انجام شده و جمعیت یونی به ترازهای ${}^2F_{5/2}$ و ${}^4I_{11/2}$ جابه‌جا می‌شوند. ترازهای گسیل لیزری ${}^4I_{13/2}$ و ${}^4I_{9/2}$ می‌باشند و سیگنال بین این دو تراز تقویت می‌شود. ایتربیوم انرژی خود را به صورت غیرتابشی به اربوم داده و چون طول عمر تراز ${}^4I_{11/2}$ کوتاه می‌باشد سریعاً به تراز بالای لیزری فروافت می‌کند. اگر یون اربومی که ایتربیوم انرژی خود را به آن دهد نیز باریکه‌ی دمش را مستقیم جذب کند، [۲] فرآیند بالابتدیل اتفاق افتاده و یک الکترون به تراز پایه‌ی اربوم و الکترون دیگر که انرژی را از طریق فرآیند بالابتدیل بدست آورده به تراز ${}^4I_{9/2}$ می‌رود و به سرعت به تراز ${}^4I_{13/2}$ فروافت می‌کند ($\tau_{43} \approx 0$). معادلات نرخ توصیف کننده‌ی چگالی جمعیت ترازهای سیستم اربوم-ایتربیوم به صورت معادلات (۱) نوشته می‌شود [۲]:



شکل ۱: ترازهای انرژی سیستم هم‌آلاییده‌ی اربوم-ایتربیوم

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_2}{\partial t} &= -\frac{n_2}{\tau_{21}} + \frac{n_3}{\tau_{32}} + W_{12}n_1 - W_{21}n_2 \\ &\quad - 2C_{up}N_{Er}n_2^2 \\ \frac{\partial n_3}{\partial t} &= -\frac{n_3}{\tau_{32}} + W_{13}n_1 + R_{61}N_{Yb}n_6n_1 \\ &\quad - R_{35}N_{Yb}n_3n_5 + C_{up}N_{Er}n_2^2 \\ \frac{\partial n_6}{\partial t} &= -\frac{n_6}{\tau_{65}} + W_{56}n_5 - W_{65}n_6 \\ &\quad - R_{61}N_{Er}n_6n_1 + R_{35}N_{Er}n_3n_5 \\ n_1 &= 1 - n_2 - n_3 \\ n_5 &= 1 - n_6 \end{aligned} \quad (1)$$

لیزرها و تقویت کننده‌های فیبری پالسی نانوآنیبه‌ای با آلاییدگی یون‌های کمیاب زمینی به دلیل بهره‌ی زیاد، بازده دمش، کیفیت باریکه‌ی بالا و فشرده بودن سیستم، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. استفاده از فیبرهای دوغلافی که اجازه دمش توسط لیزر دیود با توان بالا را می‌دهد، دستیابی به توان خروجی بالا را فراهم ساخته است. لیزرهای فیبری نانوآنیبه‌ای بر پایه‌ی محیط فعال اربوم با طول موج مرکزی ۱۵۵۰ نانومتر که در ناحیه‌ی چشم‌ایمن قرار دارد دارای کاربردهای بسیاری در صنایع، پزشکی و مخابراتی هستند. اما دستیابی به توان قله بالا در لیزرهای فیبری اربوم امکان‌پذیر نیست زیرا این سیستم‌ها نیاز به غلظت بالای اربوم دارند اما غلظت بالای اربوم به دلیل پدیده‌ی خاموشی حاصل از فرآیند بالا تبدیل^۲ اجتناب می‌شود. برای رفع این مشکل از محیط هم‌آلاییده‌ی اربوم ایتربیوم استفاده می‌شود. معمولاً برای دستیابی به پالس‌های نانوآنیبه‌ای در لیزرهای فیبری از پیکربندی نوسانگر اصلی-تقویت‌گر توان (MOPA) استفاده می‌شود. در این سیستم‌ها کنترل پارامترهای لیزری نظیر پهنای خط، طول موج و کیفیت باریکه در حین افزایش توان آسانتر می‌باشد. اکتنه‌یگن^۳ و همکارانش مقدار بهره و نویز تقویت‌گر بر پایه‌ی هم‌آلاییدگی اربوم-ایتربیوم را به صورت تجربی و تئوری بررسی کرد [۱]، اولین مطالعات تحول توان در این محیط همراه با بررسی تحلیلی-عددی توسط کنت^۴ انجام شد که همپوشانی خوبی با مدل فرانتر-نودویک^۵ داشت [۲]. هان^۶ در سال ۲۰۱۰ بررسی عددی سیستم تقویت کننده را در رژیم پیوسته انجام داد [۳] و سپس با دمش پالسی و با نرخ تکرار پایین تک پالس، تحولات این محیط بهره را بررسی نمود [۴]. از طرفی در بسیاری از گزارشات تجربی دمش پیوسته در سیستم تقویت‌گر استفاده شده است چرا که پالسی کردن لیزر دیودهای دمش باعث می‌شود تا مقدار زیادی انرژی از بین برود. لذا در این مقاله طراحی تقویت‌گر فیبری پالس لیزری نانوآنیبه با ورودی پالس نانوآنیبه با نرخ تکرار پایین و دمش پیوسته انجام و میزان Amplified Spontaneous Emission (ASE) حاصل در محیط هم‌آلاییده اربوم-ایتربیوم و اثر آن

^۲Canat

^۳Frantz-Nodvick

^۴Han

^۵Quenching

^۶Up-conversion

^۷Achtenhagen

تحول توان های پمپ، سیگنال، ASE اربوم و ASE ایتربیوم در طول محیط بهره در نظر گرفته شود که توسط معادلات ۳ محاسبه می شوند. شکل معادلات ASE برای اربوم و ایتربیوم مشابه معادلات مربوط به توان پمپ و سیگنال بوده ولی برای تقویت احتیاج به چشمه ی تابش خود به خودی دارند که در جمله ی دوم این معادلات دیده می شود [۲].

$$\begin{aligned} \pm \frac{\partial P_p^\pm}{\partial z} + \frac{\partial P_p^\pm}{\partial t} &= [\Gamma_p \sigma_{65}(\lambda_p) N_{yb} n_6 \\ &\quad - \Gamma_p \sigma_{56}(\lambda_p) N_{yb} n_5 \\ &\quad - \Gamma_p \sigma_{13}(\lambda_p) N_{yb} n_3 - \alpha_p] P_p^\pm \\ \pm \frac{\partial P_s^\pm}{\partial z} + \frac{\partial P_s^\pm}{\partial t} &= [\Gamma_s \sigma_{21}(\lambda_s) N_{Er} n_2 \\ &\quad - \Gamma_s \sigma_{12}(\lambda_s) N_{Er} n_1 - \alpha_s] P_s^\pm \\ \pm \frac{\partial P_{k_1}^{yb,\pm}}{\partial z} + \frac{\partial P_{k_1}^{yb,\pm}}{\partial t} &= [\Gamma_{k_1} \sigma_{65}(\lambda_{k_1}) N_{yb} n_6 \\ &\quad - \Gamma_{k_1} \sigma_{56}(\lambda_{k_1}) N_{yb} n_5 \\ &\quad - \Gamma_{k_1} \sigma_{13}(\lambda_{k_1}) N_{yb} n_3 - \alpha_{k_1}] P_{k_1}^{yb,\pm} \\ &\quad + \Gamma_{k_1} \sigma_{65}(\lambda_{k_1}) N_{yb} \frac{2hc^2}{\lambda_{k_1}^3} m_p n_6 \Delta\lambda \\ \pm \frac{\partial P_{k_2}^{Er,\pm}}{\partial z} + \frac{\partial P_{k_2}^{Er,\pm}}{\partial t} &= [\Gamma_{k_2} \sigma_{21}(\lambda_{k_2}) N_{Er} n_2 \\ &\quad - \Gamma_{k_2} \sigma_{12}(\lambda_{k_2}) N_{Er} n_1 - \alpha_{k_2}] P_{k_2}^{Er,\pm} \\ &\quad + \Gamma_{k_2} \sigma_{21}(\lambda_{k_2}) N_{Er} \frac{2hc^2}{\lambda_{k_2}^3} m_s n_2 \Delta\lambda \end{aligned} \quad (3)$$

در معادلات فوق α_i اتلاف در طول موج λ_i و m_p و m_s تعداد مدهای موثر برای انتشار ASE در سیستم می باشد. با توجه به شرایط پیوسته بودن پمپ و پالسی بودن سیگنال شرایط اولیه ی مسئله به صورت زیر نوشته می شود:

$$\begin{aligned} P_p^+(z=0, \lambda_p) &= P_{01}, P_p^-(z=L) = P_{02} \\ P_s^+(z=0, t, \lambda_s) &= P_s(t) \\ P_{k_1}^{yb,+}(z=0, t, \lambda_{k_1}) &= 0, P_{k_1}^{yb,-}(z=L, t, \lambda_{k_1}) = 0 \\ P_{k_2}^{Er,+}(z=0, t, \lambda_{k_2}) &= 0, P_{k_2}^{Er,-}(z=L, t, \lambda_{k_2}) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

۳- نتایج شبیه سازی عددی

محاسبات عددی معادلات ۱ تا ۳ با شرایط اولیه ی (۴) با استفاده از روش های تفاضل محدود انجام شده است. برای بررسی عددی، فیبر دوغلافی با قطر هسته ی ۲۰ میکرون و قطر غلاف اول ۲۲۰ میکرون، توان دمش پیوسته ی ۴ وات در طول موج ۹۱۵ نانومتر، طول محیط بهره ی ۱ متر و پالس سیگنال ورودی مربعی ۰,۳ وات با پهنای زمانی ۱۰ نانوانیه

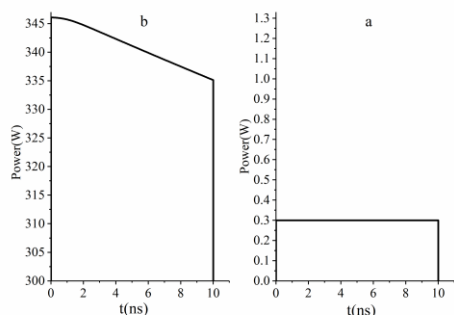
t زمان، n_i ها چگالی جمعیت بهنجار شده و τ_{ij} طول عمر تراز i ام را نشان می دهد. همچنین ضریب فرآیند بالابندیل، R_{ij} ضریب انتقال انرژی غیرتابشی، N_{yb} و N_{Er} نیز به ترتیب چگالی جمعیت یون های اربوم و ایتربیوم در هسته ی فیبر می باشند. برای سادگی فرض می کنیم توزیع چگالی یون ها در هسته ی فیبر یکنواخت باشد. W_{ij} ها نشان دهنده ی نرخ گذار هستند و با استفاده از روابط زیر بدست می آیند [۲]:

$$\begin{aligned} W_{ij} &= \frac{\Gamma_s \sigma_{ij}(\lambda_s) P_s(z, t) \lambda_s}{A_{core} hc} \\ &\quad + \sum_{k_1} \frac{\Gamma_{k_1} \sigma_{ij}(\lambda_{k_1}) [P_{k_1}^{Er,+}(z, t) + P_{k_1}^{Er,-}(z, t)] \lambda_{k_1}}{A_{core} hc} \\ W_{13} &= \frac{\Gamma_p \sigma_{13}(\lambda_p) [P_p^+(z, t) + P_p^-(z, t)] \lambda_p}{A_{core} hc} \\ &\quad + \sum_{k_2} \frac{\Gamma_{k_2} \sigma_{13}(\lambda_{k_2}) [P_{k_2}^{yb,+}(z, t) + P_{k_2}^{yb,-}(z, t)] \lambda_{k_2}}{A_{core} hc} \\ W_{mn} &= \frac{\Gamma_p \sigma_{mn}(\lambda_p) [P_p^+(z, t) + P_p^-(z, t)] \lambda_p}{A_{core} hc} \\ &\quad + \sum_{k_2} \frac{\Gamma_{k_2} \sigma_{mn}(\lambda_{k_2}) [P_{k_2}^{yb,+}(z, t) + P_{k_2}^{yb,-}(z, t)] \lambda_{k_2}}{A_{core} hc} \end{aligned} \quad (2)$$

$ij = 12, 21$
 $mn = 56, 65$

در معادلات فوق، h ثابت پلانک، c سرعت نور در خلا و A_{core} مساحت هسته ی فیبر می باشد. علامت های مثبت و منفی بیانگر جهت های انتشار در طول محور z هستند. $P_{k_1}^{yb}$ و $P_{k_1}^{Er}$ به ترتیب بیانگر توان ASE به ازای طول موج λ_i در محیط اربوم و ایتربیوم و P_p و P_s به ترتیب توان پمپ و توان سیگنال می باشند. برای محاسبه ی ASE طیف آن را به N کانال با پهنای $\Delta\lambda$ تقسیم می کنیم که λ_k طول موج هر قسمت از این تقسیم بندی می باشد. σ_{ij} سطح مقطع گذار بین دو تراز i و j می باشد. ضریب همپوشانی Γ که یک ضریب هندسی است، همپوشانی میدان الکتریکی باریکه های منتشر شده در فیبر و توزیع چگالی یون ها درون هسته ی فیبر را نشان می دهد. در فیبرهای دو غلافی، نور پمپ درون غلاف اول به صورت چند مدی هدایت می شود. بهینه ی جذب پمپ کاملاً به هندسه ی فیبر و ضریب همپوشانی مربوط می باشد. برای فیبرهای با سطح مقطع دایره ای، مد LP_{01} با شکل گوسی بیشترین همپوشانی با هسته را داشته و مدهای مرتبه ی بالاتر با هسته ی فیبر همپوشانی کم دارند. جمعیت ترازهای داده شده در معادله (۱) به ازای یک مکان بدست می آیند و باید

نانوثانیه را پس از خروج از تقویت گر نشان می‌دهد.



شکل ۴: (a) پالس مربعی نانوثانیه ابتدایی به طول ۱۰ نانوثانیه. (b) پالس خروجی از تقویت گر.

همانطور که از شکل مشاهده می‌شود از آنجا که جلوی پالس جمعیت وارون بیشتری در حین انتشار می‌بیند، تقویت بیشتری خواهد داشت و شکل مربعی پالس نانوثانیه ای پس از خروج از تقویت گر نامتقارن می‌شود.

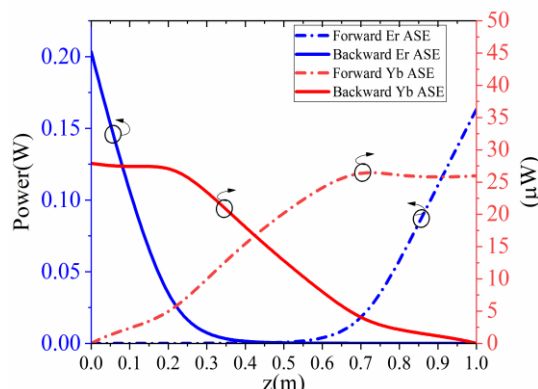
۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله نتایج حل عددی تقویت گر پالس نانوثانیه ای در محیط بهره ی هم آلاینده ی اربیم- ایتربیم به ازای دمش پیوسته ارائه شده که در آن پالس مربعی ورودی با طول ۱۰ نانوثانیه با تقریباً ۳ مرتبه تقویت و تغییر شکل پالس از فیبر فعال به طول ۱ متر خارج می‌شود. نتایج بدست آمده به خوبی می‌تواند برای ساخت تجربی تقویت گرهای پالس نانوثانیه با طول موج ۱۵۵۰ نانومتر بکار رود.

مراجع

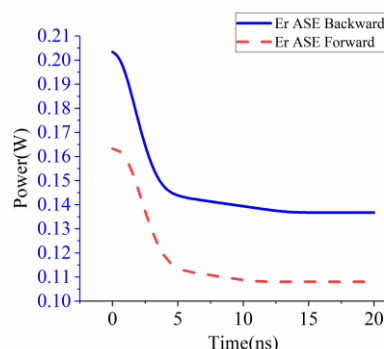
- [1] M. Achtenhagen, R. J. Beeson, F. Pan, B. Nyman, and A. Hardy, "Gain and noise in ytterbium-sensitized erbium-doped fiber amplifiers: measurements and simulations," *Journal of lightwave technology*, vol. 19, no. 10, p. 1521, 2001.
- [2] G. Canat et al., "Dynamics of high-power erbium-ytterbium fiber amplifiers," *Journal of the Optical Society of America B*, vol. 22, no. 11, pp. 2308-2318, 2005/11/01 2005.
- [3] Q. Han, J. Ning, and Z. Sheng, "Numerical investigation of the ASE and power scaling of cladding-pumped Er-Yb codoped fiber amplifiers," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 46, no. 11, pp. 1535-1541, 2010.
- [4] Q. Han, T. Liu, X. Lü, and K. Ren, "Numerical methods for high-power Er/Yb-codoped fiber amplifiers," *Optical and Quantum Electronics*, journal article vol. 47, no. 7, pp. 2199-2212, July 01 2015.

در نظر گرفته شده است. ابتدا نحوه ی تحول ASE جلورونده و عقب رونده نسبت به جهت انتشار دمش، قبل از ورود سیگنال به محیط فعال تقویت گر هم آلاینده اربیم ایتربیم بررسی و نتایج محاسبات در شکل (۲) نشان داده می‌شود.



شکل ۲: ASE ناشی از یون های اربیم و ایتربیم در دو جهت عقب رونده و جلورونده.

بعد از ورود سیگنال به محیط دمیده شده، از توان ASE ها کم و توان سیگنال شروع به تقویت می‌کند و تا زمانی که سیگنال در محیط بهره حضور دارد این کاهش ادامه دارد، تحول زمانی ASE در $z=0$ برای ASE عقب رونده و در $z=1$ م برای ASE جلورونده، با حضور سیگنال در شکل ۳ مشاهده می‌شود.



شکل ۳: تحول زمانی توان ASE در $z=0$ برای ASE عقب رونده و در $z=1$ م برای ASE جلورونده با حضور پالس سیگنال در محیط بهره.

همانطور که مشخص است بیشینه ی ASE برای زمانی است که هیچ سیگنالی در محیط وجود ندارد و به محض ورود سیگنال توان ASE شروع به کاهش کرده و سپس در مقدار کم ثابت می‌ماند و همزمان سیگنال تقویت می‌شود، تا اینکه پالس از محیط تقویت گر خارج شود. پس از خروج پالس تقریباً یک میلی ثانیه طول می‌کشد تا ASE به بیشینه ی اولیه خود بازگردد، این زمان به توان پمپ و مشخصات فیبر بستگی دارد. شکل ۴ تقویت پالس مربعی نانوثانیه ابتدایی به طول ۱۰