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

عباس جابرمرادی، آتوسا سادات عربانیان و رضا مسعودی

دانشگاه شهید بهشتی – پژوهشکده ی لیزر و پلاسما

چکیده – در این مقاله نتایج طراحی تقویت‌گر پالس لیزر نانوثانیه‌ای بر پایه ی محیط بهره فیبری هم آلاییده 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 می‌کنیم . 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 می‌کنیم.

کلید واژه- لیزر پالسی نانوثانیه، هم آلاییدگی اربیوم ایتربیوم، نوسان‌ساز 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 ۰.۳-□□□□ □□ □□□□□□□□□.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-14]

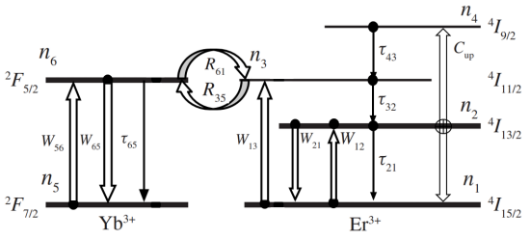
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

۱- مقدمه

لیزرها و تقویت کننده های فیبری پالسی نانوثانیه ای با آلاییدگی یون های کمیاب زمینی به دلیل بهره ی زیاد، بازده دمش، کیفیت باریکه ی بالا و فشرده بودن سیستم، بسیار مورد توجه قرار گرفته اند. 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 نانوثانیه ای بر پایه ی محیط فعال اربیوم با طول موج مرکزی ۱۵۵۰ نانومتر که درناحیه ی چشم ایمن قرار دارد دارای کاربردهای بسیاری در صنایع، پزشکی و مخابراتی هستند. اما دستیابی به توان قله بالا در لیزرهای فیبری اربیوم امکان پذیر نیست زیرا این سیستم ها نیاز به غلظت بالای اربیوم دارند اما غلظت بالای اربیوم به دلیل پدیده ی خاموشی[۱]حاصل از فرآیند بالا تبدیل[۲] اجتناب می‌شود. برای رفع این مشکل از محیط هم آلاییده ی اربیوم ایتربیوم استفاده می‌شود. معمولا برای دستیابی به پالس‌های نانوثانیه ای در لیزرهای فیبری از پیکربندی نوسانگر اصلی-تقویت‌گر توان(MOPA) استفاده می‌شود. در این سیستم ها 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 پایه ی هم آلاییدگی اربیوم-ایتربیوم را به صورت تجربی و تئوری بررسی کرد[۱]، اولین مطالعات تحول توان در این محیط همراه با بررسی تحلیلی-عددی توسط کنات[۴]انجام شد که همپوشانی خوبی با مدل فرانتز-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 تقویت گر استفاده شده است چرا که پالسی کردن لیزر دیودهای دمش باعث می‌شود تا مقدار زیادی انرژی از بین برود. لذا در این مقاله طراحی تقویت گر فیبری پالس لیزری نانوثانیه با ورودی پالس نانوثانیه با نرخ تکرار پایین و دمش پیوسته انجام و میزان Amplified Spontaneous Emission (ASE) حاصل در محیط هم آلاییده اربیوم-ایتربیوم و اثر آن روی بازده و توان خروجی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- تئوری و معادلات ریاضی

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



شکل ۱: ترازهای انرژی سیستم هم آلاییده ی اربیوم-ایتربیوم

$$\begin{aligned}
\frac{\partial n_2}{\partial t} &= -\frac{n_2}{\tau_{21}} + \frac{n_3}{\tau_{32}} + W_{12}n_1 - W_{21}n_2 \\
&\quad -2C_{up}N_{Er}n_2^2 \\
\frac{\partial n_3}{\partial t} &= -\frac{n_3}{\tau_{32}} + W_{13}n_1 + R_{61}N_{Yb}n_6n_1 \\
&\quad -R_{35}N_{Yb}n_3n_5 + C_{up}N_{Er}n_2^2 \qquad (۱) \\
\frac{\partial n_6}{\partial t} &= -\frac{n_6}{\tau_{65}} + W_{56}n_5 - W_{65}n_6 \\
&\quad -R_{61}N_{Er}n_6n_1 + R_{35}N_{Er}n_3n_5 \\
n_1 &= 1 - n_2 - n_3 \\
n_5 &= 1 - n_6
\end{aligned}$$

[۱]Quenching
[۲]Up-conversion
[۳]Achtenhagen
[۴]Canat
[۵]Frantz-Nodvick
[۶]Han

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

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-14]

t زمان، n_i ها چگالی جمعیت بهنجار شده و τ_{ij} طول عمر تراز i ام را نشان می‌دهد. همچنین C_{up} ضریب فرآیند بالاتبدیل، R_{ij} ضریب انتقال انرژی غیرتابشی، N_{Er} و N_{Yb} نیز به ترتیب چگالی جمعیت یون های اربیوم و ایتربیوم در هسته ی فیبر می‌باشند. برای سادگی فرض می‌کنیم 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 می‌آیند[۲]:

$$
\begin{aligned}
W_{ij} &= \frac{\Gamma_s \sigma_{ij}(\lambda_s) P_s(z,t)\lambda_s}{A_{core} hc} \\
&+ \sum_{k_1} \frac{\Gamma_{k_1} \sigma_{ij}(\lambda_{k_1})[P_{k_1}^{Er,+}(z,t) + P_{k_1}^{Er,-}(z,t)]\lambda_{k_1}}{A_{core} hc} \\
W_{13} &= \frac{\Gamma_p \sigma_{13}(\lambda_p)[P_p^{+}(z,t) + P_p^{-}(z,t)]\lambda_p}{A_{core} hc} \\
&+ \sum_{k_2} \frac{\Gamma_{k_2} \sigma_{13}(\lambda_{k_2})[P_{k_2}^{Yb,+}(z,t) + P_{k_2}^{Yb,-}(z,t)]\lambda_{k_2}}{A_{core} hc} \\
W_{mn} &= \frac{\Gamma_p \sigma_{mn}(\lambda_p)[P_p^{+}(z,t) + P_p^{-}(z,t)]\lambda_p}{A_{core} hc} \\
&+ \sum_{k_2} \frac{\Gamma_{k_2} \sigma_{mn}(\lambda_{k_2})[P_{k_2}^{Yb,+}(z,t) + P_{k_2}^{Yb,-}(z,t)]\lambda_{k_2}}{A_{core} hc} \\
ij &= 12, 21 \\
mn &= 56, 65
\end{aligned}
\qquad (۲)
$$

در معادلات فوق، h ثابت پلانک، c سرعت نور در خلا و A_{core} مساحت هسته ی فیبر می‌باشد. علامت‌های مثبت و منفی بیانگر جهت‌های انتشار در طول محور z هستند. $P_{k_1}^{Er}$ و $P_{k_2}^{Yb}$ به ترتیب بیانگر توان ASE به ازای طول موج λ_i در محیط اربیوم و ایتربیوم و P_p و P_s به ترتیب توان پمپ و توان سیگنال می‌باشند. برای محاسبه ی ASE طیف آن را به N کانال با پهنای $\Delta\lambda$ تقسیم می‌کنیم که λ_k طول موج هر قسمت از این تقسیم بندی می‌باشد. σ_{ij} سطح مقطع گذار بین دو تراز i و j می‌باشد. ضریب همپوشانی Γ که یک ضریب هندسی است، همپوشانی میدان الکتریکی باریکه های منتشر شده در فیبر و توزیع چگالی یون‌ها درون هسته ی فیبر را نشان می‌دهد. در فیبرهای دو غلافی، نور پمپ درون غلاف اول به صورت چند مدی هدایت می‌شود. بهینه ی جذب پمپ کاملا به هندسه ی فیبر و ضریب همپوشانی مربوط می‌باشد. برای فیبرهای با سطح مقطع دایره‌ای، 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 می‌آیند و باید تحول توان های پمپ، سیگنال، ASE اربیوم و ASE ایتربیوم در طول محیط بهره در نظر گرفته شود که توسط معادلات ۳ محاسبه می‌شوند. شکل معادلات ASE برای اربیوم 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 می‌شود[۲].

$$
\begin{aligned}
\pm\frac{\partial P_p^{\pm}}{\partial z} + \frac{\partial P_p^{\pm}}{\partial t} &= [\Gamma_p \sigma_{65}(\lambda_p) N_{Yb} n_6 \\
&- \Gamma_p \sigma_{56}(\lambda_p) N_{Yb} n_5 \\
&- \Gamma_p \sigma_{13}(\lambda_p) N_{Yb} n_3 - \alpha_p] P_p^{\pm} \\
\pm\frac{\partial P_s^{\pm}}{\partial z} + \frac{\partial P_s^{\pm}}{\partial t} &= [\Gamma_s \sigma_{21}(\lambda_s) N_{Er} n_2 \\
&- \Gamma_s \sigma_{12}(\lambda_s) N_{Er} n_1 - \alpha_s] P_s^{\pm} \\
\pm\frac{\partial P_{k_1}^{Yb,\pm}}{\partial z} + \frac{\partial P_{k_1}^{Yb,\pm}}{\partial t} &= [\Gamma_{k_1} \sigma_{65}(\lambda_{k_1}) N_{Yb} n_6 \\
&- \Gamma_{k_1} \sigma_{56}(\lambda_{k_1}) N_{Yb} n_5 \\
&- \Gamma_{k_1} \sigma_{13}(\lambda_{k_1}) N_{Yb} n_3 - \alpha_{k_1}] P_{k_1}^{Yb,\pm} \\
&+ \Gamma_{k_1} \sigma_{65}(\lambda_{k_1}) N_{Yb} \frac{2hc^2}{\lambda_{k_1}^3} m_p n_6 \Delta\lambda \\
\pm\frac{\partial P_{k_2}^{Er,\pm}}{\partial z} + \frac{\partial P_{k_2}^{Er,\pm}}{\partial t} &= [\Gamma_{k_2} \sigma_{21}(\lambda_{k_2}) N_{Er} n_2 \\
&- \Gamma_{k_2} \sigma_{12}(\lambda_{k_2}) N_{Er} n_2 - \alpha_{k_2}] P_{k_2}^{Er,\pm} \\
&+ \Gamma_{k_2} \sigma_{21}(\lambda_{k_2}) N_{Er} \frac{2hc^2}{\lambda_{k_2}^3} m_s n_2 \Delta\lambda
\end{aligned}
\qquad (۳)
$$

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 می‌باشد. با توجه به شرایط پیوسته بودن پمپ و پالسی بودن سیگنال شرایط اولیه ی مسئله به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$
\begin{aligned}
&P_p^{+}(z=0,\lambda_p) = P_{01}, P_p^{-}(z=L) = P_{02} \\
&P_s^{+}(z=0,t,\lambda_s) = P_s(t) \\
&P_{k_1}^{Yb,+}(z=0,t,\lambda_{k_1}) = 0, P_{k_1}^{Yb,-}(z=L,t,\lambda_{k_1}) = 0 \\
&P_{k_2}^{Er,+}(z=0,t,\lambda_{k_2}) = 0, P_{k_2}^{Er,-}(z=L,t,\lambda_{k_2}) = 0
\end{aligned}
\qquad (۴)
$$

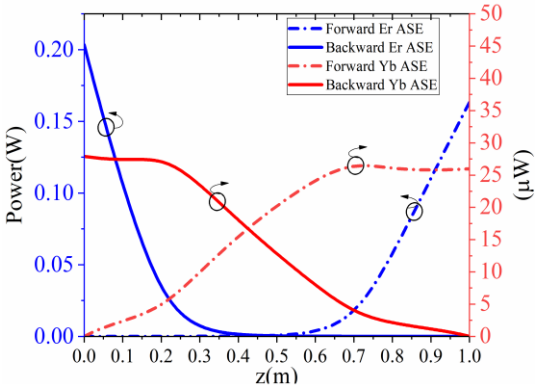
۳- نتایج شبیه سازی عددی

محاسبات عددی معادلات ۱ تا ۳ با شرایط اولیه ی (۴) با استفاده از روش‌های 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 نانوثانیه

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

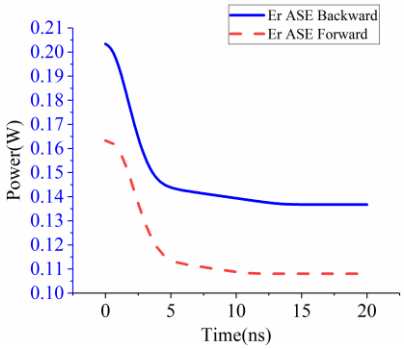
[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-14]

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 آلاییده اربیوم ایتربیوم بررسی و نتایج محاسبات در شکل (۲) نشان داده می‌شود.



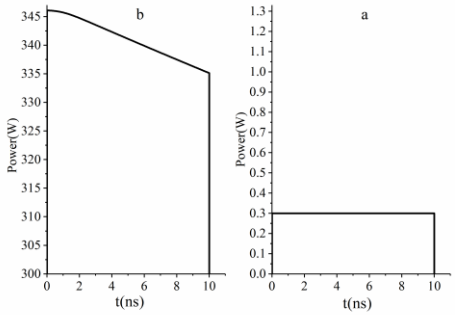
شکل ۲: ASE ناشی از یون های اربیوم و ایتربیوم در دو جهت عقب رونده و جلورونده.

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=1m 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=1m 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 تقویت‌گر خارج شود. پس از خروج پالس تقریبا 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 نانوثانیه را پس از خروج از تقویت‌گر 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 آنجاکه جلوی پالس جمعیت وارون بیشتری در حین انتشار می‌بینند، تقویت بیشتری خواهد داشت و شکل مربعی پالس نانوثانیه ای پس از خروج از تقویت‌گر نامتقارن می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله نتایج حل عددی تقویت‌گر پالس نانوثانیه ای در محیط بهره ی هم آلاییده ی اربیوم- ایتربیوم به ازای دمش پیوسته ارائه شده که در آن پالس مربعی ورودی با طول ۱۰ نانوثانیه با تقریبا 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 تقویت‌گرهای 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.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-14]