



تأثیر نواحی پمپ نشده محیط فعال بر عملکرد یک لیزر دمش دیودی Er-Yb:Glass کلیدزنی Q شده با جاذب اشباع پذیر $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$

مرضیه کارمند، غلامرضا هنرآسا و امیر نوفرستی

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

چکیده _ در این مقاله با استفاده از معادلات نرخ، رفتار یک لیزر Er-Yb:Glass کلیدزنی Q شده با بلور جاذب اشباع پذیر $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ مدل سازی شده است. این مدل یک بار در حضور درصدی از ماده فعال پمپ نشده و برای بار دیگر در حضور ماده فعال کاملاً پمپ شده مورد بررسی قرار گرفته است. پس از تحلیل معادلات نرخ، پهنای پالس و انرژی پالس خروجی محاسبه و در نهایت دو حالت با هم مقایسه شده اند. نتایج نشان می دهد زمان انتشار پالس لیزری در حضور قسمت پمپ نشده در مقایسه با حالت کاملاً پمپ شده دیرتر رخ می دهد.

کلید واژه- لیزر Er-Yb:Glass، کلیدزنی Q غیرفعال، بلور $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ، معادلات نرخ

Impact of unpumped regions within active element on operation of a diode pumped Er-Yb:Glass laser Q-switched with $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ saturable absorber

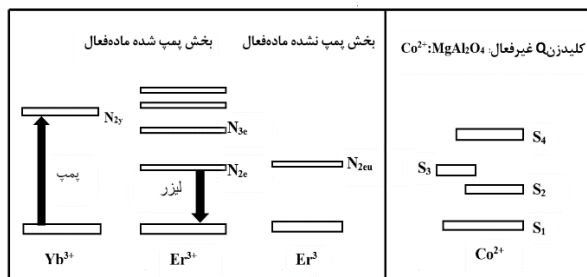
Marzieh karmand, Gholamreza Honarasa, and Amir Noferesti

Department of Physics, Shiraz University of Technology, Shiraz

Abstract- In this paper, The behavior of an Er-Yb:Glass laser Q-switched with $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ saturable absorber is modeled by using the rate equations. This model investigated once in presence of percentage of unpumped active element and once again in presence of completely pumped active element. After analyzing the rate equations, the output pulse width and energy are calculated and finally two cases are compared to each other. The results show that the time of propagation laser pulse in presence of unpumped active element occurs later in compare with completely pumped active element.

Keywords: Er-Yb:Glass laser, Passive Q-switch, $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ crystal, Rate equation

۱- مقدمه



شکل ۱: نمودار تراز انرژی برای Er-Yb:Phosphate glass (نواحی پمپ شده و پمپ نشده) و جاذب اشباع پذیر $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$

در ابتدا تابش پمپ توسط یون‌های تراز پایه Yb^{3+} جذب شده و جمعیت را به تراز دوم آن می‌رساند. با ضرایب انتقال انرژی k_1 و k_2 به ترتیب انرژی به ترازهای دوم و سوم Er^{3+} منتقل و باعث برانگیختگی الکترون‌های تراز اول و دوم می‌شود. سپس گسیل‌های خودبه‌خودی خیلی سریع از ترازهای بالا به سمت تراز سوم اربیم صورت می‌گیرد و با زمان تقریبی ۱۰ میکروثانیه تراز لیزری (تراز دوم) از جمعیت پر می‌شود. پس از پر شدن تراز دوم با ایجاد گسیل القایی، الکترون‌ها به تراز پایه اربیم بر می‌گردند و نور لیزر تولید می‌شود. انتقالات ناحیه پمپ نشده ماده فعال که در شکل ۱ نشان داده شده است مشابه حالت پمپ شده انجام می‌شود با این تفاوت که در این قسمت تابش لیزری ایجاد شده در بخش پمپ شده، سبب برانگیزش الکترون‌ها شده است.

در محیط کلیدزن Q الکترون‌های تراز پایه با جذب فوتون‌ها برانگیخته می‌شوند. با گذشت زمان بلور به حالت اشباع رسیده و ضریب جذب کم، بلور شفاف شده و نور عبور می‌کند. مدت زمان شفاف بودن بلور جاذب اشباع پذیر به اندازه طول عمر تراز S_2 است [۶].

فرآیندهای صورت گرفته با استفاده از مجموعه معادلات دیفرانسیل جفت شده مرتبه اول زیر در حضور قسمت پمپ نشده ماده فعال تحلیل می‌شوند:

$$\frac{dN_{2y}}{dt} = W_p(N_y - N_{2y}) - k_1 N_{2y}(N_e - N_{2e} - N_{3e}) - A_{21y} N_{2y} - k_2 N_{2y} N_{2e} \quad (1)$$

$$\frac{dN_{2e}}{dt} = Q_{las} \frac{c_0}{s_e L_0} [\sigma_e^{ab}(N_e - N_{2e} - N_{3e}) - \sigma_e^{em} N_{2e}] - A_{21e} N_{2e} + A_{32e} N_{3e} - 2CN_{2e} N_{2e} - k_2 N_{2y} N_{2e} \quad (2)$$

در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی در زمینه پیشرفت لیزرهای پالسی با طول موج چشم-ایمن ۱/۵۴ میکرون و توان قله خروجی چندین کیلووات صورت گرفته است. مقالات زیادی مرتبط با این موضوع با ماده فعال و جاذب‌های اشباع پذیر متفاوت به منظور طراحی و ساخت لیزرهای چشم-ایمن وجود دارند [۲۱]. عملکرد یک منبع تابش همدوس و پرقدرت در طول موج چشم-ایمن ۱/۵-۱/۶ میکرون حائز اهمیت است. به طور کلی لیزر اربیم با کلیدزنی غیرفعال برای گسیل نور بسیار پر کاربرد است. از جمله کاربردهای این نمونه لیزر می‌توان به استفاده آن در ابزار پزشکی، مسافت‌یابی و ابزار آشکارکننده انفجار اشاره کرد [۳].

در این مقاله به شبیه‌سازی عملکرد یک لیزر Er-Yb:Glass کلیدزنی Q شده به وسیله جاذب اشباع پذیر $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ می‌پردازیم و تأثیر بخش‌هایی از محیط فعال که تحت تابش پمپ قرار نمی‌گیرند را بر عملکرد لیزر بررسی خواهیم کرد.

۲- مدل‌سازی لیزر

در شبیه‌سازی انجام شده، ماده فعال مکعب مستطیلی شکل از دو طرف توسط آرایه‌های لیزر دیودی به صورت عرضی در محدوده طیفی ۹۶۰-۹۴۰ نانومتر در معرض دمش قرار می‌گیرد. ابعاد ماده فعال $2 \times 2 \times 32$ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. کاواک لیزر شامل دو آینه تخت است. بلور جاذب اشباع پذیر $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ به عنوان کلیدزن Q غیرفعال بین ماده فعال و آینه خروجی قرار می‌گیرد.

برانگیختگی نوری در سه قسمت کاواک لیزر صورت گرفته و شامل محیط پمپ شده، محیط پمپ نشده و بلور کلیدزن Q غیرفعال است. نمودار تراز انرژی برای نواحی پمپ شده و پمپ نشده بلور Er-Yb:Glass و بلور جاذب اشباع پذیر $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ در شکل ۱ نشان داده شده است [۴ و ۳]. در شبیه‌سازی عبور اولیه ۰/۸۶ (T₀) و ضخامت جاذب اشباع پذیر (L_c) در نظر گرفته شده است.

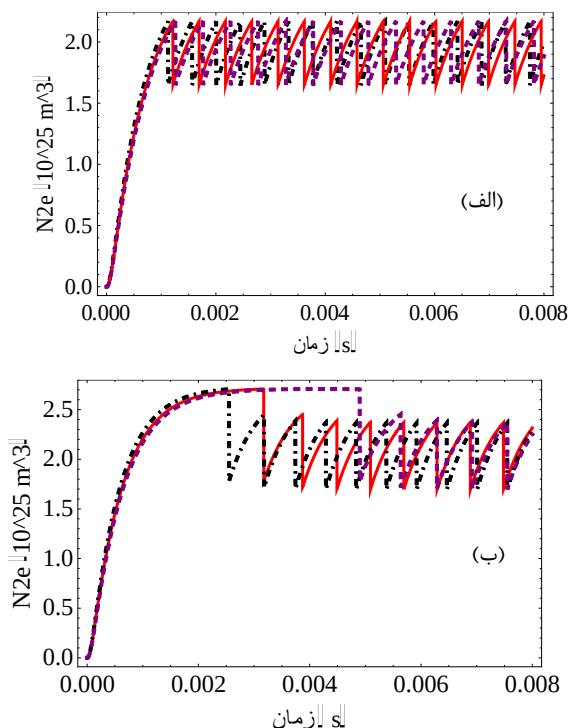
مدل لیزری شامل فرآیندهای مختلف نوری است که بین ترازهای انرژی نشان داده شده در شکل ۱ صورت می‌پذیرد [۳-۵].

$$\frac{dQ_{las}}{dt} = Q_{las} \left\{ -\frac{c_0 L_c}{L_0} [\sigma_c^{gsa} (N_c - N_{2c}) - \sigma_c^{esa} N_{2c}] - \frac{1}{\tau} \right\} + \delta_{las} s_e L_e A_{21e} N_{2e} \quad (۷)$$

برای بار دیگر معادلات نرخ برای زمانی که طول ماده فعال کاملاً پمپ شده است محاسبه می‌گردد. با حل عددی این معادلات جفت‌شده پهنای پالس و انرژی پالس را بدست آورده و با جواب بدست آمده از حل مجموعه معادلات در حضور قسمت پمپ نشده مقایسه می‌شود.

۳- بحث و نتیجه

نتایج حاصل از مدل‌سازی معادلات نرخ در نمودارهای زیر نمایان است. شکل ۲ نمودار جمعیت تراز دوم اربیم (تراز لیزری) برحسب زمان به ازای سه توان پمپ (P_{abs}) مختلف را نشان می‌دهد. در قسمت (الف) ماده فعال کاملاً پمپ شده و در قسمت (ب) بخشی از ماده فعال پمپ نشده است. نسبت طول بخش پمپ نشده (L_{eu}) به طول کل محیط فعال ۰/۲ در نظر گرفته شده است.



شکل ۲: چگالی جمعیت Er^{3+} برای تراز دوم انرژی (الف) حالت کاملاً پمپ شده (ب) در حضور قسمت پمپ نشده به ازای $P_{abs} = 294W$ (منحنی خط-نقطه)، $P_{abs} = 274W$ (خط توپر) و $P_{abs} = 264W$ (منحنی خط چین).

$$\frac{dN_{3e}}{dt} = k_1 N_{2y} (N_e - N_{2e} - N_{3e}) - A_{32e} N_{3e} + k_2 N_{2y} N_{2e} + C N_{2e} N_{2e} \quad (۳)$$

$$\frac{dN_{2eu}}{dt} = Q_{las} \frac{c_0}{s_e L_0} [\sigma_e^{ab} (N_e - N_{2eu}) - \sigma_e^{em} N_{2eu}] - A_{21e} N_{2eu} \quad (۴)$$

$$\frac{dN_{2c}}{dt} = Q_{las} \frac{c_0}{s_c L_0} \sigma_c^{gsa} (N_c - N_{2c}) - A_{21c} N_{2c} \quad (۵)$$

$$\frac{dQ_{las}}{dt} = Q_{las} \left\{ \frac{c_0 L_{eu}}{L_0} [\sigma_e^{em} N_{2e} - \sigma_e^{ab} (N_e - N_{2eu})] - \frac{c_0 L_c}{L_0} [\sigma_c^{gsa} (N_c - N_{2c}) - \sigma_c^{esa} N_{2c}] - \frac{1}{\tau} \right\} + \delta_{las} s_e L_e A_{21e} N_{2e} + \delta_{las} s_e L_{eu} A_{21e} N_{2eu} \quad (۶)$$

در این جا t زمان، $W_p = P_{abs} / [N_y V_p (hc_0 / \lambda_p)]$ ضریب مشخصه نرخ پمپ، $V_p = s_e L_e$ حجم پمپ ماده فعال، $L_0 = L_{cav} + L_{AE} (n_{AE} - 1) + L_c (n_c - 1)$

$$\frac{1}{\tau} = \left(\frac{c_0}{L_0} \right) \ln \left[\frac{1}{1 - \rho} \right] + \left(\frac{c_0}{2L_0} \right) \ln \left(\frac{1}{R} \right)$$

فوتون در کاواک لیزر، ρ افت کاواک و R ضریب بازتاب آینه خروجی است. λ_p طول موج تابش پمپ و c_0 سرعت نور است. در مجموعه معادلات بالا Q_{las} و N_{2c} به ترتیب تعداد فوتون لیزری و چگالی جمعیت تراز انرژی S_2 کبالت را معرفی می‌کنند. جمعیت کلی برای ایتربیم، اربیم و کبالت به ترتیب گرفته شده است. همچنین $\sigma_e^{ab}, \sigma_e^{em}, \sigma_c^{gsa}, \sigma_c^{esa}$ به ترتیب سطح مقطع جذب اربیم، سطح مقطع گسیل اربیم، سطح مقطع جذب تراز پایه کبالت و سطح مقطع تراز برانگیخته کبالت در طول موج لیزری هستند. s_e و s_c به ترتیب سطح مقطع مد لیزری بیرون و درون ماده فعال هستند. پارامتر L_c با رابطه $T_0 = \exp(-N_c \sigma_c^{gsa} L_c)$ به ضریب عبور اولیه کلیدزن Q وابسته است. توان پالس خروجی لیزر با رابطه $P(t) = (c_0 / 2L_0) \ln(1/R) Q_{las}(t) hc_0 / \lambda_{las}$ تعیین می‌شود.

در معادلات نرخ جفت‌شده برای زمانی که تمام ماده فعال تحت تاثیر دمش قرار گرفته شده است تغییراتی ایجاد می‌شود. در این حالت معادله (۴) که نمایانگر انتقالات ایجاد شده در بین ترازهای انرژی اربیم در حضور قسمت پمپ نشده ماده فعال است، به طور کامل حذف شده و معادله (۶) به شکل زیر تغییر خواهد کرد:

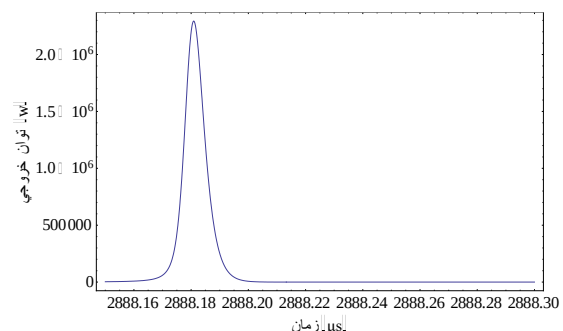
۴- نتیجه گیری

مدل سازی انجام شده انتقالات لیزری برای لیزر Er-Yb:Glass با کلیدزنی Q که دمش آن به صورت عرضی صورت گرفته است را نشان می دهد. در این جا معادلات نرخ با شرایط اولیه مدل سازی و نتایج حاصل از حل دو مجموعه معادلات نرخ برای حالت کاملاً پمپ شده و در حضور قسمت پمپ نشده ماده فعال با هم مقایسه شده است. به عنوان یک نتیجه مطلوب از این مقاله می توان به پهنای پالس حدود ۸-۹ نانوثانیه و توان قله ۲/۳ مگاوات برای هر دو حالت توجه کرد، از طرف دیگر برای کاواک با طول ۰/۰۶ متر و ماده فعال مکعب مستطیلی با طول ۳۲ میلی متر به همراه بلور $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ به عنوان کلیدزن Q غیر فعال با عبور ۰/۸۶ و آینه خروجی با بازتاب ۰/۷ به بیشترین انرژی پالس خروجی حدود ۱۸/۳ میلی ژول می رسیم.

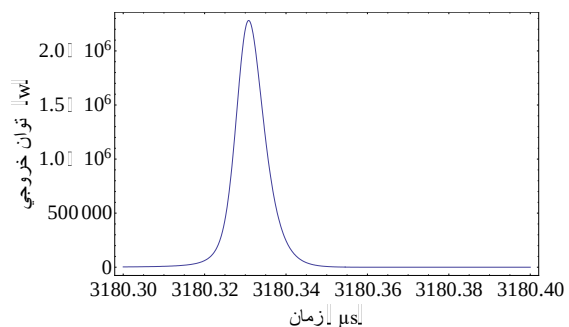
مراجع

- [1] J. Mlynchak, K. Kopczynski, J. Mierczyk, A. Bajor, "Development and saturation investigation of MALO saturable absorber" *Prz. Elektrotechniczny*, Vol. 90, No. 12, pp. 59-63, 2014.
- [2] L.I. Burov, L. G. Krylova, "Optimization of Yb-Er microchip laser parameters" *J. Appl. Spectrosc.*, Vol. 79, No. 3, pp. 376-381, 2012.
- [3] G.I. Ryabtsev, T.V. Bezyazychnaya, M.V. Bogdanovich, A.V. Grigor'ev, V.V. Kabanov, Y.V. Lebiadok, A.G. Ryabtsev, M.A. Shchemelev, "Optimized diode-pumped passive Q-switched ytterbium-erbium glass laser", *Appl. Phys. B*, Vol. 108, No. 2, pp. 283-288, 2012.
- [4] J. B. Gruber; A S. Nijjar; V S. Nijjar; S. R. Chinn, M. S. Bowers, B. Zandi, "Modeling a diode pumped Er:Yb:glass laser with Co^{2+} :spinel as a passive Q-switch", *Proc. Of SPIE*, Vol. 5792, pp. 183-193, 2005.
- [5] S. Liu, F. Song, H. Cai, T. Li, X. Zhang, Z. Wu, J. Tian, "Investigation of the roundtrip cavity loss in laser diode pumped erbium:ytterbium-phosphate glass microchip lasers" *J. Appl. Phys*, Vol. 102, No. 10, pp. , 2007.
- [6] R. S. Quimby, *Photonics and Laser*, p.395, Wiley-Interscience, Canada, 2006.

همانطور که از شکل مشخص است با کاهش توان پمپ ورودی زمان خارج شدن اولین پالس لیزری افزایش می یابد. همچنین نوسانات ایجاد شده در نمودار به دلیل وجود بلور جاذب اشباع پذیر است. شکل ۳ توان خروجی لیزر را نشان می دهد. با توجه به این شکل می توان پهنای پالس و انرژی پالس خروجی را محاسبه کرد. بر این اساس برای حالتی که ماده فعال به صورت کامل پمپ شده توان قله ۲/۲۸ MW، پهنای پالس ۸ ns و انرژی ۱۸/۲۵ mJ و در حضور قسمت پمپ نشده توان قله ۲/۲۹ MW، پهنای پالس ۸ ns و انرژی ۱۸/۳۳ mJ به دست آمده است.



(الف)



(ب)

شکل ۳: توان خروجی لیزر (الف) حالت کاملاً پمپ شده و (ب) در حضور قسمت پمپ نشده

همچنین با توجه به شکل ۳ مشاهده می شود که انرژی، پهنای و توان قله پالس خروجی در هر دو حالت مقادیر تقریباً یکسانی دارند اما زمان انتشار پالس لیزری در حضور قسمت پمپ نشده نسبت به حالت کاملاً پمپ شده دیرتر اتفاق می افتد و با توجه به این نکته می توان زمان خروج پالس را مدیریت کرد.