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

# بررسی عددی رفتار خروجی لیزر دیسک نازک Yb:YAG و بررسی تأثیر دمای محیط و چند انعکاسی پرتو پمپ در بهره لیزر

مجتبی مالمیر[۱]، محمد حسین مهدیه[۱]

۱- دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

**چکیده - در این مقاله یک لیزر دیسک نازک *Yb:YAG* به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته و تأثیرات چند انعکاسی پرتو پمپ و دمای ماده فعال بر بازده اپتیکی بررسی شده‌است. دمای درون ماده فعال یکنواخت و انتشار پرتوهای پمپ و لیزر به صورت موج تخت در نظر گرفته شده‌اند. معادلات به روش رانگکوتا حل شده‌اند و برای پیدا کردن حدس اولیه از روش شوتینگ استفاده شده است. وابستگی دمایی ضرایب اِشغال بولتزمن و سطح مقطع‌های جذب و گسیل القایی و همچنین اثرات خاموشی غلظت در محاسبات وارد شده‌اند. تأثیرات تعداد عبور پرتو پمپ، غلظت ماده فعال، ضخامت کریستال ماده فعال و دمای ماده فعال بر بازده اپتیکی مورد بررسی قرار گرفته-است.**

کلید واژه- روش رانگکوتا، روش شوتینگ، معادلات آهنگ، لیزر دیسک نازک.

# Numerical study of the behavior of a Yb:YAG thin-disk laser and the effects of multi-pass pumping and medium temperature on laser efficiency

M. Malmir, M.H. Mahdieh

Department of physics, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

In this paper a Yb:YAG thin disk laser was studied numerically and the effects of multi-pass pumping and medium temperature in optical efficiency were investigated. The temperature of the medium is considered to be uniform and assuming a plane wave model for pump and laser beam propagation. The equations were solved by Runge Kutta method and shooting method was used to find an initial guess. The temperature dependence of the Boltzmann occupation factors, absorption cross section and emission cross section were included in the calculations. The influence of the number of pump beam passes, doping concentration, crystal thickness and temperature of the crystal on the optical efficiency were investigated.

Keywords: Thin disk laser, Rate equations, Runge Kutta method, Shooting method.

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-01-30 ]



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

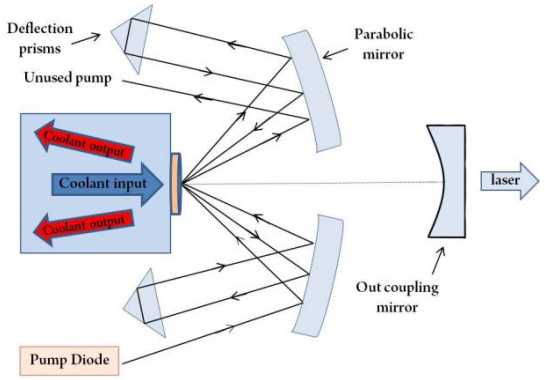
## ۱- مقدمه

لیزرهای دیسک نازک برای اولین بار در سال ۱۹۹۴ ارائه شدند[۱]. در لیزرهای دیسک نازک به دلیل اینکه نسبت سطح خنک شونده به حجم ناحیه‌ی پمپ شده در مقایسه با لیزرهای میله‌ایی بیشتر است، امکان استخراج توان‌های بالا و کیفیت پرتو خوب به طور همزمان وجود دارد. سیستم پمپاژ در اینگونه لیزرها به گونه‌ای است که پرتو پمپ جذب نشده را دوباره به داخل ماده فعال هدایت می‌کند و باعث افزایش میزان جذب و همچنین افزایش چگالی پمپ مؤثر می‌شود. استفاده از مواد شبه سه ترازی مانند $Yb^{3+}$ که مزیت‌های زیادی نسبت به سایر مواد مورد استفاده در لیزرهای حالت جامد دارد نیازمند چگالی پمپ بالا و سیستم خنک کننده مناسب است که ساختار لیزر دیسک نازک این امکان را فراهم می‌کند[۱].

در این مقاله معادلات مربوط به انتشار پرتو پمپ و لیزر درون ماده فعال به طور همزمان حل می‌شوند و با در نظر گرفتن شرایط مرزی خاص برای لیزر دیسک نازک، بازده اپتیکی محاسبه می‌شود. وابستگی دمایی ضرایب اِشغال بولتزمن و سطح مقطع‌های جذب و گسیل القایی و همچنین وابستگی طول عمر تابشی به غلظت یون‌های ماده فعال در نظر گرفته شده است. بهینه‌ی بازده اپتیکی برای شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- ساختار لیزر دیسک نازک

شکل (۱) طرحواره‌ای از یک لیزر نمونه دیسک نازک را نشان می‌دهد. محیط فعال یک دیسک نازک با قطر از مرتبه سانتی‌متر و ضخامت چند صد مایکرون می‌باشد. دیسک از طریق زیر لایه مناسب به سیستم خنک کننده متصل می‌گردد و بخش جلویی آن مورد تابش لیزر دیود (لیزر پمپ کننده) قرار می‌گیرد. معمولاً پرتو لیزر پمپ از طریق سیستم اپتیکی مناسب و یک آینه‌ی شلجمی بصورت چند انعکاسی روی ماده فعال متمرکز می‌گردد. در این مقاله تأثیر تعداد انعکاس‌ها در بازده لیزر مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج آن ارائه شده است.



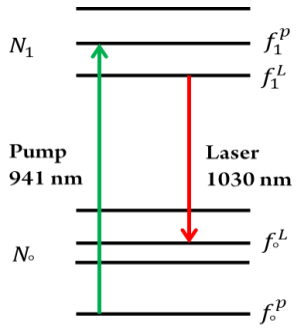

شکل ۱: طرحواره‌ای از لیزر دیسک نازک

## ۳- روش عددی

ترازهای انرژی برای یون $Yb^{3+}$ در شکل (۲) نشان داده شده است. جمعیت باند پایه را با $N_\circ$ و جمعیت باند برانگیخته را با $N_1$ نشان می‌دهیم. مجموع جمعیت این دو باند با تعداد اتم های ماده فعال برابر است.

$$N_t = N_\circ + N_1 \qquad (۱)$$

توزیع الکترون‌ها بین ترازهای هر باند با در نظر گرفتن تعادل گرمایی با ضرایب اِشغال بولتزمن داده می‌شوند[۲].




شکل ۲ : ترازهای انرژی برای یون $Yb^{3+}$

معادلات آهنگ با روابط (۲) تا (۴) توصیف می‌گردند[۳].

$$\frac{\partial N_1(z)}{\partial t} = \sigma_P\left(f_\circ^p N_\circ - f_1^p N_1\right)\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(I_{P,i}^{+}+I_{P,i}^{-}\right)}{h\nu_P} + \sigma_L\left(f_\circ^L N_\circ - f_1^L N_1\right)\frac{\left(I_L^{+}+I_L^{-}\right)}{h\nu_L} - \frac{N_1}{\tau} \qquad (۲)$$

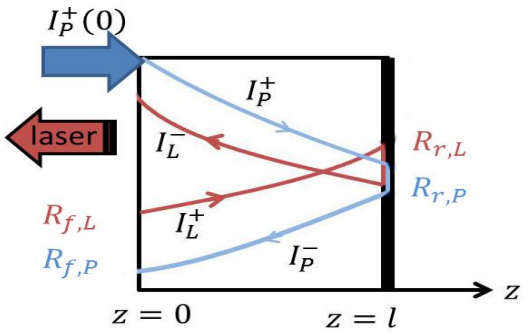
$$\frac{\partial I_{P,i}^{\pm}(z)}{\partial z} = \pm\sigma_P\left(f_\circ^p N_\circ - f_1^p N_1\right)I_{P,i}^{\pm} \qquad (۳)$$

$$\frac{\partial I_L^{\pm}(z)}{\partial z} = \pm\sigma_L\left(f_\circ^L N_\circ - f_1^L N_1\right)I_L^{\pm} \qquad (۴)$$



[ Downloaded from opsi.ir on 2026-01-30 ]

در این روابط جهت‌های + و − برای شدت‌های پمپ و لیزر در شکل (۳) نشان داده شده است. در معادله (۲) جمع روی تعداد رفت و برگشت‌های پرتو پمپ درون ماده فعال است. $v_L$ و $v_P$ به ترتیب بسامد پرتو لیزر و پمپ را نشان می‌دهند.




شکل ۳: شکل طرحواره که جهت انتشار پرتوهای پمپ و لیزر درون ماده فعال را نشان می دهد.

وابستگی دمایی سطح مقطع جذب و گسیل به ترتیب با رابطه (۵) و (۶) بیان می‌شوند[۴].

$$\sigma_P(T) = \left[2.07 + 6.37exp\left(\frac{-(T-273.15)}{288}\right)\right] \times 10^{-21}cm^2 \qquad (۵)$$

$$\sigma_L(T) = \left[2 + \left(\frac{10.5}{1+exp(\frac{T-131.6}{52})}\right)\right] \times 10^{-20}cm^2 \qquad (۶)$$

همچنین وابستگی طول عمر تابش به غلظت ماده فعال، با رابطه (۷) توصیف می‌گردد [۴].

$$\tau(C_{Yb}) = 0.67442 + 0.3763\, exp\left(-\frac{C_{Yb}}{C_\circ}\right)\, ms \qquad (۷)$$

که در آن $C_\circ$ پارامتری است که اثرات خاموشی غلظت در کریستال$Yb:YAG$را توصیف می‌کند و مقدار آن ۳۹٪است. شرایط مرزی برای شدت‌های پمپ و لیزر با روابط (۸) و (۹) داده می‌شوند[۳].

$$z=0 \text{ در } \begin{cases} I_{P,i+1}^+(0) = R_{f,P} I_{P,i}^-(0) \\ I_L^+(0) = R_{f,L} I_L^-(0) \end{cases} \qquad (۸)$$

$$z=l \text{ در } \begin{cases} I_{P,i}^-(l) = R_{r,P} I_{P,i}^+(l) \\ I_L^-(l) = R_{r,L} I_L^+(l) \end{cases} \qquad (۹)$$

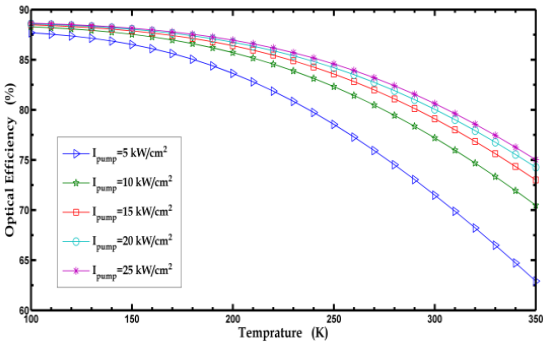
## ۳- محاسبات و نتایج

معادلات (۱) تا (۹) بطور همزمان برای یک لیزر دیسک نازک نمونه حل شده‌اند. برخی مشخصات محیط فعال و لیزر پمپ کننده در جدول (۱) خلاصه شده است.

جدول ۱- پارامترها و مقادیر مورد استفاده در محاسبات ما

| پارامتر | مقدار |
|---|---|
| دمای ماده فعال | $300\ K$ |
| طول عمر تراز بالایی لیزر | $951\ \mu s$ |
| شدت پرتو پمپ | $20\ kW/cm^2$ |
| ضخامت ماده فعال | $200\ \mu m$ |
| غلظت یون های ماده فعال | $10\ at\ \%$ |
| ضرایب بازتاب آینه ها برای پرتو پمپ | $R_{r,p} = 100\ \%$ |
| | $R_{f,p} = 100\ \%$ |
| ضرایب بازتاب آینه ها برای پرتو لیزر | $R_{r,L} = 100\ \%$ |
| | $R_{f,L} = 95\ \%$ |
| طول موج پرتو پمپ | $941\ nm$ |
| طول موج پرتو لیزر | $1030\ nm$ |
| تعداد عبور پرتو پمپ | 16 |

در شکل (۴) بازده اپتیکی بر حسب دمای ماده فعال و برای شدت‌های مختلف پمپ رسم شده است. با افزایش دما، هم سطح مقطع جذب و هم سطح مقطع گسیل کاهش می‌یابد، بنابراین بازده اپتیکی کم می‌شود. در دماهای پایین شیب کاهش بازده کمتر است چون آستانه لیزر کاهش می‌یابد.



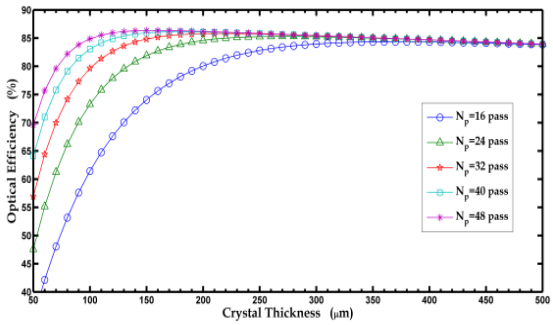

شکل ۴: بازده اپتیکی بر حسب دما برای شدت‌های مختلف پمپ

شکل (۵) نمودار بازده اپتیکی بر حسب ضخامت ماده فعال، برای تعداد عبورهای مختلف پرتو پمپ را نشان می-دهد. در یک دمای ثابت اگر تعداد عبور پرتو پمپ بیشتر شود، فوتون‌های بیشتری جذب یون‌های ماده فعال می-شوند و این امر باعث می‌شود که ضخامت بهینه‌ی ماده



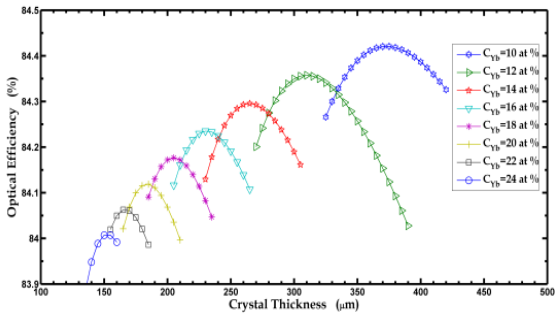
[ Downloaded from opsi.ir on 2026-01-30 ]

فعال کمتر و بازده اپتیکی بیشتر شود. در تعداد عبورهای بیشتر از ۳۲ بار، به دلیل اینکه تنها مقدار اندکی از پرتو پمپ جذب نشده باقی می‌ماند، تغییرات بازده اپتیکی کمتر می‌شود و همچنین با افزایش ضخامت ماده فعال، اختلاف بین بازده اپتیکی برای تعداد عبورهای مختلف کم می‌شود.



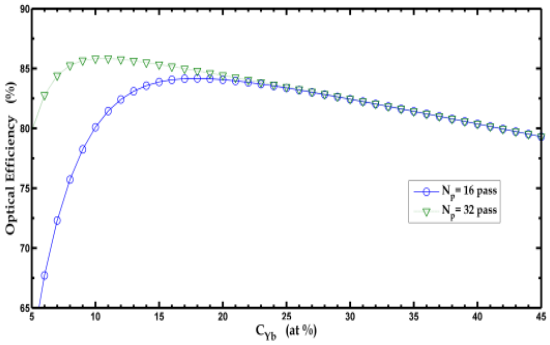

شکل ۵: بازده اپتیکی بر حسب ضخامت ماده فعال برای تعداد عبورهای مختلف پرتو پمپ

در شکل (۶) نمودار بازده اپتیکی بر حسب ضخامت و برای مقادیرمختلفِ غلظت ماده فعال نشان داده شده است. با افزایش غلظت، طول عمر تراز لیزر کاهش می‌یابد و این منجر به کاهش بازده اپتیکی می‌شود. مقدارِ این کاهش اندک است بگونه‌ای که افزایش غلظت از ۱۰ ٪ تا ۲۴ ٪ تنها منجر به کاهش بازده اپتیکی به مقدار تقریباً ۰/۵ ٪ می‌شود.




شکل ۶: تغییرات بازده اپتیکی بر حسب ضخامت ماده فعال برای غلظت‌های مختلف با احتساب وابستگی طول عمر به غلظت

شکل (۷) نمودار بازده اپتیکی بر حسب غلظت ماده فعال برای تعداد عبورهای ۱۶ و ۳۲ بار را نشان می‌دهد. ضخامت ماده فعال $200\ \mu m$ در نظرگرفته شده است. با افزایش تعداد عبور، مقدار جذب بیشتر می‌شود و این منجر به افزایش بازده وکاهش غلظت بهینه می‌شود.




شکل ۷: نمودار بازده اپتیکی بر حسب غلظت ماده فعال برای تعداد عبور ۱۶ و ۳۲ بار

## ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله با در نظر گرفتن وابستگی دمایی ضرایب اِشغال بولتزمن و سطح مقطع‌های جذب و گسیل القایی و همچنین وابستگی طول عمر تابشی به غلظت یون‌های ماده فعال، یک مدل عددی موج تخت برای حل معادلات آهنگ ارائه شد. این مدل تطابق خوبی با مدل تحلیلی ارائه شده در مرجع[۳] دارد. از این مدل می توان برای تعیین و بهینه‌سازی پارامترهای طراحی لیزر دیسک نازک نظیر ضخامت دیسک، تعداد عبور پرتو پمپ، دمای مایع خنک کننده و غلظت یون‌های $Yb^{3+}$ استفاده نمود.

## ۵- سپاسگزاری

نویسندگان از کمک‌های آقای آیدین اشرفی بلگاباد- دانشکده فیزیک دانشگاه علم و صنعت ایران- در رفع اشکالات بخش شوتینگ محاسبات صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایند.

## مراجع

[1] A. Giesen, H. Hugel, A. Voss, K. Wittig, U. Brauch, and H. Opower, "*Scalable Concept for Diode-Pumped High-Power Solid-State Lasers*," **Applied Physics B**, vol.58, p.365-372, (1994).

[2] C. Li, Q. Liu, M. Gong, G. Chen, and P.Yan, "*Modeling of end-Pumped CW Yb:YAG lasers exhibiting non-uniform temperature distribution*," **Optical and Quantum Electronics**, no.36, p.745–758, (2004).

[3] C. Lim and Y. Izawa, *"Modeling of End-Pumped CW Quasi-Three-Level Lasers*," **IEEE Journal of Quantum Electronics**, vol.38, no.3, p.306-311, (2002).

[4] M. J. Dashcasann, and E. Barati, "*Power scaling limitations in quasi-three level thin gain lasers*," **Optics & Laser Technology**, vol.45, p.480–487, (2013).



[ Downloaded from opsi.ir on 2026-01-30 ]