بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۶-۱۵ بهمن ۱۳۹۸

بررسی تقویت کننده لیزر تیغه‌ای زیگزاگ دو سر دمش

مهنا نجفی[۱و۲]، آرزو سپهر[۱]، مهدی شایگان منش[۲]، احسان تنهایی[۱] محمد مهدی مجید اف[۱]

[۱]مرکز علوم و فنون لیزر ایران، تهران، ایران

[۲]دانشکده فیزیک دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

چکیده – در این پژوهش به بررسی نحوه عملکرد تقویت کننده تیغه‌ای زیگزاگ Nd:YAG دو سر دمش با در نظر گرفتن اثرات غیر خطی کریستال در توان‌های بالا پرداخته‌ایم. مدل عددی ارائه شده به روش تفاضل محدود به محاسبه و بهینه سازی پارامترهای تاثیرگذار تقویت کننده تیغه‌ای زیگزاگ از جمله توزیع جذب و توزیع بهره در طول کریستال می‌پردازد. به منظور روشن شدن اهمیت تاثیرات اشباع در لیزرهای توان‌های بالا Nd:YAG، توزیع ضریب بهره در طول کریستال تیغه‌ای و تغییرات ضریب جذب با افزایش توان دمش بررسی شده است. همچنین بهینه طول کریستال برحسب غلظت آلاینده Nd یکبار با در نظر گرفتن اثرات اشباع و بار دیگر بدون در نظر گرفتن این اثرات محاسبه و با هم مقایسه شده‌اند.

کلید واژه- تقویت کننده، لیزر تیغه‌ای زیگزاگ، روش تفاضل محدود، اثرات اشباع، بهینه‌سازی.

Modeling of Nd:YAG dual end pumped zigzag slab Amplifier

Mohanna Najafy[1, 2], Arezue Sepehr[1], Mahdi Shayagn Manesh[2] ,Ehsan Tanhaei[1] and Mohamad Mahdi Majid Of

[1]Iranian National Centre for laser science and technology (INCL), Tehran, Iran. PO Box: 14665-576

[2] Physics Department, Iran University of Science and Technology, Narmak, Tehran, Iran

Abstract- A numerical modeling of end-pumped zigzag slab amplifier regarding contra directional pumping and saturation features is investigated theoretically. Spatial dependent rate equation has been solved taking into consideration the pump and laser beam saturation effects at high power scale. As an **advantage, gain coefficient distribution along the crystal length, absorption coefficient versus pump power and optimum crystal length are calculated. Laser parameters could** have noticeable differences in contrast with analytical approaches considering slab crystal as a bulk.

Keywords: laser amplifier, zigzag slab Amplifier, finite difference method, saturation effects, optimizing.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-10]

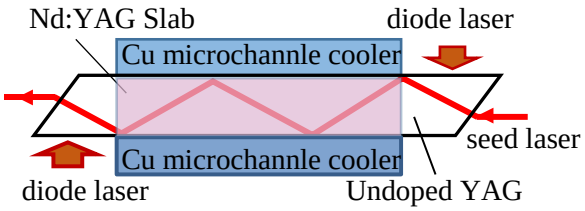
مقدمه

تقویت کننده لیزر تیغه‌ای زیگزاگ به علت تولید پرتو لیزر با کیفیت مطلوب و قابلیت استفاده در توانهای بالا در سالهای اخیر مورد توجه پژوهشگران و مراکز صنعتی قرار گرفته است. در حال حاضر لیزرهای تیغه ای زیگزاگ در زمینه‌های متفاوتی کاربرد دارد [۱] به عنوان دو مثال مهم می‌توان به کاربرد این لیزر در پروژه همجوشی هسته-ای (HALNA) و پروژه آشکارسازی امواج گرانشی زمین (LIGO) [۲و۳] اشاره کرد. حرکت زیگزاگی پرتو لیزر در درون کریستال ماده فعال دو سر دمش منجر به حذف اختلاف راه نوری در پروفایل لیزر در راستای ضخامت تیغه و تقویت نور با کیفیت بالا می‌شود [۴]. همین ویژگی تقویت کننده لیزر زیگزاگ را به سیستم قابل ارتقا به لیزرهای پرتوان‌های تبدیل می‌کند [۵]. همانطور که میدانیم با بالا رفتن توان در ساختارهای لیزری پدیده‌های غیر خطی نظیر اثر اشباع در فرایندهای جذب و گسیل بروز می کند. بنابراین برای بررسی دقیق یک سیستم لیزری توان بالا باید این اثرات را در محاسبات لحاظ کرد.

در مقاله حاضر به منظور شبیه سازی رفتار تقویت کننده تیغه¬ای زیگزاگ با دمش دو طرفه، یک حل عددی به روش تفاضل محدود با لحاظ کردن محاسبات اثرات غیر خطی کریستال Nd:YAG ارائه شده است. روش حاضر قابلیت تعمیم به ساختارهای تقویت کننده با دمش از انتها نظیر ماژولهای میله ای و اینواسلبها و همچنین چشمه¬های ASE را دارا می‌باشد .

مدل‌سازی عددی

تقویت کننده زیگزاگ مورد بررسی شامل یک کریستال تیغه-ای Nd:YAG با ابعاد ۱,۷×۲۵×۱۳۰mm و غلظت ۰,۱۳٪ است که توسط یک سیستم خنک کننده از دو سطح بزرگش خنک می‌شود. کریستال تیغه‌ای شکل توسط دو لیزر دیود با طول موج ۸۰۸ nm از دو انتها پمپاژ می‌شود. به منظور یکنواخت کردن پرتو دمش، به دو انتهای تیغه دو قطعه کریستال YAG خالص با سطح ورودی مورب متصل می‌شود شکل۱. مسیر عبور نور لیزر در طول کریستال به علت بازتابهای کلی از سطوح بزرگ تیغه بصورت زیگزاگ می‌باشد.



شکل ۱: شماتیکی از تقویت کننده لیزر تیغه‌ای زیگزاگ

مدل سازی صورت گرفته به منظور محاسبه میزان تقویت و جذب در طول کریستال Nd:YAG با استفاده از حل معادلات نرخ وابسته به مکان می‌باشد. معادله نرخ برای تراز بالا N_2 در لیزرهای پیوسته در حالت تعادل چگالی به صورت

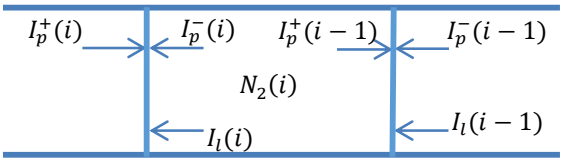
$$N_2(z) = N_t(z)\frac{\sigma_{abs,p} f_1^p I_p(z)/h\upsilon_p + \sigma_{em,l} f_2^l I_l(z)/h\upsilon_l}{\sigma_{abs,p}(f_1^p+f_2^p) I_p(z)/h\upsilon_p + \sigma_{em,l}(f_1^l+f_2^l) I_l(z)/h\upsilon_l + 1/\tau} \quad (1)$$

نوشته می شود [۶]. در معادلات بالا N_t جمعیت کل ترازهای اتمی، I_l شدت لیزر و I_p شدت دمش است که برابر مجموع شدت‌های دمش در دو جهت مخالف و منطبق بر محور اصلی تیغه می‌باشد ($I_p^{\pm}$). f_i^j فاکتور اشغال بولتزمن برای ترازهای گذار الکترونی برای هر دو فرایند دمش و لیزر هستند. به عنوان مثال f_1^l فاکتور اشغال تراز اول (بالایی) در گذار لیزری است. $\sigma_{abs,p}$ و $\sigma_{em,l}$ به ترتیب سطح مقطع جذب برای پرتو دمش و سطح مقطع گسیل برای پرتو لیزر می‌باشند که تابعی از دما و طول موج هستند. همانطور که می دانیم Nd:YAG به عنوان یک کریستال چهار ترازی دارای شدت اشباع دمش و لیزر بالاییست (حدودا ۲۰ کیلو وات بر سانتی متر مربع). بدین معنی که در توان‌های پایین اثرات اشباعی با تقریب خوبی قابل چشم پوشی هستند. در حالیکه با بالا رفتن شدت لیزر و دمش اثرات غیر خطی جذب و گسیل بروز می‌یابند. با توجه به اینکه سیستم مورد علاقه ما یک لیزر توان بالاست

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-10]

صرفنظر کردن از این اثرات منجر به بروز خطای قابل توجه در محاسبه کمیت‌های مهم لیزر می شود.



شکل۲: شماتیکی از کریستال با مش بندی طولی و نحوه مشارکت شدتهای دمش و سیگنال

ضریب گسیل پرتو لیزر و ضریب جذب پرتو دمش در طول کریستال با یک رابطه غیر خطی به یکدیگر وابسته هستند. طبق روابط زیر در توانهای بالا ضریب جذب و گسیل علاوه بر طول موج و دما به شدت نور لیزر و دمش نیز وابسته است [۷].

$$\alpha(z) = \alpha_0(z)\frac{f_p + (f_p - f_l)I_l(z)/I_{lsat}}{1 + I_p(z)/I_{psat} + I_l(z)/I_{lsat}} \qquad (۲)$$

$$g(z) = g_0(z)\frac{I_p(z)/I_{psat}\,(f_p - f_l) - f_l}{1 + I_p(z)/I_{psat} + I_l(z)/I_{lsat}}$$

$$I_{lsat} = \frac{h\,\upsilon_l}{(\sigma_{em.l} + \sigma_{abs.l})\,\tau} \qquad (۳)$$

$$I_{psat} = \frac{h\,\upsilon_p}{(\sigma_{em.p} + \sigma_{abs.p})\,\tau}$$

در این روابط $f_{l,p}$ ضرایبی وابسته به فاکتورهای بولتزمن و $I_{l,p\,sat}$ شدتهای اشباع لیزر و دمش می‌باشند. با احتساب این روابط به محاسبات عددی پرداخته ایم. بهره لیزر و عبور نور دمش در یک طول محدود d در راستای محور کریستال با روابط زیر بدست می‌آیند:

$$G(z) = \frac{I_l(z)}{I_l(z-d)} = exp\big(\sigma_{em,l}\,\Delta N_l(z)d\big), \qquad (۴)$$

$$\Gamma(z) = \frac{I_p^+(z)}{I_p^+(z-d)} = \frac{I_p^-(z-d)}{I_p^-(z)} = exp\big(-\sigma_{abs,p}\,\Delta N_p(z)d\big), \qquad (۵)$$

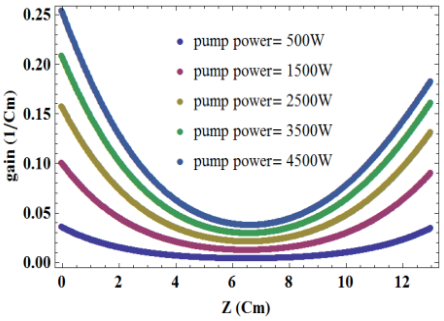
Γ ضریب تضعیف دمش و G بهره لیزر در طول کریستال است که تابعی از چگالی جمعیت معکوس است. برای مدل‌سازی سیستم از الگوریتم خود سازگاری و استفاده از روش تفاضل محدود استفاده کرده‌ایم. شماتیکی از مش‌بندی طولی کریستال و پرتوهای عبوری از المان i ام در شکل ۲ آورده شده است. در این شکل $I_p^+(i)$ و $I_p^-(i)$ شدت دمش ورودی به المان طولی iام از طرف مثبت و منفی محور کریستال و $I_l(i)$ شدت سیگنال ورودی به المان طولی iام است. روش کار بدین صورت است که تیغه را بصورت طولی مش بندی کرده و در هر المان به محاسبه چگالی جمعیت معکوس تراز لیزر $N_2(i)$ می پردازیم. این محاسبه بر اساس رابطه (۱) و با احتساب شدت پرتوهای دمش از دو انتها $I_p^+(i), I_p^-(i)$ و همچنین شدت پرتوی لیزر $I_l(i)$ عبوری از آن المان صورت می پذیرد. در گام بعدی با داشتن چگالی جمعیت تراز لیزر می توانیم شدت پرتوهای دمش دو طرف و شدت پرتوی عبوری لیزر را در المان بعدی بدست آوریم. به همین ترتیب محاسبات را در تمام طول تیغه ادامه می دهیم. در گام‌های بعدی از نتایج گام‌های قبلی استفاده کرده و با استفاده از روش تکرار محاسبات را در چندین مرحله انجام می دهیم تا هنگامی که جوابها با تقریب دلخواهی همگرا شوند.

نتایج شبیه سازی

در شکل ۳ توزیع بهره در طول تیغه به ازای توان‌های مختلف دمش از ۵۰۰ w تا ۴۵۰۰w نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در توانهای پایین دمش، توزیع بهره در طول کریستال متقارن می باشد. اما با بالا رفتن توان دمش، به علت وابستگی غیر خطی تخلیه جمعیت ترازها به شدت نور ورودی، توزیع بهره لیزر نامتقارن می‌شود. این در حالیست که ساختار دو سر دمش بکار رفته متقارن است. در واقع سیگنال لیزر در ابتدای ورود به کریستال در مکان z=0 کمترین توان را دارد بنابراین بیشترین ضریب بهره را تجربه می‌کند. در مقابل، پرتوی لیزر تقویت شده با رسیدن به انتهای کریستال در z=۱۳ cm به بیشینه توان خود می‌رسد. در نتیجه ضریب بهره در مقایسه با نقطه ورودی مقدار کمتری دارد. همانطور که گفته شد ضریب جذب ماده فعال به شدتهای لیزر و دمش در نقطه مورد بررسی بستگی دارد. در شکل ۴ نمودار تغییرات ضریب جذب را بر حسب توان‌های مختلف دمش رسم کرده‌ایم. در این نمودار مقایسه‌ای بین دو نقطه ورودی و خروجی

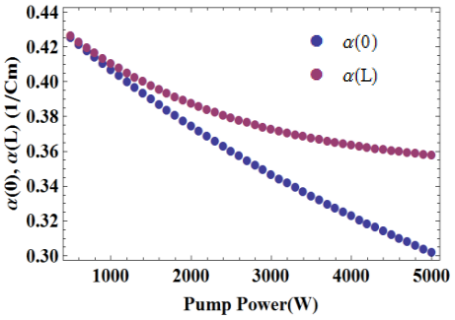
این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-10]



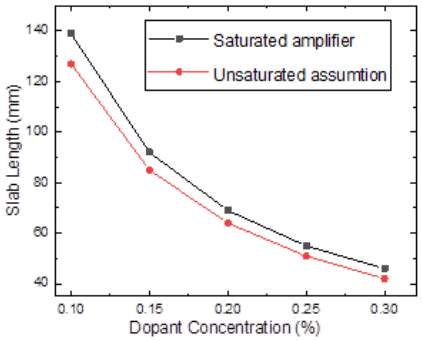
شکل ۳: توزیع ضریب بهره در طول کریستال در تقویت کننده تیغه-ای زیگزیگ به ازای توان‌های مختلف در هر سر تیغه

سیگنال لیزر صورت گرفته است. همانطور که انتظار می‌رود در توان‌های بالا با ظهور اثرات اشباعی اختلاف دو ضریب جذب قابل توجه می‌شود. ضریب جذب در نقطه خروجی پرتو لیزر تقویت شده به علت تخلیه قابل توجه جمعیت تراز بالایی لیزر و تمایل کریستال برای جذب نور دمش مقدار بیشتری را به خود می‌گیرد.



شکل ۴: مقایسه تغییرات ضریب جذب پرتو دمش در دو نقطه ورودی و خروجی پرتو لیزر بر حسب توان دمش.

یکی از ساده‌ترین و در عین حال کاربردی‌ترین روشها در حذف پرتوی دمش جذب نشده از سیستم، انتخاب بهینه مقدار طول جذب در مقابل غلظت آلاینده می‌باشد. در مدلسازی حاضر طول تیغه Nd:YAG در غلظت‌های مختلف به نحوی بهینه شده تا میزان پرتوی دمش جذب نشده به کمتر از ۰٫۱٪ توان لیزر دیود برسد. طول بهینه محاسبه شده در شکل ۵ در عین حال مقایسه‌ای بین نتایج محاسبات با در نظر گرفتن اثرات غیر خطی اشباع و با حذف اثرات اشباع بدست می‌آید که این ناشی از کاهش ضریب جذب در حال اشباع است. این اختلاف در غلظت ۰٫۱٪ به بیش از ۱۲mm می‌رسد.



شکل ۵: بهینه طول تیغه Nd:YAG به ازای غلظت‌های مختلف در دو حالت با در نظر گرفتن اثرات غیر خطی اشباع (نمودار مشکی) و با حذف اثرات اشباع (نمودار قرمز)

نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر به محاسبه مشخصات تاثیرگذار لیزر تیغه‌ای زیگزاگ Nd:YAG با دمش از دو سر با استفاده از یک مدل عددی پرداخته‌ایم. تاکید اصلی ما بر روی اثرات غیرخطی کریستال در فرایند جذب و گسیل پرتوی دمش و لیزر در توان‌های بالاست. با بررسی مشخصات تقویت کننده نظیر تغییرات ضریب جذب و ضریب بهره و طول بهینه تیغه اهمیت لحاظ کردن اثرات غیر خطی در لیزرهای توان بالا روشن می-شود.

مرجع‌ها

[1] J. M. Eggleston, T. J. Kane, K. Kuhn, J. Unternahrer, and R. L. Byer, IEEE.J. Quantum Electron. 20, 289–301, 1984.

[2] T. Sekine, OSA conference, (2007), paper CFA3

[3] W. Wiechmann, , in Conference on Lasers and Electro-Optics, Vol. 6 of OSA, (1998), p. 432.

[4] H. Injeyan and G. D. Goodno, “Zigzag slab lasers, in High Power Laser Handbook, eds. McGraw-Hill, 2011, Chap. 8

[5] A. K. Sridharan, S. Saraf, S. Sinha, and R. L. Byer, Applied Optics, Vol. 45, No. 14, pp.3341-3351, 2006.

[6] P. Peterson and P. M. Sharma, “Back-reflection pumping versus contradirectional pumping in upconversion solid state lasers,” Opt. Commun. 146, 189–195 ~1998!.

[7] Gilbert L. Bourdet, "Theoretical investigation of quasi-three-level longitudinally pumped continuous wave lasers," Appl. Opt. 39, 966-971, 2000

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-10]