بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

گسیل خودبخودی تقویت شده در لیزر دیسک نازک

مهنا نجفی،آرزو سپهر و سید علاء هاشمی گلپایگانی

مرکزملی علوم وفنون لیزر ایران،تهران،ایران،صندوق پستی۵۷۶-۱۴۶۶۵

چکیده –در مقاله حاضر به بررسی اثرات مخرب گسیل خودبخودی تقویت شده بر توان خروجی لیزر دیسک با ماده فعال *Yb:YAG* پرداخته شده‌است. بدین منظور با شبیه‌سازی عددی بر اساس روش ردیابی پرتو به محاسبه توزیع فضایی-زمانی این نوفه تقویت شده و نحوه رقابت آن با گسیل القایی حاضر در سیستم لیزر پرداخته‌ایم. پس از آن اثرات پارامترهای فیزیکی سیستم بر روی مقدار گسیل خودبخودی تقویت شده و بهینه شرایطی که در آن گسیل خودبخودی به کمترین مقدار خود در مقایسه با گسیل القایی باشد، بررسی شده‌است.

کلید واژه- روش ردیابی پرتوها، جمعیت وارون، گسیل خودبخودی تقویت شده، لیزر دیسک ، معادلات نرخ

Amplified spontaneous emission in thin-disk lasers

Mohanna Najafi, Arezou Sepehr, S. Ala Hashemi Golpaygani

Iranian National Centre for laser science and technology (INCL), Tehran, Iran,

PO Box: 14665-576

Abstract- The Detrimental effect of Amplified spontaneous emission (ASE) on Yb:YAGthin disk lasers output power is investigated. A temporal-spatial simulationbased on ray-tracing method for calculating ASE in transient and stable statein competition with stimulated emission isimplied. In order to scaling the thin disk laser to higher output power, we investigate the influence of physical parameters of our system onthe amount of ASE.

Keywords: amplified spontaneous emission, population inversion, ray-tracing method, rate equation, thin-disk laser

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]

۱- مقدمه

در سالهای اخیر لیزر دیسک به دلیل مزیت¬های قابل توجهی از قبیل توان خروجی بالا، کیفیت خوب پرتو خروجی، بازدهی اپتیکی بالا و ابعاد کوچک در صدر تحقیقات لیزرهای پر توان حالت جامد قرار گرفته‌است[۱]. این واقعیت که توان خروجی این لیزر قابلیت رسیدن به محدوده توان‌های بالا را دارد، محققان را بر آن داشته که محدودیت‌های موجود را شناسایی و حتی‌الامکان برطرف کنند. بخش قابل ملاحظه‌ای از این محدودیت‌ها با اعمال تغییراتی در طراحی سیستم برطرف شده‌است. به عنوان مثال می‌توان از طراحی خنک کننده مناسب به منظور کم کردن تنش گرمایی ناشی از دمش پرتوان کریستال یا بهینه سازی ضخامت دیسک برای کاهش اثرات حرارتی ناشی از بازجذب پرتو لیزر نام برد. یکی دیگر از فرایندهایی که نقش تعیین کننده‌ای در محدود کردن توان خروجی مخصوصا در توان‌های بالا را دارد، گسیل خودبخودی تقویت شده (Amplified Spontaneous Emission) است. در پژوهش‌های که پیش از این برای محاسبه ASE انجام شده یا مدل هندسی مورد بررسی یک بعدی بوده [۲و۳] و یا صرفا به حالت‌های بدون حضور گسیل القایی در سیستم لیزری اکتفا شده‌است [۴و۵].

در مقاله حاضر یک شبیه سازی عددی به منظور محاسبه گسیل خودبخودی تقویت شده در لیزر دیسک با ماده فعال Yb:YAG ارائه شده‌است. در یک تحلیل زمانی وفضایی که به صورت همزمان انجام می‌شود، به محاسبه ASE در رقابت با گسیل القایی شکل گرفته درون کاواک برای تصاحب بهره ذخیره شده درون کریستال Yb:YAG می-پردازیم. تمام محاسبات با فرض تقارن استوانه‌ای لکه دمش و با فرض عبور صد در صدی نور از لبه دیسک (با وجود لایه جاذب) صورت پذیرفته‌است.

۲- مدل‌سازی عددی

با شروع دمش در هر لیزر حالت جامدی دو مکانیزم همزمان گسیل القایی و گسیل خودبخودی تقویت شده در کریستال فعال لیزر شکل می‌گیرد. این دو فرایند از یک ذخیره واحد که همان جمعیت معکوس ایجاد شده توسط دمش است برای تقویت استفاده می‌کنند. در ادامه به محاسبه مجزای جمعیت معکوس لیزر و چگالی فوتون‌های گسیل خودبخودی تقویت شده در دیسک پرداخته و سپس ارتباط آنها را در یک بازه زمانی درون کاواک بررسی می-کنیم.

در گام نخست توجه خود را به معادلات نرخ برای سیستم سه ترازی Yb:YAG به عنوان معادلات پایه برای محاسبه جمعیت معکوس معطوف می‌کنیم. در این معادلات $n(\vec{r},t)$ اختلاف در چگالی جمعیت ترازهای بالایی و پایینی لیز و $\varphi(\vec{r},t)$ چگالی فوتون‌های گسیل القایی درون کاواک می‌باشند. همان‌طور که می‌دانیم یکی از شاخصه‌های لیزرهای سه‌ترازی که در طراحی این لیزرها قابل چشم پوشی نیست، اثرات گرمایی است که باعث پرشدن تراز پایینی لیزر می‌شود. با در نظر گرفتن همه این شرایط معادلات نرخ به صورت زیر در می‌آید.

$$\frac{dn(\vec{r},t)}{dt} = Q(\vec{r},t) - \frac{n(\vec{r},t) + f_{abs}N_t}{\tau} - c\,\sigma\,\varphi(\vec{r},t)\,n(\vec{r},t)\,(f_{abs}+1) - W_{ASE}(\vec{r},t)) \quad (1)$$

$$\frac{d\varphi(\vec{r},t)}{dt} = \frac{d}{l_r} c\,\sigma\,\varphi(\vec{r},t)(n(\vec{r},t) - nth(\vec{r},t)) \quad (2)$$

در معادلات بالا $Q(\vec{r},t)$ نرخ دمش ماده فعال، τ زمان فروافت خودبخودی الکترون‌های برانگیخته، σ سطح مقطع گسیل نور لیزر، d ضخامت دیسک و l_r طول کاواک لیزر می‌باشد. f_{abs} فاکتور سطح مقطع جذب لیزر به سطح مقطع گسیل این طول موج در ماده فعال Yb:YAG است. جمله آخر در معادله (۱)، W_{ASE}، بیانگر حضور فرایند ASE به عنوان عاملی در جهت کاهش جمعیت اتمهای برانگیخته و معادل نرخ تخلیه این اتمها می‌باشد. برای حل کامل معادلات نرخ در گام بعدی لازم است به بررسی میزان تخلیه جمعیت معکوس توسط فرایند ASE بپردازیم. بدین منظور چگالی فوتون‌های گسیل خودبخودی را محاسبه و در معادلات نرخ قرار می‌دهیم. از آنجایی که گسیل خودبخودی جهت انتشار خاصی ندارد برای محاسبه آن نمی‌توان از روش‌های مرسوم پیرامحوری که به ساده سازی مسئله کمک می‌کند، استفاده کرد. روشی که در اینجا پیش می‌گیریم ردیابی پرتوهایی است که از همه نقاط و مسیرهای ممکن به یک نقطه می‌رسند. روش مذکور به تفصیل در مقاله [۶] توضیح داده شده

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]

است. به اختصار می‌توان گفت: این پرتوها شامل همه پرتوهای ناشی از گسیل خودبخودی اتمهای کریستال بعلاوه پرتوهای تقویتی گسیل خودبخودی است که با عبور از بخش‌های مختلف در طول مسیر تولید می‌شوند. به منظور کاهش حجم محاسبات، چند فرض را که با توجه به فیزیک مسئله دور از ذهنی نیستند در محاسبه کرده‌ایم. در درجه اول فرض کردیم پروفایل پمپاژ و جذب دارای تقارن محوری باشند و همین‌طور جمعیت معکوس در ضخامت های مختلف دیسک تغییر نکند. عبور کامل همه پرتوهایی که به لبه دیسک می¬رسند از دیگر فرض‌های مسئله است که از لحاظ فنی با افزودن لایه‌های جاذب و یا تغییر در هندسه این سطح قابل دستیابی است. بعلاوه تنها گذار اتمی که منتهی به گسیل طول موج ۱۰۳۰ nm می‌شود مورد نظر ما می‌باشد و از بقیه گذارها چشمپوشی می‌کنیم. با در نظر گرفتن بازتاب‌های داخلی متوالی از سطوح دیسک، چگالی شار فوتونی که از مسیر خاص l به نقطه شاهد می‌رسد، معادل است با:

$$\Delta\phi_{ASE}(l) = \Delta\phi_{SE}(l)\exp(\sum_{l=0}^{l}(g(l)-\alpha(l)\Delta l) \qquad (3)$$

در این رابطه g مقدار بهره در واحد طول (ضریب بهره) و α ضریب جذب غیراشباع برای طول موج لیزر است. توان تابع نمایی در واقع جمع کل بهره‌ایست که پرتو ASE در ضمن عبور از همه المان‌های حاضر در مسیر l با آن مواجه می‌شود.

$$W_{ASE} = \sum^{all\ direction}\Delta\phi_{ASE}(l)g(l) \qquad (4)$$

رابطه (۴) نرخ اتمهای تخلیه شده در فرایند ASE را نشان می‌دهد. برای این منظور تمامی فوتون‌های ASE بدست آمده در کلیه مسیرهای ممکن در عبارت (۴) محاسبه شده‌اند. برای رسیدن به یک مدل مناسب که بتواند حضور همزمان دو فرایند گسیل القایی و گسیل خودبخودی تقویت شده را به خوبی نشان دهد به یک تحلیل فضایی– زمانی گسسته نیاز داریم. گام‌های محاسبه به شرح ذیل است:

- معادلات نرخ به روش اجزا محدود در یک بازه زمانی مشخص و با فاصله زمانی δt حل می‌شوند. δt باید به اندازه کافی کوچک باشد تا فقط افت و خیزهای دمایی در هر فاصله زمانی نادیده گرفته شوند.

- با نتایج بدست آمده از حل معادلات نرخ در یک δt مشخص توزیع شعاعی جمعیت معکوس بدست می‌آید. با داشتن توزیع جمعیت معکوس بهره هر المان شعاعی دیسک مشخص می‌شود. این کمیت در محاسبه ASE نقش بسزایی دارد.

- با بکارگیری روش توضیح داده شده برای محاسبه ASE به کمک بهره بدست آمده در مرحله قبل، چگالی فوتونهای ASE رسیده به همه المانهای دیسک محاسبه می‌شود. این کمیت که در واقع یک ماتریس دو بعدی در ابعاد تعداد تقسیم بندی‌های شعاعی و محوری دیسک می‌باشد با فرض ثابت بودن بهره و در نتیجه توزیع جمعیت معکوس در طول δt بدست می‌آید.

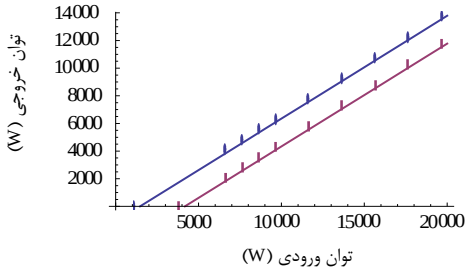
- پس از اینکه شاری از فوتونهای ASE به یک المان با بهره مشخص می‌رسد، شروع به تخلیه اتمهای برانگیخته آن المان می‌کند. میزان تخلیه اتمها (W_{ASE}) برای اعمال در معادلات نرخ محاسبه می‌گردد.

در انتها معادلات نرخ را با W_{ASE} جدید دوباره حل می-کنیم و توزیع وارون را بدست می‌آوریم. به همین ترتیب گام‌های ذکر شده را برای δt بعدی تکرار می‌کنیم.

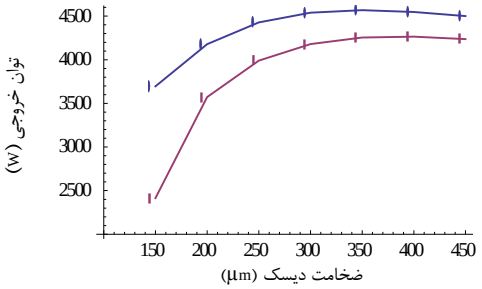
۳- بحث و نتیجه گیری

نتایج حاصل از شبیه‌سازی شامل توزیع فضایی-زمانی جمعیت معکوس بهره ماده فعال و همچنین شارش فوتون ASE و توان خروجی لیزر می‌باشد. به عنوان اولین خروجی مدل مورد بحث یک لیزر پیوسته با دیسکی به قطر ۲cm و ضخامت ۴۰۰μm که با قطر ۱cm پمپاژ می-شود را در نظر می‌گیریم. توان خروجی این لیزر را با دو فرض احتساب فرایند ASE و حذف آن در سیستم لیزر در حالت تعادل بررسی می‌کنیم (شکل ۱). همانطور که انتظار می‌رود در هر دو حالت با افزایش توان دمش، توان خروجی لیزر به صورت خطی زیاد می‌شود. با این تفاوت که حضور ASE در محاسبات باعث تاخیر W ۳۰۰ آستانه لیزر می‌شود. و با همین نسبت در هر مرحله با افزایش توان پمپاژ میزانASE بدون تغییر قابل ملاحظه‌ای ثابت می‌ماند. این نتیجه برآمده از ثابت بودن بهره در شرایط

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]

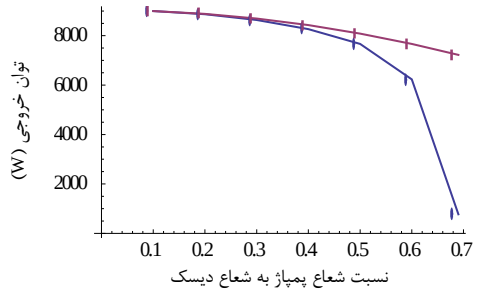


شکل ۱: نتایج حاصل توان خروجی نسبت توان ورودی لیزر. داده‌های دایره‌ای شکل برای سیستمی با حذف اثرات ASE و مربع شکل در حضور ASE می‌باشند.



شکل ۲: تاثیر ضخامت در توان خروجی لیزر. داده‌های دایره‌ای شکل در غیاب اثرات ASE و مربع شکل در حضور ASE می‌باشند.

تعادل برای یک لیزر مشخص می‌باشد. شکل ۲ نشان دهنده تاثیر ضخامت دیسک بر توان خروجی لیزر در دو حالت حضور و عدم حضور ASE است. همانطور که مشاهده می‌شود در هر دو نمودار یک ضخامت بهینه‌ای وجود دارد که بیشترین توان خروجی را در این نقطه می‌توان از یک دیسک مشخص دریافت کرد. با این حال با ورود ASE به محاسبات و کاهش ضخامت، افزایش شدید گسیل پرتو ASE همراه است. این افزایش چشمگیر ناشی از افزایش چگالی دمش جذب شده و در نتیجه افزایش بهره سیستم لیزر است. (نرخ توان دمش جذب شده رابطه‌ای معکوس با ضخامت دیسک دارد. [۵]). در نمودار آخر (شکل۳) به بررسی رابطه نسبت شعاع لکه دمش به شعاع دیسک (r_{pump}/r_{disk}) و توان خروجی یکبار در حضور ASE و بار دیگر در غیاب آن پرداخته‌ایم. به وضوح با افزایش شعاع لکه دمش به دلیل افزایش چشمگیر طول مسیر فوتون محبوس ASE، توان خروجی به شدت کاهش یافته که نشان دهنده افزایش ناگهانی گسیل فلورسانس تقویت شده در دیسک می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با نزدیک شدن شعاع لکه به شعاع دیسک، توان قابل استخراج به شدت محدود می‌شود و این عاملی است که موجب می‌شود شرکت‌های ساخت لیزرهای دیسک به منظور دستیابی به حداکثر توان ممکن از یک تک دیسک،



شکل ۳: توان خروجی لیزر در دیسکی با شعاع‌های نرمال شده متفاوت.

بیش از نیمی از قطر دیسک را پمپاژ نمی‌کنند [۷].

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله شبیه‌سازی عددی یک سیستم لیزر دیسک نازک با احتساب اثرات گسیل خودبخودی تقویت شده ارائه شده‌است. مدل مورد بحث یک تحلیل فضایی-زمانی با کمک روش ردیابی پرتو برای محاسبه ASE و حل اجزای محدود معادلات نرخ برای محاسبه دینامیک سیستم می‌باشد. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی بیانگر افزایش اثرات ASE با کاهش ضخامت دیسک و همینطور کاهش آن با کاهش قطر لکه دمش نسبت به قطر دیسک می‌باشد. بنابراین به نظر می‌رسد بر خلاف روند خنک-سازی که خواهان دیسکی با ضخامت کمتر است، ملاحظات ASE رقیب جدی در ایجاد محدودیت در کم کردن ضخامت کریستال می‌باشد.

مراجع

[1] C.Stewen et al. "A 1-kW Continuous wave thin disk laser", IEEE J. of Selected Topics in Q.E. 6 650-657 (2000).

[2] L. Allen, G. Peters, Physical Review A, No8, 2031, (1973)

[3] G. J. Linford, E. R. Peressin, W. R. Sooy, M. L. Speath, Appl. Optics, 13, 379 (1974).

[4] I. Okuda and M. J. Shaw, "Gain Depletion due to Amplified Spontaneous Emission in Multi-Pass Laser Amplifier," Appl. Phys. B 54, 506 (1992).

[5] J. Speiser, "thin disk laser-Energy Scaling," Laser Physics, 19, No.2, 274 (2009)

[6] M. Najafi*, A. Sepehr, A.H. Golpaygani, J. Sabbaghzadeh, "Investigation of Amplified Spontaneous Emission Influence on Thin Disk Laser", *3rd Iranian Conference on Photonics Engineering, proceeding 221-224*

[7] *K. Contag, U. Brauch, S. Erhard, A. Giesen,I. Johannsen, M. Karszewski, C. Stewen, A.Voss*, in: *Farrukh, U. O.; Basu, S.* (Hrsg.):Modeling and Simulation of Higher-PowerLaser Systems IV. Bellingham (WA):SPIE, 1997, p. 23 (SPIE Proc. Vol. 2989).

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]