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 تشدیدگرهای ناپایدار در لیزر دیسک نازک به روش عددی

رضا سعیدی‌زاده، مهدی شایگان‌منش

دانشکده فیزیک دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، نارمک

چکیده - در این مقاله به مطالعه‌ی عددی تشدیدگرهای ناپایدار در لیزر دیسک پرداخته شده است. با استفاده از انتگرال کولینز و تئوری پراش، محاسبات برای تشدیدگر هم‌کانون شاخه مثبت صورت گرفته است. محیط فعال به کار گرفته شده به صورت یک دیسک نازک می‌باشد که اثرات لنز حرارتی در آن در نظر گرفته شده است. محاسبات، نشان می‌دهد که بواسطه اتلاف بالای تشدیدگر ناپایدار، محیط فعال استفاده شده نمیتواند ضخامت خیلی کم داشته باشد همچنین از آنجایی که طراحی پارامترهای تشدیدگر برای توان پمپاژ بیشینه انجام شده است پایداری توان خروجی تنها در بیشینه توان پمپاژ وجود دارد و در توان‌های پمپاژ کمتر از بیشینه، ناپایداری توان خروجی مشاهده می‌گردد.

کلید واژه- تشدیدگر ناپایدار، لنز حرارتی، لیزر دیسک

Numerical investigation on thin disk laser with unstable resonator

Reza Saeedizadeh, Mahdi Shayganmanesh

Department of Physics, Iran University of Science and Technology, Narmak, Tehran, Iran

Abstract- In this paper a disk laser with confocal unstable resonator is studied numerically. Using Collins integral and diffraction theory, the calculations are conducted for a positive branch confocal unstable resonator. The active medium of the laser is disk shape and thermal lensing effect is considered in calculations. Laser beam profile and output power is calculated in this paper. Results shows that using very thin disk (about 200 micrometer) is impossible due to high magnitude of losses in unstable resonator. The calculations also shows instabilities in output power for lower than maximum pumping power.

Keywords: Disk laser, Unstable resonator, Thermal lensing

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30]

۱- مقدمه

به دلیل کاربردهای فراوان لیزر در دانش و فناوری، پیشرفت‌های آن از اهمیت بالایی برخوردار است. لیزر دیسک نیز از این قضیه مستثنی نمی‌باشد. این نوع لیزر از جمله لیزرهای حالت جامد است که قادر به تولید باریکه-ای با توان و کیفیت خوب می‌باشد.[۱] در این لیزرها به علت ضخامت کم دیسک، انتقال گرما از دیسک به خنک-کننده به صورت یکنواخت انجام می‌پذیرد. با توجه به اینکه اثرات مخرب گرمایی در محیط فعال معمولاً ناشی از گرادیان دما هستند، این انتقال یکنواخت گرما باعث کاهش تأثیرات گرمایی در محیط فعال می‌شود. تشدیدگرهایی که عمدتاً در لیزر دیسک استفاده می‌شود تشدیدگرهای پایدار می‌باشد. در تشدیدگرهای پایدار استحصال باریکه با کیفیت مناسب در توان‌های خروجی بالا کار مشکلی است و برای افزایش توان خروجی، باید اندازه‌ی لکه پمپاژ روی دیسک را افزایش داد. این امر باعث می‌شود که مدهای عرضی مرتبه‌ی بالا نیز امکان نوسان پیدا کنند و وجود این مدهای عرضی باعث کاهش کیفیت پرتو می‌شود.

در صورت استفاده از تشدیدگرهای ناپایدار می‌توان این مشکل را برطرف کرد و به طور همزمان توان خروجی و کیفیت پرتو را بهبود بخشید.[۲] یکی از نقاط ضعف تشدیدگرهای ناپایدار، اتلاف بالای آنها می‌باشد. از طرفی تأثیرات پراشی لبه‌های آینه خروجی نیز باعث کاهش کیفیت پرتو می‌شود. چنانچه در تشدیدگر ناپایدار پارامتر بزرگنمایی عدد کوچکی باشد، اثرات مخرب پراش از لبه بیشتر خواهد بود. برای حل این مشکل باید بهره لیزر را افزایش داد. به عنوان یک راه حل می‌توان از چند دیسک برای یک تشدیدگر استفاده کرد، یا اینکه می‌توان برای از بین بردن تأثیرات پراشی، از آینه‌های با ضریب بازتاب متغیر به عنوان آینه‌ی خروجی استفاده نمود. راه حل دیگر برای جبران این اتلاف، افزایش ضخامت محیط فعال است. در این مقاله، تأثیر افزایش ضخامت دیسک بر روی توان خروجی و همچنین تأثیر افزایش توان پمپاژ روی توان خروجی و توزیع شدت باریکه لیزر مورد بررسی قرار خواهد گرفت. علاوه بر این، می‌توان نسبت طول به عدد فرنل را در بزرگنمایی‌های مختلف برای تشدیدگر ناپایدار مشاهده کرد. شبیه سازی‌ها با به کارگیری تشدیدگر ناپایدار هم‌کانون شاخه مثبت انجام شده است.

۲- تئوری محاسبات

حرکت رفت و برگشتی باریکه لیزر و برخورد آن با آینه-های تشدیدگر باعث پراشیدگی آن می‌شود. برای بررسی اینگونه رفتارها می‌توان از اپتیک موجی (پراشی) استفاده کرد. میدان الکتریکی پرتوهای پراشیده شده از انتگرال کولینز محاسبه می‌شود.[۲]

$$u_2(x_2,y_2)=\frac{-ik}{2\pi B}\exp(-ikL)\iint u_1(x_1,y_1)\times\exp\{\frac{-ik}{2B}[A(x_1^2+y_1^2)-2(x_1x_2+y_1y_2)+D(x_2^2+y_2^2)]\}dx_1dy_1 \quad (۱)$$

که در این معادله، k عدد موج، L طول تشدیدگر، A، B و D عناصر ماتریس انتقال، x_1 و y_1 مختصات نقاط روی مقطع باریکه اولیه و نهایتاً x_2 و y_2 مختصات نقاط روی مقطع باریکه‌ی پراش‌یافته، می‌باشند.

علاوه بر اثر پراش، اثرات گرمایی نیز به دلیل وجود پرتو پمپاژ و پرتو لیزر، در محیط فعال به وجود می‌آید. این اثر گرمایی را می‌توان معادل با یک لنز حرارتی در نظر گرفت. با در نظر گرفتن این لنز حرارتی، پارامترهای یک تشدیدگر هم‌کانون شاخه مثبت را می‌توان از روابط (۲) تا (۶) بدست آورد.[۳]

$$a=\frac{b}{1.05M} \quad (۲)$$

$$R_1=\frac{b^2}{\lambda N_{eq}(1.05M)^2} \quad (۳)$$

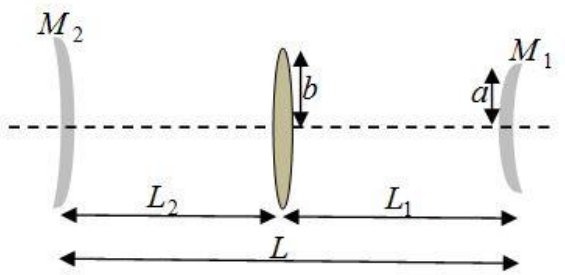
$$L_1=\frac{L_2[2-D_0(M-1)R_1]+(M-1)R_1}{2(D_0L_2-1)} \quad (۴)$$

$$L=L_1+L_2-D_0L_1L_2 \quad (۵)$$

$$R_2=\frac{L}{L(1-D_0L_1)-\frac{a^2(M^2-1)}{4MN_{eq}\lambda}} \quad (۶)$$

در این معادلات، M بزرگنمایی، b اندازه‌ی نیم-قطر لنز، a اندازه‌ی نیم-قطر آینه‌ی کوچک، λ طول‌موج لیزر، N_{eq} عدد فرنل معادل، R_1 شعاع انحنای آینه‌ی کوچک، R_2 شعاع انحنای آینه‌ی بزرگ، L_1 فاصله‌ی آینه‌ی اول تا لنز ، L_2 فاصله‌ی آینه‌ی دوم تا لنز و D_0 توان شکست لنز می‌باشد. (شکل۱)

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30]



شکل۱ : نمایش طرحواره‌ای تشدیدگر ناپایدار هم‌کانون شاخه مثبت در حضور یک لنز.

برای استفاده از معادلات مذکور، پنج پارامتر عدد فرنل معادل (N_{eq})، بزرگنمایی (M)، توان شکست (D_0)، اندازه‌ی نیم-قطر لنز (b) و فاصله‌ی بین آینه‌ی دوم و لنز (L_2) به عنوان پارامترهای ورودی به حساب می‌آیند. در بخش بعدی وابستگی بین عدد فرنل معادل و طول تشدیدگر را در بزرگنمایی‌های مختلف نشان خواهیم داد.

به کمک انتگرال کولینز و با استفاده از روش تکرار، میدان الکتریکی باریکه تشدیدشونده در تشدیدگر (u) بدست می‌آید و توسط آن می‌توان شدت لیزر را بدست آورد.[۳]

$$I = \tfrac{1}{2} c \xi |u|^2 \qquad (۷)$$

که c سرعت نور و ξ ثابت گذردهی الکتریکی می‌باشد. در حضور محیط فعال، پرتو نور تقویت می‌شود. تقویت باریکه را می‌توان با استفاده از معادلات (۸) و (۹) فرمولبندی نمود.

$$g = \frac{g_0}{1 + I_{\text{in}} / I_{\text{sat}}} \qquad (۸)$$

$$I_{\text{out}} = I_{\text{in}} \exp(gl) \qquad (۹)$$

در این معادلات، g_0 بهره سیگنال کوچک، I_{in} شدت پرتو ورودی به محیط فعال، I_{sat} شدت اشباع، g بهره محیط فعال، I_{in} شدت میدان الکتریکی باریکه ورودی به محیط فعال، l ضخامت محیط فعال و I_{out} شدت میدان الکتریکی باریکه خروجی از محیط فعال پس از تقویت است. نهایتاً توان خروجی لیزر با استفاده از معادله (۱۰) محاسبه می‌شود.[۳]

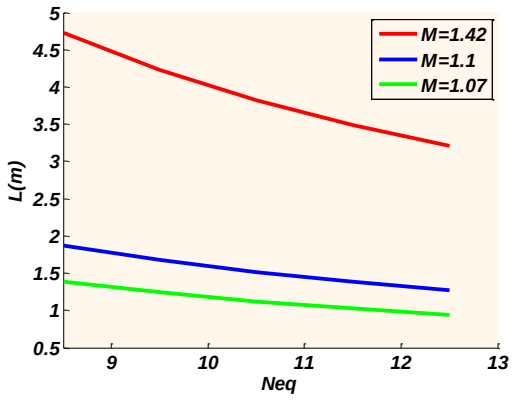
$$P_{\text{out}} = \int I \, dA \qquad (۱۰)$$

که در آن dA مساحت کناره‌های آینه‌ی کوچک است که پرتو لیزر از آن خارج می‌شود. با در اختیار داشتن روابط ذیل توزیع شدت و توان خروجی طی رفت و برگشت‌های باریکه درون تشدیدگر محاسبه می‌شود.

۳- نتایج

همانطور که ذکر شد برای انجام محاسبات برخی پارامترهای تشدیدگر باید به عنوان ورودی محاسبات در نظر گرفته شوند. در ابتدا ارتباط بین عدد فرنل معادل و طول تشدیدگر در بزرگنمایی‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است(شکل۲).

$b = 5\ mm$, $D_0 = 1\ m^{-1}$, $L_2 = 30\ cm$



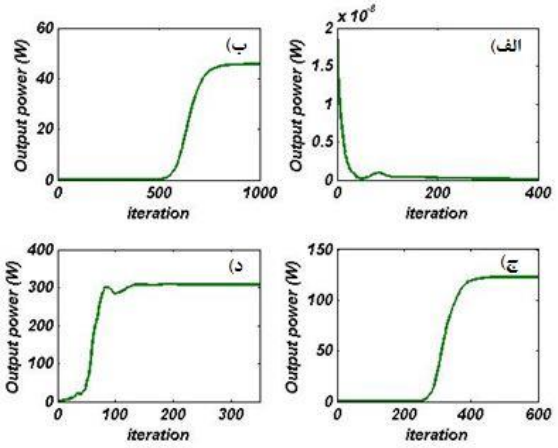
شکل۲: محاسبه طول تشدیدگر نسبت به عدد فرنل در بزرگنمایی-های مختلف.

بر اساس شکل ۲ با افزایش عدد فرنل معادل و کاهش بزرگنمایی، می‌توان طول کوتاه‌تری برای تشدیدگر در نظر گرفت.

در ادامه، توان خروجی به ازای چهار ضخامت مختلف برای محیط فعال محاسبه شده است. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است با افزایش ضخامت، توان خروجی افزایش و زمان انجام محاسبات کاهش می‌یابد، همانطور که در شکل ۳-الف دیده می‌شود دیسک خیلی نازک بواسطه بهره کم برای تشدیدگر ناپایدار مناسب نمی‌باشد. در این محاسبات پارامترهای ورودی به صورت ذیل بوده است:

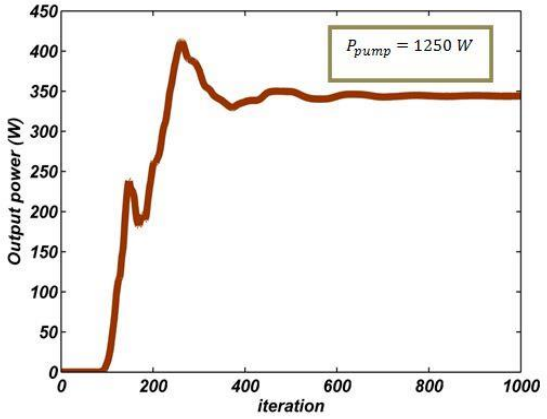
$N_{eq} = 8.5$ ، $M = 1.1$ ، $g_0 = 110\ m^{-1}$ ، $D_0 = 1\ m^{-1}$ ،
$b = 5\ mm$ و $L_2 = 5\ cm$

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30]

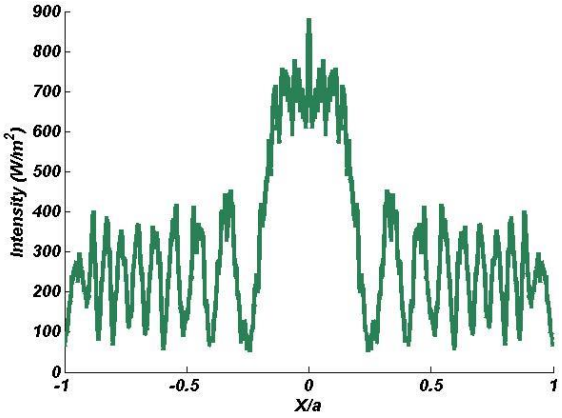


شکل۳ : محاسبه توان خروجی لیزر دیسک با تشدیدگر هم‌کانون شاخه مثبت با ضخامت الف)۴۰۰ میکرون ب)۶۰۰ میکرون، ج)۸۰۰ میکرون، د)۱۰۰۰ میکرون.

در ادامه‌ی نتایج، تأثیر افزایش توان پمپاژ بر روی توان خروجی و توزیع شدت پرتو نشان داده خواهد شد. به هنگام تغییر توان پمپاژ دو پارامتر توان شکست (D_0) و بهره‌ی سیگنال کوچک (g_0) تغییر می‌کنند. با افزایش توان پمپاژ، توان شکست کریستال لیزر کاهش و بهره‌ی سیگنال کوچک افزایش می‌یابد. بهره‌ی سیگنال کوچک فقط بر روی میزان تقویت پرتو عبوری تأثیر می‌گذارد، اما توان شکست که در واقع نشان دهنده میزان قدرات لنز حرارتی است یکی از پارامترهای ورودی طراحی تشدیدگر ناپایدار است. بنابراین فقط به ازای یک مقدار معین برای توان شکست، تشدیدگر شبیه‌سازی شده، تشدیدگر هم-کانون شاخه مثبت خواهد بود و در سایر مقادیر توان شکست، تشدیدگر هم‌کانون ایجاد نخواهد شد. در محاسبات انجام شده، طراحی تشدیدگر به گونه‌ای شبیه-سازی شده است که در توان پمپاژ بیشینه، تشدیدگر هم-کانون شاخه مثبت باشد. شکل(۴) توان خروجی لیزر را بر حسب تعداد دفعات رفت و برگشت های باریکه درون تشدیدگر به ازای توان پمپاژ بیشینه نشان می‌دهد. در توان پمپاژ بیشینه، پروفایل شدت باریکه لیزر خروجی به صورتی که در شکل ۵ نشان داده شده است می‌باشد.



شکل۴ : توان خروجی در لیزر دیسک نازک با تشدیدگر ناپایدار هم-کانون شاخه مثبت برای توان پمپاژ ۱۲۵۰ وات.



شکل۵ : توزیع شدت پرتو در لیزر دیسک نازک با تشدیدگر ناپایدار هم‌کانون شاخه مثبت، برای توان پمپاژ ۱۲۵۰ وات.

۴- نتیجه‌گیری

بر اساس اپتیک پراشی پروفایل شدت باریکه لیزر دیسک با تشدیدگر ناپایدار محاسبه شده است. بر اساس این محاسبات همچنین توان خروجی لیزر محاسبه گردیده است. محاسبات نشان می‌دهند که بواسطه اتلاف بالای تشدیدگرهای ناپایدار استفاده از دیسک خیلی نازک، امکان پذیر نیست. همچنین محاسبات ناپایداری توان خروجی در توانهای پمپاژ کمتر از بیشینه را نشان می‌دهند.

مراجع

[1] Giesen, A., Hollemann, G., Johannsen, I.: "Diode-pumped Nd:YAG thin disc laser". Proc. Conf. Lasers ElectroOpt. Opt. Soc. Am. **29–30** (1999).

[2] Siegman, A.E.: "*Laser beams and resonators"*: the 1960s. IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.6(6), 1380–1388 (2000).

[3] Hodgson, N., Weber, H.: "*Laser Resonators and Beam Propagations*", 2nd edn. Springer, New York (2005).

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30]