

## طراحی و ساخت لیزر حالت جامد Nd:YAG دمیده شده با لامپ درخش زنون در کاواک سرامیکی و اندازه‌گیری برخی پارامترهای فیزیکی آن

آزاده ابراهیم‌زاده<sup>۱</sup>، علیرضا مجتبی<sup>۲</sup>، علی شیری<sup>۳</sup>، سید مهدی موسوی<sup>۳</sup>، محمد صبائیان<sup>۱\*</sup>

<sup>۱</sup>گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

<sup>۲</sup>پژوهشکده اپتیک و لیزر، دانشگاه مالک اشتر، شاهین‌شهر، ایران

<sup>۳</sup>بخش فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۱۱ ویرایش نهایی: ۱۳۹۵/۰۷/۳۰ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۰۳

### چکیده

در این مقاله، گزارش طراحی، ساخت و بهینه‌سازی لیزر حالت جامد Nd:YAG دمیده شده با لامپ درخش زنون در کاواک سرامیکی ارائه می‌شود. از یک میله لیزری Nd:YAG با درصد آلیش ۱/۱٪ و ابعاد  $80\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  به‌عنوان محیط فعال و از یک لامپ درخش زنون با قطر داخلی ۷ میلی‌متر، طول قوس ۳ اینچ و بسامد ۰/۲ هرتز به‌عنوان منبع دمش استفاده شد. ابتدا خروجی لیزر با استفاده از روش فاین‌دلی-کلی بر اساس بهترین آینه خروجی، بهینه شد. مقدار بهره برای انرژی دمش الکتریکی ۴/۹ ژول، برابر با ۰/۹ و اتلاف برابر با ۰/۰۵ به‌دست آمدند. بنابراین، مقدار بازتابندگی بهینه برای این مقادیر حدود ۳۲٪ به‌دست آمد. از آینه با بازتابندگی ۲۵٪ (که نزدیک‌ترین مقدار توان بازتاب آینه موجود در آزمایشگاه و نزدیک به بازتابندگی بهینه بود) در چیدمان آزمایشگاهی استفاده کردیم. بازده کل الکتریکی به نوری لیزر Nd:YAG در طول موج ۱۰۶۴ نانومتر به‌ازاء آینه ۲۵٪ حدود ۳٪ اندازه‌گیری شد. با بسامد تکرار دمش ۰/۲ هرتز و انرژی الکتریکی دمش ۹ ژول، قطر لکه برابر با ۳/۹۸ میلی‌متر و عامل کیفیت برابر با ۱۷ به‌دست آمد. نتایج به‌دست آمده، خاص لیزر طراحی شده در این مقاله است.

**کلیدواژگان:** لیزر Nd:YAG، عامل کیفیت، زاویه واگرایی پرتو، بهره سیگنال کوچک، جفت‌شدگی خروجی بهینه

### مقدمه

فراوان دارند. به‌علت عمق نفوذ بالای لیزر Nd:YAG در بافت و امکان انتقال نور این لیزر در موجبر، این لیزر در بسیاری از روش‌های آندوسکوپی به‌کار برده می‌شود [۷]. در دندانپزشکی نیز برای جراحی بافت‌های حساس دهانی از این لیزر استفاده می‌شود [۸]. از دیگر کاربردهای لیزر Nd:YAG می‌توان به ساخت مسافت سنج لیزری زمان پرواز به‌صورت پالسی اشاره کرد [۹]. ماده فعال لیزرهای حالت جامد، باید دارای خواصی چون سختی، بی اثر بودن از نظر شیمیایی، عدم وجود تنش درونی و عدم تغییر در ضریب شکست باشند. معمولاً محیط فعال در لیزرهای حالت جامد به‌صورت

در حوضه پژوهش و کاربرد، لیزرهای حالت جامد در دهه گذشته بیش از سایر لیزرها مورد توجه بوده‌اند [۱]. کارایی، پایداری و امکان دستیابی به توان‌های بالا به‌صورت پیوسته و پالس‌های فوق‌کوتاه، باعث شده است تا لیزرهای حالت جامد نسبت به سایر لیزرها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار باشند [۲]. لیزرهای حالت جامد در تحقیقات (به‌ویژه در طیف‌سنجی و اپتیک غیرخطی)، ارتباطات، پزشکی و صنعتی [۳ و ۴] سنجش از دور، جراحی‌های میکرو، محدوده‌یابی [۵ و ۶] کاربرد

\*نویسنده مسئول: sabaieian@gmail.com

جذب بلور است. اگر چه با جایگزینی روش دمش با دیود، می‌توان بازده این لیزرها را به مقدار زیادی افزایش داد، اما در موارد زیادی استفاده از دمش لامپ درخش مناسب‌تر، بلکه ضروری‌تر است. توان خروجی کم، تغییر طول موج خروجی با دما و قیمت بالای دیودها باعث شده است که هنوز استفاده از لامپ درخش مرسوم باشد [۱۹-۲۲]. یکی دیگر از اجزاء مهم لیزر، کاواک لیزری است. کاواک لیزر بنیادی‌ترین بخش سازنده یک لیزر است، چرا که نه تنها باریکه لیزری مورد نظر را فراهم می‌کند، بلکه همه بخش‌های دیگر سازنده لیزر نیز، از کوچکترین قطعات گرفته تا بزرگترین آنها، بر پایه ویژگی‌های کاواک لیزر ساخته می‌شوند. بازده انتقال انرژی از چشمه به ماده فعال، قسمت عمده کل بازده لیزر را تشکیل می‌دهد. شکل کاواک لیزر به نوع دمش و شکل محیط فعال بستگی دارد. در لیزرهای دمیده شده با لامپ، بهترین شکل هندسی برای میله و لامپ استوانه‌ای می‌باشد. در این حالت، نور منبع دمش در جهت عمود بر پرتو لیزر به محیط فعال برخورد می‌کند. رایج‌ترین نوع کاواک دمش، استوانه بیضوی با ضریب انعکاس بالا می‌باشد که میله و لامپ درخش در دو کانون آن قرار دارند (شکل الف) [۲۳ و ۳]. اگر استوانه بیضوی، میله و لامپ را به صورت فشرده احاطه کند، به آن هندسه بیضوی جفتیده نزدیک گویند. نوع دیگر کاواک‌ها، کاواک‌های بازتابنده پخشی هستند. در این کاواک‌ها، لامپ درخش و میله لیزر در مکانی نزدیک به هم بر روی یک محور قرار دارند. بازده این کاواک‌ها از کاواک‌های تک بیضی کمتر است، ولی توزیع دمایی این کاواک‌ها بسیار یکنواخت‌تر از کاواک‌های بیضی است و بنابراین نمایه عرضی پرتوی بهتری نسبت به کاواک‌های تک بیضی دارند (شکل ب). گونه دیگری از کاواک‌ها،

ترکیب یون-میزبان است. مواد میزبان لیزری، شامل شیشه‌ها، بلورها و سرامیک‌هایی [۱۲-۱۰] هستند که ناخالصی‌هایی مانند عناصر کمیاب خاکی، یون‌های فلزات واسطه و غیره به‌عنوان ناخالصی به آن‌ها اضافه می‌شوند. از میان این مواد، بلور لیزری Nd:YAG به دلیل سختی، کیفیت نوری خوب، رسانندگی گرمایی بالا و دارا بودن خط فلوئورسانس تیز، بیشترین کاربرد را دارد و خوش‌رفتارترین لیزر حالت جامد لقب گرفته است [۳، ۱۳، ۱۴]. منابع دمش نوری که به‌طور متعارف در لیزرهای حالت جامد مورد استفاده قرار می‌گیرند، عبارتند از لامپ‌های قوس<sup>۱</sup>، لامپ‌های درخش<sup>۲</sup> و لیزرهای دیودی. در سامانه‌های لیزری مدرن، که در آنها از لیزرهای دیودی به‌عنوان منابع دمش استفاده می‌شود، بازده تبدیل نور به نور، به نسبت سامانه‌هایی که در آنها از لامپ‌های درخش استفاده می‌شود، خیلی بالاتر است [۱۵]، ولی قیمت تمام شده لیزرهای دمیده شده با لامپ درخش و قوس، بسیار کمتر از دیود است. از نظر نوع دمش، بلورهای حالت جامد عموماً به دو صورت دمیده می‌شوند: دمش از انتها<sup>۳</sup> و دمش جانبی<sup>۴</sup>. دمش جانبی توسط لامپ درخش و لیزرهای دیودی و دمش از انتها فقط توسط لیزرهای دیودی انجام می‌شود [۱۶-۱۰]. در دمش از انتها، نور منبع دمش توسط عناصر کانونی کننده از یک طرف (و گاهی از دو طرف) بلور وارد می‌شود و طول بلور را می‌پیماید. در دمش از کنار یا دمش جانبی، نور منبع دمش یک خروجی خطی (یا بیضوی) دارد و سطح جانبی بلور را می‌تاباند. مجموعه بلور و منبع دمش، در یک کاواک بیضوی یا دایره‌ای با سطح آینه‌ای قرار می‌گیرند [۱۰]. بازده بیشتر لیزرهای دمیده شده با لامپ درخش کمتر از ۴٪ است [۱۷ و ۱۸]. علت این امر تطابق ضعیف طیف نشری لامپ درخش با خطوط

<sup>۲</sup> End-pumping<sup>۴</sup> Side-pumping<sup>۱</sup> Arc lamp<sup>۲</sup> Flash lamp

به‌دست آوردیم. سپس پارامترهای فیزیکی خروجی پرتو لیزر، از قبیل اندازه لکه، زاویه واگرایی و عامل کیفیت (عامل  $M^2$ ) را در انرژی‌های مختلف لیزر، اندازه‌گیری کردیم.

### کارهای آزمایشگاهی

برای راه اندازی لیزر، ابتدا یک کاواک بازتابنده جفتیده نزدیک سرامیکی تهیه شد. کاواک سرامیکی از جنس اکسید آلومینیوم ( $Al_2O_3$ ) با بازتابندگی حدود ۹۷/۸٪ در طول موج ۸۰۸ نانومتر و ضریب رسانندگی گرمایی  $10^{-6}$   $\times 7/9$  بود. ابعاد سطح مقطع کاواک سرامیکی برابر با  $15\text{mm} \times 27/7\text{mm}$  و طول آن ۹۹ mm بود. همچنین از یک میله لیزری Nd:YAG با درصد آلیش ۱/۱٪ و ابعاد  $5\text{mm} \times 80$  به‌عنوان محیط فعال و از یک لامپ درخش زنون با قطر داخلی ۷ میلی‌متر و طول قوس ۳ اینچ به‌عنوان منبع دمش استفاده کردیم. ولتاژ کاری لامپ درخش ۸۰۰ ولت بود. از یک برد فرمان برای شارژ و دشارژ خازن‌ها استفاده شد. این برد دارای دو خازن بود که ظرفیت هر کدام ۱۰ میکروفاراد بود. بنابراین شارژ کلی مجموعه، ۲۰ فاراد است. منبع تغذیه حدود ۲۴ ولت به برد فرمان می‌دهد و خازن‌ها شارژ می‌شوند. همچنین برای تنظیم ولتاژ دو سر لامپ درخش از اسیلوسکوپ استفاده کردیم (شکل ۲). درون کاواک، آب خالص جریان داشت؛ چون آب خالص برای طول موج ۸۰۸ نانومتر شفاف است. در ابتدا از یک آینه تخت با بازتابندگی ۲۵٪ در طول موج ۱۰۶۴ نانومتر به‌عنوان آینه جلویی و از یک آینه کاو با شعاع ۵۰۰۰ میلی‌متر با بازتابندگی ۱۰۰٪ در طول موج ۱۰۶۴ نانومتر به‌عنوان آینه عقبی تشدیدگر استفاده کردیم. طول تشدیدگر ۳۳ سانتی‌متر بود. ولتاژ لامپ درخش روی ۸۰۰ ولت تنظیم شد. فرکانس لامپ درخش روی ۰/۲ هرتز تنظیم شد.

کاواک‌های بازتابنده جفتیده نزدیک (RCC) هستند. شکل این کاواک در شکل ۱ج نشان داده شده است.



شکل ۱. طرح‌واره‌ای از کاواک‌های (الف): بیضوی، (ب): بازتابنده پخشی و (ج) بازتابنده جفتیده نزدیک [۲۴].

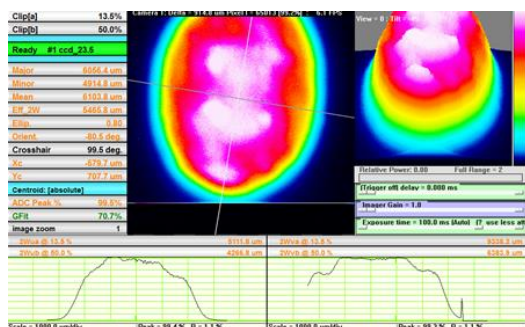
جنس این کاواک‌ها معمولاً از اکسید آلومینیوم است. به‌همین خاطر به آنها کاواک سرامیکی گفته می‌شود [۲۵]. از خواص سرامیک می‌توان به ضریب بازتاب بالای ۹۷/۸٪ در طول موج ۸۰۰ نانومتر، چگالی حجمی پایین  $3\text{mg/m}^3$ ، ۳/۲٪ ضریب انبساط گرمایی پایین  $6^{-1}$   $\times 10 \times 7/9$  و ضریب رسانندگی گرمایی بالا اشاره کرد. بنابراین، اثرات گرمایی کمتری نسبت به کاواک‌های بیضوی دارند. بازدهی این کاواک‌ها نسبت به کاواک‌های تک بیضی کمتر است، اما کیفیت مناسب پرتوی خروجی، اندازه کوچک و سبک بودن آنها از جمله مزایای این نوع کاواک‌ها در مقایسه با کاواک تک بیضی است [۲۴]. به‌همین دلیل، در این کار ما از کاواک سرامیکی برای دمش لیزر استفاده کردیم.

هدف اصلی در کار حاضر، گسترش فن‌آوری لیزرهای دمیده شده با فلش لامپ در کشور با استفاده از کاواک‌های سرامیکی بوده است. همچنین تلاش شده است کیفیت پرتویی که با این روش تولید می‌شود، اندازه‌گیری شود و لیزر از نظر بازده، بهینه شود. برای این کار، ابتدا یک کاواک لیزر Nd:YAG دمیده شده با لامپ درخش زنون که با آب خنک می‌شد را طراحی کردیم. ابتدا با استفاده از روش فاندلی-کلی<sup>۲</sup> [۲۶]، افت و بهره آستانه تشدیدگر را اندازه‌گیری کرده و ضریب بازتاب آینه خروجی را برای بهینه‌کردن خروجی لیزر،

دمیده شده با فلش لامپ در کشور با استفاده از کاواک‌های سرامیکی بوده است. همچنین تلاش شده است کیفیت پرتویی که با این روش تولید می‌شود، اندازه‌گیری شود و لیزر از نظر بازده، بهینه شود. برای این کار، ابتدا یک کاواک لیزر Nd:YAG دمیده شده با لامپ درخش زنون که با آب خنک می‌شد را طراحی کردیم. ابتدا با استفاده از روش فاندلی-کلی<sup>۲</sup> [۲۶]، افت و بهره آستانه تشدیدگر را اندازه‌گیری کرده و ضریب بازتاب آینه خروجی را برای بهینه‌کردن خروجی لیزر،

<sup>۲</sup> Findlay- Clay

<sup>۱</sup> Reflecting close-coupled cavity



شکل ۳. نمایه خروجی پرتو ۱۰۶۴ برای انرژی پالس ۱۱۱ میلی ژول.

با تنظیم آینه‌ها، توانستیم در ابتدا انرژی ۱۱۱ میلی ژول به دست آوریم. نمایه پرتوی لیزر برای انرژی ۱۱۱ میلی ژول با بیم پروفایلر ثبت شد که در شکل ۳ نمایش داده شده است. سپس با تنظیم بهتر آینه‌ها، توانستیم انرژی ۳۰۰ میلی ژول را نیز به دست آوریم.

### اندازه‌گیری بهره سیگنال کوچک و آینه خروجی بهینه

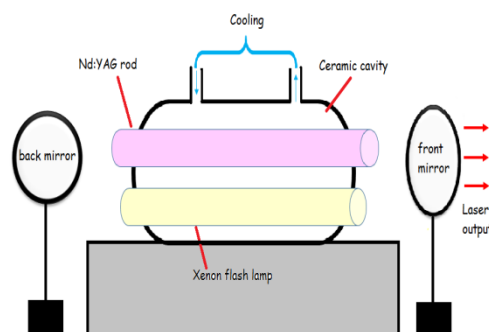
اگر بازتابندگی آینه خروجی<sup>۱</sup> لیزر را در یک بهره سیگنال کوچک<sup>۲</sup> و یا توان دمش مشخص تغییر دهیم، خواهیم دید که توان خروجی برای یک جفت‌شدگی خاص، بیشینه خواهد شد. این رفتار قابل پیش‌بینی است؛ چرا که توان خروجی در بازتابندگی‌های پایین صفر است، چون لیزر به حالت آستانه نمی‌رسد. در بازتابندگی ۱۰۰٪ نیز صفر است؛ چون توانی از تشدیدگر خارج نمی‌شود. رابطه زیر، توان خروجی بیشینه را می‌دهد:

[۲۶]:

$$P_{out\ max} = A_b I_s \alpha_0 \left[ \sqrt{\frac{g_0 l}{\alpha_0 l}} - 1 \right]^2 \quad ۱$$

که در آن  $g_0$  ضریب بهره سیگنال کوچک،  $\alpha_0$  ضریب افت،  $l$  طول بلور،  $I_s$  شدت اشباع و  $A_b$  سطح مقطع پرتو

تصویر چیدمان آزمایش همراه با سیستم خنک‌کننده و مدار لامپ درخش در شکل ۲ آمده است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲. (الف) نمای شماتیک لیزر Nd:YAG دمیده شده با لامپ درخش زنون، (ب) چیدمان آزمایشگاهی لیزر Nd:YAG دمیده شده با لامپ درخش همراه با سیستم خنک‌کننده و مدار لامپ درخش، (ج): مدار لامپ درخش به همراه اسلوسکوپ، منبع تغذیه و برد فرمان.

<sup>۲</sup> Small signal gain

<sup>۱</sup> Output coupler

یک سامانه چهار ترازوی آرمانی رخ می‌دهد، می‌توان نوشت:

$$P_{elect} = \frac{AI_s}{\eta_{excit}} g_0 l \quad 5$$

که  $A$  سطح مقطع ماده فعال،  $I_s$  شدت اشباع و  $\eta_{excit}$  بازده برانگیختگی است. بازده برانگیختگی به صورت نسبت توان دسترس‌پذیر به توان دمش الکتریکی تعریف می‌شود. با استفاده از روابط بالا و با فرض مربعی بودن تپ دمشی، می‌توان نوشت [۲۳]:

$$P_{elect,th} = \frac{AI_s}{\eta_{excit}} \left| \ln \sqrt{R} \right| + \left| \ln(V_D V_S) \right| \quad 6$$

که در آن  $V_D$  اتلاف ناشی از پراش و  $V_S$  سازه اتلاف ناشی از پراکندگی و جذب در هر رفت و برگشت است. با توجه به رابطه بالا، اگر نمودار توان دمش حالت آستانه را برحسب  $\left| \ln \sqrt{R} \right|$  رسم کنیم، با استفاده از شیب نمودار، کمیت  $AI_s/\eta_{excit}$  و با استفاده از رابطه ۵، بهره سیگنال کوچک ( $g_0 l$ ) به‌آزاء هر توان دمش الکتریکی را می‌توانیم به‌دست آوریم [۲۶]. برای این کار، از سه آینه خروجی با بازتابندگی ۱۸، ۲۵ و ۶۰ درصد در طول موج لیزری ۱۰۶۴ نانومتر استفاده کردیم و توان دمش الکتریکی آستانه و بالاتر از آستانه را برای هر کدام از آنها به‌دست آوردیم. نتایج اندازه‌گیری در نمودار ۴ نشان داده شده است. با توجه به نمودارهای شکل ۴، در انرژی‌های دمش پایین، آینه‌های با بازتابندگی بالاتر، بازده خروجی بالاتر و انرژی دمش آستانه پایین‌تری دارند.

روی آینه خروجی است. همچنین بازده خروجی بهینه با رابطه [۲۳]:

$$\eta_{excit,max} = \frac{\alpha_0 l}{g_0 l} \left[ \sqrt{\frac{g_0 l}{\alpha_0 l}} - 1 \right]^2 \quad 2$$

داده می‌شود. با استفاده از رابطه جفت‌شدگی خروجی بهینه که به صورت زیر داده می‌شود [۲۶]:

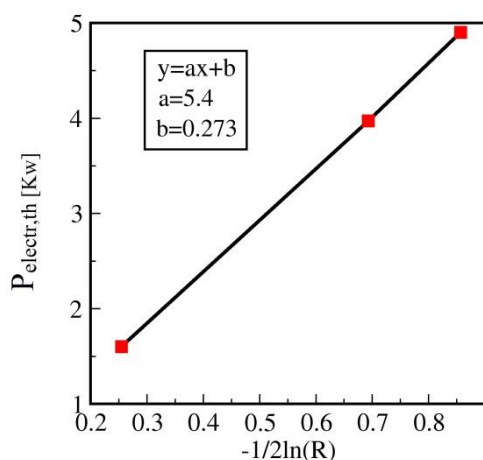
$$\ln R_{opt} = -2\alpha_0 l \left[ \sqrt{\frac{g_0 l}{\alpha_0 l}} - 1 \right]^2 \quad 3$$

می‌توانیم توان بازتاب بهینه آینه خروجی ( $R_{opt}$ ) و توان خروجی بیشینه را به‌دست آوریم. برای محاسبه این کمیت‌ها، به پارامترهایی همچون، بهره سیگنال کوچک ( $g_0 l$ ) و اتلاف ( $\alpha_0 l$ ) در هر رفت و برگشت درون تشدیدگر نیاز داریم. این پارامترها را می‌توان توسط روش فاینلدی-کلی<sup>۱</sup> به‌دست آورد [۲۶]. این روش بر پایه رابطه بین اتلاف و بهره آستانه استوار است. توان دمش را برای مقادیر مختلف جفت‌شدگی خروجی، آنقدر کاهش می‌دهیم تا نوسانات لیزری از بین برود. بهره سیگنال کوچک در حالت آستانه ( $g_0 l_{th}$ ) برای یک تشدیدگر با بازتابندگی جفت‌شدگی خروجی  $R$ ، همه اتلاف‌های ناشی از پراش، پراکندگی، جذب و جفت‌شدگی خروجی را جبران می‌کند، یعنی:

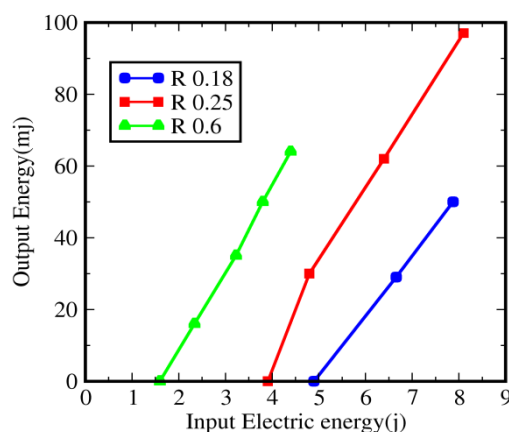
$$\exp(g_0 l_{th}) \sqrt{R} V_D V_S = 1 \quad 4$$

که  $V_D$  اتلاف ناشی از پراش ( $=1-\text{loss}$ ) و  $V_S$  سازه اتلاف ناشی از پراکندگی و جذب در هر رفت و برگشت است. اگر فرض کنیم که بهره سیگنال کوچک در هر سطح مقطع از ماده لیزری ثابت است و گذار لیزری در

<sup>۱</sup> Findlay-Clay



شکل ۵. نمودار فایندلی-کلی برای لیزر Nd:YAG تپی (اندازه میلی لیزری ۸۰٪\*۵ میلی متر است).



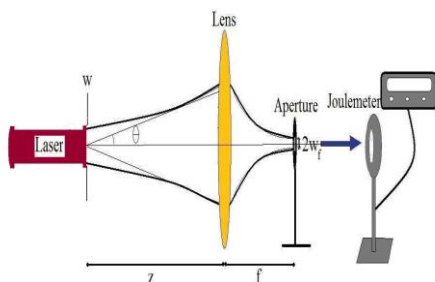
شکل ۴. اندازه گیری تغییرات انرژی لیزر Nd:YAG بر حسب انرژی دمش الکتریکی برای بازتابندگی های گوناگون آینه خروجی

جدول ۱. ولتاژ آستانه بر حسب توان بازتاب آینه جلویی کاواک لیزر.

R%	V <sub>th</sub> (V)
۱۸	۷۰۰
۲۵	۶۳۰
۶۰	۴۰۰

## اندازه گیری اندازه لکه و زاویه واگرایی پرتوی خروجی لیزر

شکل ۶ شمای آزمایشگاهی برای اندازه گیری زاویه واگرایی خروجی لیزر را نشان می دهد.



شکل ۶. چیدمان آزمایشگاهی برای اندازه گیری زاویه واگرایی پرتو (1) laser: لیزر Nd:YAG، lens: عدسی، Aperture: روزنه و Joulemeter: ژول متر [۲۶].

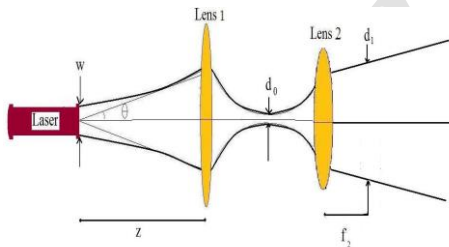
مطابق شکل ۶، از یک عدسی با فاصله کانونی معلوم،  $f$ ، برای طول موج لیزری استفاده کردیم. اگر پرتوی لیزر به هنگام خروج از آینه جلویی، دارای شعاع لکه  $w$  و زاویه واگرایی  $\theta$  باشد، با استفاده از قانون ABCD می توان به سادگی اثبات کرد که زاویه واگرایی از رابطه [۱]:

شکل ۵ نمودار فایندلی-کلی را برای سه بازتابندگی متفاوت نشان می دهد. شیب نمودار برابر با  $۵/۴$  است. بنابراین با استفاده از رابطه ۵، مقدار  $g_0 l$  برای انرژی دمش الکتریکی  $۴/۹$  ژول، برابر با  $۰/۹$  و اتلاف برابر با  $۰/۰۵$  به دست آمدند. بنابراین، مقدار بازتابندگی بهینه برای این مقادیر به دست آمده  $g_0 l$  و  $\alpha_0 l$ ، از رابطه ۳ برابر با  $۰/۳۲$  به دست آمد. در آزمایشگاه، آینه با نزدیکترین درصد بازتاب به بازتابندگی بهینه،  $۲۵\%$  بود.

انرژی اولیه برسد، توانستیم زاویه واگرایی پرتو را اندازه بگیریم. قطر روزنه ۰/۶۶۲ میلی‌متر شد که با توجه به رابطه ۷ مقدار ۲/۹ mrad محاسبه شد.

### اندازه‌گیری عامل کیفیت پرتو (عامل $M^2$ )

در بخش قبل، زاویه واگرایی پرتو را از طریق اندازه‌گیری قطر لکه پرتو در صفحه کانون عدسی محاسبه کردیم. در این بخش، عامل کیفیت (عامل  $M^2$ ) را محاسبه می‌کنیم. با استفاده از رابطه  $\omega_f \theta_f = M^2 \lambda / \pi$  می‌توانیم عامل کیفیت پرتو را به دست آوریم. برای این اندازه‌گیری، مطابق شکل ۷ به عدسی دوم احتیاج داریم. اگر قطر لکه را در صفحه کانونی عدسی دوم ( $d_1$ ) اندازه بگیریم، با استفاده از رابطه  $\theta_f = d_1 / (2f_2)$  زاویه واگرایی در کمر پرتویی که بین عدسی ۱ و ۲ تشکیل شده را می‌توانیم به دست آوریم.



شکل ۷. چیدمانی آزمایشگاهی محاسبه عامل کیفیت پرتو  $M^2$  لیزر (Nd:YAG، عدسی اول، lens 1؛ عدسی دوم، lens 2؛ عدسی دوم) [۲۳].

در این آزمایش فرض می‌کنیم که صفحه کانونی عدسی اول بر کمر پرتو منطبق است. با استفاده از رابطه زیر، عامل کیفیت پرتو را می‌توان به دست آورد:

$$M^2 = \frac{\pi d_0 d_1}{\lambda 4 f_2} \quad ۸$$

برای چیدمان لیزر Nd:YAG (شکل ۲) برپاشده با بسامد تکرار دمش ۰/۲ هرتز و انرژی الکتریکی دمش ۹

$$\theta = \omega_f / f \quad ۷$$

به دست می‌آید. با توجه به رابطه بالا، برای محاسبه زاویه واگرایی پرتو لیزر، کافی است شعاع لکه لیزر را در کانون عدسی محاسبه کنیم. برای کاهش خطای آزمایش، بهتر است از یک عدسی با فاصله کانونی بزرگ استفاده شود، زیرا شعاع کمر پرتو لیزر در محل کانون بزرگ‌تر شده و در نتیجه خطای ناشی از اندازه‌گیری فاصله کانونی و کمر لیزر کمتر می‌شود. انرژی لیزر در بسامد تکرار ۰/۲ هرتز با انرژی الکتریکی دمش ۹ ژول حدود ۱۳۸ میلی‌ژول به دست آمد. از یک عدسی کاو با فاصله کانونی  $f=115\text{mm}$  در طول موج  $1064\text{ nm}$  استفاده کردیم. در کانون عدسی نیز یک روزنه قرار دادیم. ابتدا دریچه روزنه را کاملاً باز گذاشته تا انرژی کل پرتو خروجی لیزر Nd:YAG توسط ژول‌متر اندازه‌گیری شود. با گذاشتن روزنه قابل تنظیم در محل کانون، می‌توان قطر کمر پرتوی لیزر را به دست آورد. کافی است انرژی لیزر قبل از روزنه را اندازه‌گیری کنیم. سپس دریچه روزنه را آنقدر کوچک کنیم تا انرژی پشت روزنه به حدود ۸۶ درصد انرژی اولیه برسد. قطر روزنه  $(2\omega_f)$ ، قطر پرتو لیزر را در این نقطه نشان می‌دهد. در آزمایش، انرژی لیزر در جلوی روزنه، ۱۳۲ میلی‌ژول اندازه‌گیری شد (اتلاف انرژی در عدسی به سبب نبودن پوشش ضد بازتاب در طول موج  $1064$  نانومتر است). با کوچک کردن روزنه تا حدی که انرژی لیزر پشت روزنه به حدود  $113$  میلی‌ژول (۸۶٪ انرژی اولیه) برسد، توانستیم شعاع کمر پرتو لیزر را محاسبه کنیم. در این آزمایش، اندازه لکه  $0.8$  میلی‌متر به دست آمد. زاویه واگرایی نیز  $3/4\text{ mrad}$  محاسبه شد. یک بار دیگر زاویه واگرایی پرتو خروجی لیزر را اندازه گرفتیم. این بار انرژی لیزر را کاهش دادیم. انرژی لیزر قبل از روزنه  $60$  میلی‌ژول بود که بعد از روزنه  $54$  میلی‌ژول شد. با بستن روزنه دریچه به اندازه‌ای که انرژی به  $86\%$

ژول، قطر لکه در کانون عدسی دوم با فاصله کانونی ۱۱۱ میلی‌متر را برابر با ۳/۹۸ میلی‌متر و در نتیجه فاکتور  $M^2$  را برابر با ۱۷ به دست آوردیم.

### بحث و نتیجه‌گیری

در این کار، یک لیزر حالت جامد دمیده شده با لامپ فلش طراحی و ساخته شد. با استفاده از یک کاواک سرامیکی و یک میله لیزری Nd:YAG با ابعاد  $80m \times 5m$  و یک لامپ درخش زنون با قطر ۷ میلی‌متر و طول ۳ اینچ و طراحی یک کاواک که توسط خنک‌کننده‌ای با آهنگ شارش آب ۲ لیتر بر دقیقه خنک می‌شد، توانستیم پرتوهایی با طول‌موج ۱۰۶۴ نانومتر تولید کنیم و خصوصیات پرتو و مقدار بهینه انرژی تولیدی آن را اندازه‌گیری کنیم. با رسم نمودار فاینلی-کلی توانستیم بهترین بازتابندگی آینه خروجی را به دست آوریم. این کار با استفاده از یک آینه با درصد بازتابندگی ۲۵ به عنوان آینه خروجی انجام شد. سپس زاویه و اگریبی و عامل کیفیت (عامل  $M^2$ ) پرتوی خروجی را اندازه گرفتیم. با بسامد تکرار دمش ۰/۲ هرتز و انرژی الکتریکی دمش ۹ ژول، قطر لکه‌ای برابر با ۳/۹۸ میلی‌متر و عامل کیفیتی برابر با ۱۷ به دست آمد.

در ایران اندازه‌گیری عامل کیفیت باریکه لیزر Nd:YAG پالسی به روش نایف-ادج<sup>۱</sup> انجام شده است [۲۷]. در این روش، مشخصات باریکه لیزر پالسی چند مدی به کمک مدلسازی در نرم افزار Matlab مورد بررسی قرار گرفته است. در کاری که توسط آزموده سرودی صورت گرفته است، فاکتور کیفیت باریکه لیزر Nd:YAG مقدار ۵۰ به دست آمده است. در یک مطالعه تجربی، فاکتور کیفیت لیزر Nd:YAG دمیده شده با لیزری دیودی توسط یو و همکارانش برحسب توان دمش اندازه‌گیری شده است. آنها مشاهده کردند که

عامل کیفیت، با افزایش توان دمش، افزایش می‌یابد [۲۸]. در این کار، یو و همکارانش توان دمش را، که توسط شش لیزر دیودی که بلور را از اطراف به صورت متقارن می‌دمیدند، تا حداکثر توان ۲۴۰ W افزایش دادند و مقدار عامل کیفیت را حدود ۱۸ اندازه‌گیری کردند. همچنین در کار دیگر، یوکو و همکارانش برای دمش دیودی مقدار فاکتور کیفیت پرتو را ۳۵ اندازه‌گیری کردند [۲۹]. مزنگی و همکارانش لیزر Nd:YAG با دمش لامپ درخش را به صورت عددی شبیه‌سازی کردند و با برپایی تجربی نمایه عرضی پرتو را ثبت کردند [۳۰]. آنها احتمالاً موفق به اندازه‌گیری عامل کیفیت نشده بودند.

گزارش ارائه شده در این مقاله، برای لیزر Nd:YAG دمیده شده با لامپ درخش در کاواک سرامیکی، یکی از موفقترین اندازه‌گیری‌ها برای عامل کیفیت بوده است که مقدار ۱۷ را نشان داد. ما در این کار، نمایه‌های خروجی لیزر را برای بررسی اثرات گرمایی آن نیز اندازه‌گیری کردیم.

### مرجع‌ها

[۱] ی. هانفی، ساخت محیط فعال لیزرهای حالت جامد پیشرفته، مجموعه مقالات نخستین همایش ملی مهندسی اپتیک و لیزر ایران، مرکز تحقیقات کاربردی فیزیک، دانشگاه امام حسین (ع)، تهران، اردیبهشت (۱۳۸۸).

[۲] س. سادات هاشمی، س. قوامی صبوری، م. سلطان‌الکتابی، م. کاوش‌تهرانی، شبیه‌سازی محیط لیزری میله Nd:YAG دمش از پهلوی با در نظر گرفتن اتلاف جذب مجدد، مجموعه مقالات چهاردهمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران، دانشگاه ولیعصر (عج) رفسنجان، بهمن (۱۳۸۶).

[3] A. Choubey, S. Mondal, R. Singh, B.N. Upadhyaya, P.K. Datta, S.M. Oak, Generation of 415W of p-polarized output power in long pulse

<sup>۱</sup> Knife-Edge



- [15] E. Eryilmaz, Design and construction of a cw mode Nd:YAG laser prototype, *Doctoral dissertation, Middle East Technical University*, (2004) 31-49.
- [16] T.Y. Fan, R.L. Byer, Diod laser-pumped solid-state lasers, *IEEE Journal of Quantum Electronic* **24** (1988) 895-912.
- [17] B. Le Garrec, Laser-diode and flash lamp pumped solid-state lasers, In *Proceedings of Conference Light at Extreme Intensities, Brasov* (2009) 111-116.
- [18] H.Yagi, T.Yanagitani, H. Yoshida, M. Nakatsuka, & K. I Ueda, Highly efficient flashlamp-pumped Cr<sup>3+</sup> and Nd<sup>3+</sup> codoped Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> ceramic laser, *Japanese Journal of Applied Physics* **45** (2006) 133.
- [19] J. Khalilzadeh, Influence of dyes doped in solid state polymeric matrices as spectral converters on efficiency of a flash-lamp pumped Nd:YAG laser, *Optical Materials* **30** (2008) 1527-1530.
- [20] H. Yagi et al., Nd<sup>3+</sup>:Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> laser ceramics: Flash lamp pumped laser operation with a UV cut filter, *Journal of Alloys and Compounds* **421** (2006) 195-19
- [21] K. Kawakami, H. Okamura, K. Komurasaki, Optical phase conjugation by four-wave mixing in Nd:YAG laser oscillator for optical energy transfer to a remote target, *Journal of Applied Physics* **117** (2015) 083106.
- [22] Wilson R. Molina, Igor N. Silva, Rodrigo D. da Silva, D. Gustafson, D. Sehr, and F. J. Kim, Influence of saline on temperature profile of laser lithotripsy activation, *Journal of Endourology* **29** (2015) 235-239
- [23] c. Bowness, On the Efficiency of Single and Multiple Elliptical Laser Cavities, *Applied Optics* **4** (1965) 103-107.
- [24] P.H. Bernardes, D. Liang, Tailoring the absorption distribution in lamp-pumped solid-state lasers with fused silica light-guides, *Optics & Laser Technology* **39** (2007) 929-934.
- [25] F. Dochio, L.O. Pallaro, Svelto, Pump cavities for compact pulsed Nd: YAG lasers: a comparative study, *Applied Optics* **24** (1985) 3752.
- operati, *Optics and Laser Technology* **60** (2014) 41- 48.
- [4] Y. Wei. G. Zhang, C. Huang, L. Huang, and H. Shen, High power Nd: YAG lasers operating at 1.3  $\mu\text{m}$  wave band, *Infrared Physics & Technology* **51** (2007) 91-94.
- [5] Y.F. Chen, Y.P. Lan, Comparison between c-cut and a-cut Nd: YVO<sub>4</sub> lasers passively Q-switched with a Cr<sup>4+</sup>: YAG saturable absorber, *Applied Physics B* **74** (2002) 415-418.
- [6] X. Li, X. Yu, J. Gao, J. Peng, F. Chen, J. Yu, D. Chen, *Laser Physics Letter* **5** (2008) 429-432.
- [7] V. Knappe, F. Frank, E. Rohde, Principles of lasers and biophotonic effects, *Photomedicine and Laser Surgery* **22** (2004) 411-417.
- [8] J.M. White, H.E. Goodis, C.L. Rose, Use of the pulsed Nd: YAG laser for intraoral soft tissue surgery, *Lasers in Surgery and Medicine* **11** (1991) 455-461.
- [۹] ر. خوبی، م. بختیاری، م. اسماعیلی، مجموعه مقالات ساخت مسافت سنج لیزری با استفاده از لیزر نئودیمیوم یاگ تپی با کلید زنی Q فعال، نخستین همایش ملی مهندسی اپتیک و لیزر ایران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان، اردیبهشت (۱۳۸۸).
- [10] W. Koechner, Solid-state laser engineering, Vol. 1. Springer Science, Business Media, (2006).
- [11] A. Ikesue, T. Kinoshita, K. Yoshida, Fabrication and optical properties of high-Performance polycrystalline Nd: YAG ceramics for solid-State lasers, *Journal of the American Ceramic Society* **78** (1995) 1033-1040.
- [12] H. Yagi, T. Yanagitani, K. Ueda, Flashlamp-pumped Nd: YAG ceramic laser, In *2005 Pacific Rim Conference on Lasers &amp; Electro-Optics* (2005) 282-283.
- [13] N. Bidin, Z. Roslinda, M.D. Yaacob, S.E. Pourmand, B. Hazri, Prominent 946 lines induced from flashlamp pumped Nd: YAG rod, *AIP Conference Proceedings* 1455 (2012) 187.
- [14] W. Demtroder, Atoms, molecules and photons, *Heidelberg, Springer, Verlag Berlin Heidelberg* (2006).

[28] D.L. Yu, D.Y. Tang, Experimental study of a high-power CW side-pumped Nd: YAG laser. *Optics & Laser Technology* **35** (2003) 37-42.

[29] Y. Inoue, S. Fujikawa, Diode-pumped Nd: YAG laser producing 122-W CW power at 1.319  $\mu\text{m}$ , *IEEE Journal of Quantum Electronics* **36** (2000) 751-756.

[۳۰] الف. مزنگی، م. سلطان کتابی، م. دهقان باغی، س. م. موسوی، ع. طاهری و س. ناظم، لیزر Nd:YAG با دمش لامپ درخشی: شبیه سازی عددی و برپایی تجربی، مجموعه مقالات شانزدهمین کنفرانس انجمن اپتیک و فوتونیک ایران، دانشگاه یزد، بهمن (۱۳۸۸).

[26] N. Hodgson, H. Weber, Laser resonator and beam propagation, Springer, Second Edition, **108** (2004).

[۲۷] ر. آزموده سرودی، س. طالش علیخانی، الف. مشایخی و ج. صباغ زاده، اندازه گیری فاکتور کیفیت باریکه لیزر Nd:YAG پالسی به روش Knife-Edge، مجموعه مقالات سومین کنفرانس مهندسی فوتونیک ایران، مرکز بین المللی علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، ماهان کرمان، بهمن (۱۳۸۹).

Archive of SID

## Design and construction of xenon flash-lamp pumped solid-state laser in ceramic cavity and measuring some physical parameters

Azadeh Ebrahimzadeh<sup>1</sup>, Alireza Mojtaba<sup>2</sup>, Ali Shiri<sup>3</sup>, Seyed Mehdi Mousavi<sup>3</sup>, Mohammad Sabaeian<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Faculty of Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran

<sup>2</sup>Institute of Optics and Laser, Maleke-e-Ashtar University, Shahin-Shahr, Iran

<sup>3</sup>Department of Physics, College of Science, University of Shiraz, Shiraz, Iran

Received: 30.04.2016    Final revised: 21.10.2016    Accepted: 20.12.2016

### Abstract

In this article, the report of design, construction and optimization of an xenon flash-lamp pumped solid-state Nd:YAG laser in a ceramic cavity are presented. A laser rod of Nd:YAG with a 1.1 wt% doping and a dimension of 80 mm×5 mm, as an active medium, and a xenon flash-lamp with a inner diameter of 7 mm, an arc length of 3 in, and a repetition frequency of 0.2 Hz, as the pump source, were used. At first, the laser was optimized with Findlay-Clay method, in terms of the output coupler reflectivity. The gain and the loss for pump energy of 4.9 J were achieved to be 0.9 and 0.005, respectively. Thus we calculated the optimum reflectivity as 32%. From a mirror with a reflectivity as 25% (which was the closest to our available reflectivity in laboratory) was used. A total electrical-to-optical efficiency of 3% was achieved at 1064 nm for 25% reflectivity for output coupler. For a 0.2 Hz repetition rate and a pumping energy of 9 J, a beam spot size of 3.98 and a quality factor of 17 were achieved. The results are valid for a cavity design with the mentioned parameters.

**Keywords:** Nd:YAG laser, quality factor, diverging angle, small signal gain, output coupler

---

\* Corresponding Author: [sabaeian@gmail.com](mailto:sabaeian@gmail.com)