



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



## افزایش آستانه تخریب لیزری بلور Nd:YAG در اثر تابش لیزرهای XeCl و ArF

سمیه پناهی بخش، سعید جلوانی و محمدهادی ملکی

پژوهشکده لیزر و اپتیک، انتهای خیابان کارگر شمالی، تهران

چکیده - در این پژوهش، افزایش آستانه تخریب سطح بلور Nd:YAG در اثر تابش کم شدت لیزرهای XeCl و ArF گزارش می‌شود. طیف تفاضلی جذب نمونه‌های بلوری نشان می‌دهند که نقص‌های تهی‌گاه اکسیژنی در اثر تابش لیزرهای اگزایمر از بین می‌روند. سیستم لیزری نوسانگر-تقویت کننده سوئیچ Q با تپ‌های  $30\text{ ns}$  قطبیده خطی  $TEM_{00}$  تک مد طولی در طول موج  $1064\text{ nm}$  برای آزمایش آستانه تخریب مورد استفاده قرار گرفتند و ۳ تا ۵ برابر افزایش در آستانه تخریب لیزری برای نمونه‌های تابش شده نسبت به نمونه اولیه بدست آمد. نتایج این پژوهش برای دستیابی به بلورهای لیزری با آستانه تخریب بالا، که برای سیستم‌های توان بالا مناسب هستند بسیار ارزشمند است.

کلید واژه- بلور Nd:YAG، آستانه تخریب لیزری، تهی‌گاه اکسیژنی، لیزر اگزایمر

## Increase in Laser Damage Threshold of Nd:YAG Crystal by XeCl and ArF Laser Irradiation

Somayeh Panahibakhsh, Saeid Jelvani, Mohammad Hadi Maleki

Laser and optics research institute, End of North Kargar Ave, Tehran, Iran

Abstract- In this paper, increase in laser induced damage threshold (LIDT) of Nd:YAG crystal by XeCl and ArF laser irradiation is reported. Differential absorption spectra of the crystal samples show that oxygen vacancy defects can be annihilated by low dose excimer laser irradiation. 30 ns linearly polarized, 1064 nm single longitudinal mode,  $TEM_{00}$  laser pulses of a Q switched oscillator-amplifier system was used for LIDT measurement. LIDT of the irradiated crystals was obtained about three to five times higher than the LIDT of the un-irradiated crystal. Our results are very important in high power laser system applications.

Keywords: Nd:YAG crystal, laser damage threshold, oxygen vacancy, excimer laser

## ۱- مقدمه

یکی از مشخصه‌های مهم هر بلور لیزری آستانه تخریب سطح بلور در طول موج تابش خروجی ماده لیزری مورد نظر است. این مشخصه، بخصوص برای لیزرهای شدت بالا و محیط تقویت کننده بسیار مهم است و در واقع توان خروجی قابل حصول از بلور لیزری را محدود می کند.

در حقیقت، آستانه تخریب سطح بلورهای لیزری از آنچه به صورت نظری و براساس یونش برخوردی، جذب چندفوتونی و در نهایت فروشکست اپتیکی آن پیش بینی می شود بسیار کمتر است. این کاهش ممکن است ناشی از کیفیت نامناسب سطح، ناخالصی های جاذب و نقصهای نقطه‌ای ذاتی ماده مورد نظر باشد [۱]. طبیعت نقص‌هایی که آستانه تخریب دی‌الکتریک را کاهش می دهند و کنترل آنها مسأله‌ای است که حل نشده است و همچنان مورد بحث و بررسی قرار می گیرد.

مهم‌ترین نقص نقطه ای بلور Nd:YAG نقص تهی‌گاه اکسیژنی است. این نقص با دریافت یک الکترون به نقص ناپایدار  $F^+$  تبدیل می شود و با دریافت دو الکترون نقص F نامیده می شود. این نقص‌ها در بازه ۲۰۰ تا ۸۰۰ نانومتر جذب دارند و اثر مهمی بر ویژگی‌های اپتیکی، گرمایی و فیزیکی بلور می گذارند [۲]. در این مقاله، اثر تابش لیزرهای ArF و XeCl بر آستانه تخریب بلور Nd:YAG مورد آزمایش و بررسی قرار می گیرد.

تا کنون اثر تابش لیزر بر آستانه تخریب و کیفیت بلور Nd:YAG گزارش نشده است. از سوی دیگر، مشاهدات اندکی در خصوص افزایش آستانه تخریب بلور KDP با تابش لیزرهای Nd:YAG و XeCl شدت پایین گزارش شد [۳]، اما دلایل فیزیکی مشاهده این اثر به طور مناسب بررسی نشد؛ در مواردی افزایش آستانه تخریب به حذف آلودگی‌ها از سطح بلور نسبت داده شد. آزمایش‌های تابش با لیزرهای Nd:YAG و  $CO_2$  برای بلور یاقوت کبود نیز صورت گرفت اما افزایشی در آستانه تخریب این بلور در اثر تابش لیزرهای مذکور مشاهده نگردید [۴].

تابش‌دهی بلور Nd:YAG با لیزرهای XeCl و ArF با حذف شمار زیادی تهی‌گاه اکسیژنی و متعاقباً بهبود کیفیت اپتیکی بلور Nd:YAG همراه است. البته تولید

درصد کمی مرکز F در اثر تابش لیزر ArF نیز مشاهده می شود. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد با کاهش نقص نقطه‌ای تهی‌گاه اکسیژنی، آستانه تخریب افزایش می یابد. در بلور تابش شده با لیزر ArF به دلیل تولید درصد کوچکی مرکز رنگی F، افزایش آستانه تخریب در مقایسه با نمونه تابش شده با لیزر XeCl کمتر است.

## ۲- آزمایش

نمونه‌های دیسک نازک Nd:YAG (۱٪ اتمی Nd) صیقل شده ( $\lambda/4 @ 632.8 \text{ nm}$ ) برای اجرای آزمایش‌ها تهیه و با استفاده از محفظه التراسونیک تمیز شدند. به منظور انتخاب شدت مناسب برای انجام آزمایش‌های برهم‌کنش غیرمخرب، مقدار تقریبی آستانه کندگی بلور Nd:YAG در طول موج لیزرهای XeCl و ArF به ترتیب برابر با  $150 \pm 5 \text{ mJ/cm}^2$  و  $60 \pm 5 \text{ mJ/cm}^2$  اندازه‌گیری شدند و لذا شرایط تابش دهی نمونه‌ها متفاوت انتخاب شد. تابش به صورت عمود بر سطح نمونه‌ها به طوری که کل سطح نمونه را دربرگیرد و در شرایط آزمایشگاه صورت گرفت. اندازه لکه تقریباً یک مستطیل  $30 \times 10 \text{ mm}^2$  بود.

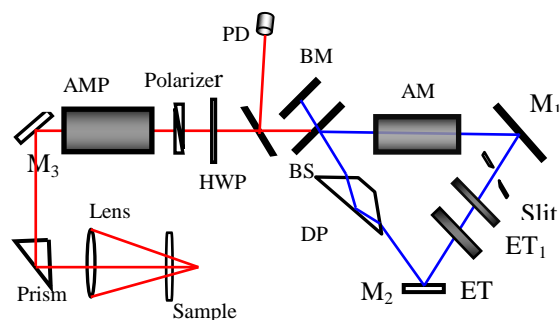
نمونه Nd:YAG شماره ۱ توسط ۵۰۰ تپ لیزر XeCl در شار انرژی  $100 \text{ mJ/cm}^2$  و نرخ تکرار ۲۵ Hz تابش‌دهی شد. طیف عبوری UV-Vis-NIR در بازه طول موجی ۲۰۰-۸۰۰ نانومتر قبل و پس از تابش‌دهی بدست آمده و برای تعیین نوع و مقدار تغییر در نقص‌های نقطه‌ای بلور، مقدار تفاضل جذب القاء شده لیزری به صورت زیر محاسبه گردید:

$$\Delta\alpha = \ln(T_1/T_2)/d \quad (1)$$

که  $\alpha$  ضریب جذب، d ضخامت نمونه،  $T_1$  و  $T_2$  به ترتیب درصد عبوردهی بلور قبل و پس از دریافت تابش لیزری است. شکل ۱ طیف تفاضلی جذب نمونه ۱ را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می شود قله جذبی منفی در طول موج ۲۳۶ nm مشاهده می شود. این قله منفی نشان‌دهنده حذف شماری از نقص‌های تهی‌گاه اکسیژنی در بلور Nd:YAG است [۲].

نمونه نیز تعیین گردد. قطر لکه پرتو فرودی روی نمونه برابر با  $90 \pm 10 \mu\text{m}$  و فاصله سطح جلویی نمونه با کانون عدسی  $12 \text{ mm}$  اندازه گیری شد. ولتاژ اعمالی به تقویت کننده و انرژی میانگین آستانه تخریب نمونه ۱ در جدول ۱ ارائه شده است.

شکل ۲: چیدمان تجربی آزمایش LIDT با سیستم نوسانگر-تقویت کننده لیزر Nd:YAG با طول موج  $1064 \text{ nm}$ ،  $M_1$  آینه های

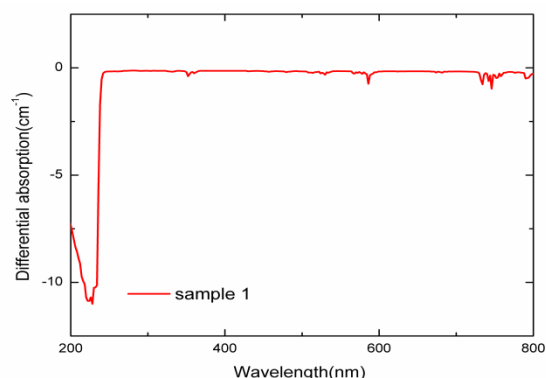


سیستم با بازتاب کامل،  $ET_1$  اتالون ها، PD فوتودیود، HWP تیغه نیم موج، BS شکافنده باریکه، DP منشور داو،  $BM$  آینه انتهایی، AM محیط فعال و AMP تقویت کننده است.

انرژی آستانه تخریب در هر مرحله توسط ژول متر ثابت و در نهایت بین مقادیر بدست آمده میانگین گیری شد. برای تبدیل مقیاس پهنای زمانی تپ به حالت استاندارد، انرژی آستانه با ضریب  $1/\sqrt{3}$  محاسبه شد. نتایج مربوط به اندازه گیری LIDT نمونه ۱ در جدول ۲ ارائه شده است. همانطور که در جدول ۲ مشاهده می شود، آستانه تخریب لیزری نمونه ۱ در طول موج  $1064 \text{ nm}$  در اثر تابش لیزر XeCl افزایش قابل ملاحظه ای در حدود ۵ برابر آستانه تخریب اولیه نشان می دهد. دلیل این امر ناشی از حذف نقص های نقطه ای تهی گاه اکسیژنی است که در ایجاد تخریب در سطح بلور نقش مهمی دارند.

پس از آن، نمونه Nd:YAG شماره ۲ نیز در شار انرژی  $50 \text{ mJ/cm}^2$  و نرخ تکرار  $50 \text{ Hz}$  مورد تابش  $100 \text{ ns}$  لیزر ArF قرار گرفت. شکل ۳ نمودار تفاضل جذبی نمونه شماره ۲ را نشان می دهد. در نمودار شکل ۳ نیز نوار جذبی منفی بزرگی مربوط به حذف تهی گاه اکسیژنی در طول موج  $236 \text{ nm}$  مشاهده می شود. تصاویر میکروسکوپی ناحیه تخریب شده در اثر لیزر در شکل ۴ آمده است.

برای بررسی اثر تابش لیزر XeCl بر کیفیت سطح و آستانه خرابی آن آزمایش LIDT برای نمونه اولیه و نمونه شماره ۱ انجام شد.



شکل ۱: طیف تفاضلی جذب نمونه شماره ۱؛ قله منفی جذب در طول موج  $236 \text{ nm}$  نشان دهنده حذف شماری تهی گاه اکسیژنی است.

چیدمان تجربی آزمایش LIDT در شکل ۲ نشان داده شده است. سیستم لیزری نوسانگر-تقویت کننده سوئیچ Q تپهای  $TEM_{00}$  گوسی تک مد طولی قطبیده خطی با پهنای زمانی  $30 \text{ ns}$  در طول موج  $1064 \text{ nm}$  تولید می کند. برای دریافت اطلاعات کاملتر در خصوص چیدمان نوسانگر-تقویت کننده به [۵] رجوع شود.

آزمایش اندازه گیری آستانه تخریب مطابق با روش اندازه گیری استاندارد [۱] به اجرا شد. اندازه گیری تخریب با تابش تک تپ در شرایط محیطی آزمایشگاه صورت گرفت. در این روش هر نقطه از نمونه فقط با یک تپ لیزری مورد تابش قرار می گیرد تا اثر تپ قبلی بر LIDT نمونه تأثیر نگذارد. در هر تابش، انرژی تپ تابشی نسبت به تپ قبلی با افزایش  $50$  ولت در ولتاژ اعمالی به تقویت کننده افزایش می یابد، تا زمانی که انرژی تابش برای فروشکست اپتیکی کافی شود و تخریب صورت گیرد. از یک عدسی محدب با فاصله کانونی  $400 \text{ mm}$  با لایه نشانی ضد بازتابی در هر دو سطح آن برای کانونی کردن تپ لیزری بر روی نمونه استفاده شد. تخریب سطح نمونه با مشاهده جرقه ناشی از فلورسان نمونه و نیز پراکندگی پرتو لیزر هلیوم نئون که مسیر آن منطبق بر پرتو  $1064 \text{ nm}$  می باشد به سادگی قابل تشخیص بود. پس از آن نقاط آسیب دیده با استفاده از میکروسکوپ نوری نیز مشاهده شدند تا از صحت آزمایش اطمینان حاصل گردد و اندازه لکه لیزری بر روی

وابسته به آن مثل F، اثر مهمی در ایجاد تخریب در بلور در اثر تابش لیزری دارند.

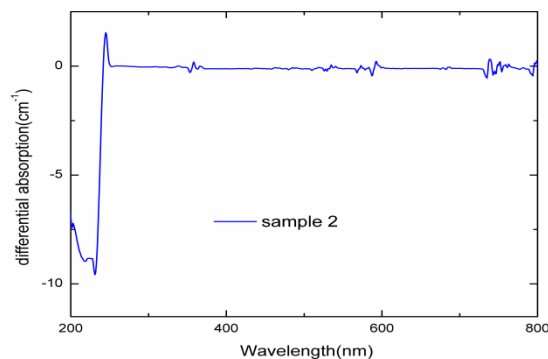
در واقع، در تابش لیزری شدت بالا، جذب چندفوتونی باعث تولید تعدادی الکترون آزاد و حفره در شبکه بلوری می شود. در این وضعیت نقص‌هایی مثل ناخالصی‌ها و تهی‌گاه اکسیژن الکترون‌های آزاد را به تله می‌اندازند. در نتیجه نقص‌های جدیدی با نوارهای جذبی جدید در ماده ظاهر می‌شوند. در این شرایط، جذب مؤثر تابش لیزری افزایش می‌یابد و تخریب صورت می‌گیرد. بدون حضور نقص‌ها، الکترون‌ها و حفره‌های ایجاد شده مجدداً با یکدیگر بازترکیب می‌شوند و نقص‌های بزرگی که منجر به ایجاد تخریب شود، تولید نمی‌شوند. بدین صورت تهی‌گاه اکسیژن به ایجاد تخریب در اثر لیزر در بلور کمک می‌کند و از بین بردن آن در افزایش LIDT مؤثر است.

### ۳- نتیجه‌گیری

از نتایج به دست آمده استنتاج می‌شود که نقص‌های ذاتی بلور Nd:YAG در تخریب سطحی آن نقش مهمی دارند و با از بین بردن آنها LIDT افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد.

### مراجع

1. Demos, S.G., et al., *Investigation of the electronic and physical properties of defect structures responsible for laser-induced damage in DKDP crystals*. Optics express, 2010. **18**(13): p. 13788-13804.
2. Panahibakhsh, S., et al., *Effect of XeCl laser irradiation on the defect structure of Nd: YAG crystals*. Optics and Lasers in Engineering, 2014. **60**: p. 12-17.
3. Swain, J., et al., *The effect of baking and pulsed laser irradiation on the bulk laser damage threshold of potassium dihydrogen phosphate crystals*. Applied Physics Letters, 1982. **41**(1): p. 12-14.
4. Jiang, Y., et al., *Damage/ablation morphology of laser conditioned sapphire under 1064nm laser irradiation*. Optics & Laser Technology, 2012. **44**(4): p. 948-953.
۵. جابری، محمد، فرهید، امیرحسین و رحیم پور سلیمانی، حمید، ساختار مد طولی برای تشدیدگر حلقوی ناهمسطح، مجله پژوهش فیزیک ایران، جلد ۱۳، شماره ۱، ۴۴-۳۵.



شکل ۳: طیف تفاضلی جذب نمونه ۲، قله کوچک مثبت در طول موج ۲۳۹ nm مربوط به تولید نقص F است.



شکل ۴: تصاویر میکروسکوپ نوری نواحی تخریب شده در اثر لیزر با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر (الف) نمونه شماره ۱، (ب) نمونه شماره ۲

در مقایسه با طیف نمونه ۱ که با لیزر XeCl تابش شد، طیف تفاضلی جذب نمونه ۲ یک قله جذبی اضافی در طول موج ۲۳۹ نانومتر نیز دارد. این قله مربوط به ایجاد نقص مرکز F می‌باشد و نشان می‌دهد این نقص در طی تابش لیزر ArF در نمونه ایجاد شده است. آزمایش LIDT برای نمونه ۲ نیز انجام شد و نتایج آن در جدول ۲ آمده است.

جدول ۱: پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایش آستانه تخریب

شماره نمونه	میانگین ولتاژ ورودی تقویت‌کننده (V)	میانگین انرژی آستانه تخریب (mJ)
نمونه اولیه	۵۳۰±۲	۱۱/۳±۰/۱
۱	۱۱۲۰±۵	۵۵/۳±۲
۲	۹۱۵±۳	۳۳/۳±۰/۲

جدول ۲: نتایج آزمایش LIDT

شماره نمونه	LIDT(J/cm²)
نمونه اولیه	۱۰۲±۱۵
۱ (تابش شده با لیزر XeCl)	۵۰۱±۵۰
۲ (تابش شده با لیزر ArF)	۳۰۲±۳۵

با توجه به نتایج به دست آمده ملاحظه می‌شود که تابش دهی بلور با لیزرهای اگزایمر XeCl و ArF در انرژی و تعداد تپ نسبتاً کم باعث افزایش LIDT بلور می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد نقص تهی‌گاه اکسیژن و نقص‌های