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 می دهند که نقص‌های تهی‌گاه اکسیژنی در اثر تابش لیزرهای اگزایمر ازبین‌می‌روند. سیستم لیزری نوسانگر-تقویت کننده سوئیچ *Q* با تپ‌های *ns* ۳۰~ قطبیده خطی *TEM_{00}* تک مد طولی در طول موج *nm* ۱۰۶۴ برای آزمایش آستانه تخریب مورد استفاده قرار گرفتند و ۳ تا ۵ برابر افزایش در آستانه تخریب لیزری برای نمونه های 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

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

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 می‌گیرد.

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 بلورKDP 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 ($\leq\lambda/4$@632.8 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 $۶۰۰\pm۵۰ mJ/cm^2$ و $۱۵۰۰\pm۵۰ mJ/cm^2$ 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 $۳۰\times۱۰ mm^2$ بود.

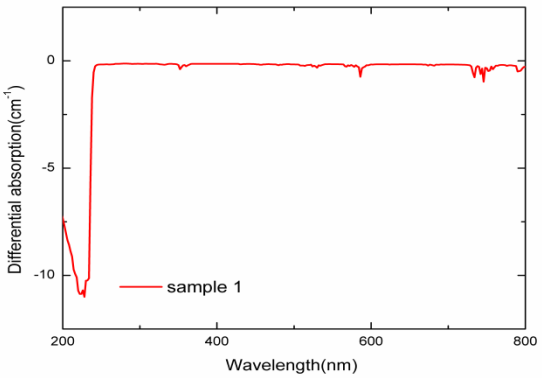
نمونه Nd:YAG شماره ۱ توسط ۵۰۰ تپ لیزر XeCl در شار انرژی $۱۰۰ mJ/cm^2$ و نرخ تکرار ۲۵ Hz تابش‌دهی شد. طیف عبوری UV-Vis-NIR در بازه طول موجی ۲۰۰-۸۰۰ نانومتر قبل و پس از تابش‌دهی بدست آمده و برای تعیین نوع و مقدار تغییر در نقص‌های نقطه‌ای بلور، مقدار تفاضل جذب القاء شده لیزری به صورت زیر محاسبه گردید:

$$\Delta\alpha = \ln(T_1/T_2)/d \qquad (۱)$$

که α 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].

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

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

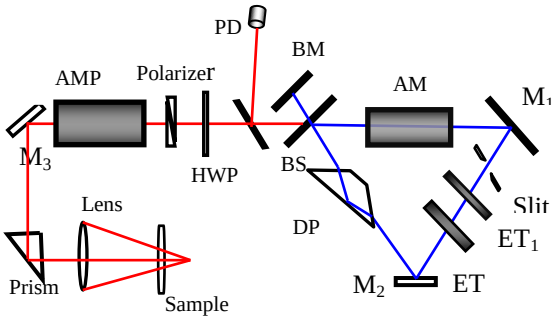


شکل ۱: طیف تفاضلی جذب نمونه شماره ۱؛ قله منفی جذب در طول موج ۲۳۶ nm نشاندهنده حذف شماری تهی‌گاه اکسیژنی است.

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 ns ۳۰~ در طول موج nm ۱۰۶۴ تولید می‌کند. 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 ۱" 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 ۵۰ ولت در ولتاژ اعمالی به تقویت‌کننده افزایش می یابد، تا زمانی‌که انرژی تابش برای فروشکست اپتیکی کافی شود و تخریب صورت گیرد. از یک عدسی محدب با فاصله کانونی mm ۴۰۰ 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 nm ۱۰۶۴ می‌باشد 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 نمونه نیز تعیین گردد. قطر لکه پرتو فرودی روی نمونه برابر با ۹۰±۱۰ µm و فاصله سطح جلویی نمونه با کانون عدسی mm ۱۲ 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 ۱۰۶۴ نانومتر، M_i آینه های

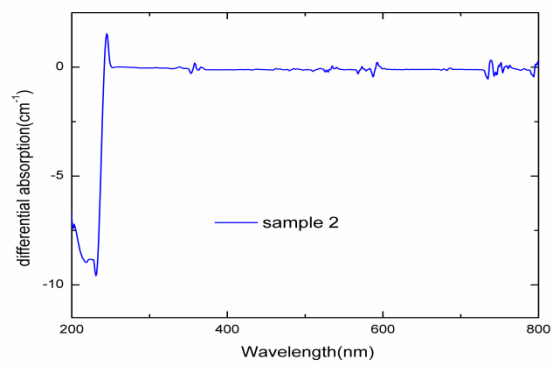


سیستم با بازتاب کامل، ET_i اتالون ها، PD فوتودیود، ، HWP تیغه نیم موج، BS شکافنده باریکه، DP منشور داو، BM آینه انتهایی، AM محیط فعال و AMP تقویت کننده است.

انرژی آستانه تخریب در هر مرحله توسط ژول‌متر ثبت و در نهایت بین مقادیر بدست آمده میانگین‌گیری 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 ۱۰۶۴ نانومتر در اثر تابش لیزر XeCl افزایش قابل ملاحظه‌ای در حدود ۵ برابر آستانه تخریب اولیه نشان می دهد. دلیل این امر ناشی از حذف نقص‌های نقطه‌ای تهی‌گاه اکسیژنی است که در ایجاد تخریب در سطح بلور نقش مهمی دارند.

پس از آن، نمونه Nd:YAG شماره ۲ نیز در شار انرژی $50\ mJ/cm^2$ و نرخ تکرار Hz ۵۰ مورد تابش ۱۰۰ تپ 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 تهی‌گاه اکسیژنی در طول موج nm ۲۳۶ مشاهده می شود. تصاویر میکروسکوپی ناحیه تخریب شده در اثر لیزر در شکل ۴ آمده است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]



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



(الف) (ب)

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 اندازه گیری شده در آزمایش آستانه تخریب

شماره نمونه	میانگین ولتاژ ورودی تقویت کننده(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/cm^2)
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 می شود که تابش‌دهی بلور با لیزرهای اگزایمر XeCl و ArF در انرژی و تعداد تپ نسبتاً کم باعث افزایش LIDT بلور می شود. این نتایج نشان می دهد نقص تهی‌گاه اکسیژن و نقصهای 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. درنتیجه 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 حفره های ایجاد شده مجدداً با یکدیگر بازترکیب می شوند و نقص‌های بزرگی که منجر به ایجاد تخریب شود، تولید نمی‌شوند. بدین‌صورت تهی‌گاه اکسیژن به ایجاد تخریب در اثر لیزر در بلور کمک می کند 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 ازبین‌بردن آنها LIDT افزایش قابل ملاحظه‌ای می یابد.

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 ، فرهبد، امیرحسین و رحیم پور سلیمانی، حمید ، *ساختار مد طولی برای تشدیدگر حلقوی ناهمسطح*، مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، جلد ۱۳ ، شماره ۱، ۴۴-۳۵.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]