بررسی اثر نقص‌های کلوخه‌ای در آستانه تخریب لیزری فیلترهای اپتیکی

مشایخی اصل، علی؛ انارکی، مهدی؛ رحیم‌زاده، نازلی؛ میری، صادق؛ مشایخی‌اصل جهانبخش[۱]

[۱]مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران

چکیده - در این تحقیق، اثرنقص های کلوخه ای در تخریب لیزری فیلترهای اپتیکی، مورد مطالعه قرار گرفته است. زیر لایه‌های مورد استفاده در این تحقیق از جنس *BK7* بودند. پس از تمیزکاری زیر لایه ها، لایه نشانی بازتاب بالا در ناحیه‌ی طول موجی *nm* ۱۰۶۴ بر روی نمونه ها انجام شد. در ادامه بررسی نقص ها با استفاده از میکروسوپ های *SEM* و *AFM* و نیز میکروسکوپ نوری انجام شد. در انتها نیز آزمون آستانه تخریب ناشی از لیزر با استفاده از یک لیزر پالسی *۱۶mj* با قطر لکه کانونی *۱۶۰μm*، بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. در انتها، محل‌های تخریب شده با استفاده از میکروسکوپ نوری *ZEISS* بررسی شدند.

کلید واژه- نقص‌های کلوخه‌ای، باریکه الکترونی، آستانه تخریب ناشی از لیزر، بذر

Investigation the effect of nodular defects on Laser Damage Threshold of optical filters

Mashayekhi Asl, Ali; Anaraki, Mahdi; Rahim Zade Nazli; Miri, Sadegh; Mashayekhi Asl, Jahanbakhsh[1]
[1]PhysicsIranian National Center for Laser Science and Technology

Abstract- In this investigation, the effect of Nodular defects in Laser Induced Damage Threshold of optical filters was discussed. For this work, BK7 substrates were used. After substrate cleaning, high reflection coating was performed on substrates in 1064 nm wavelength. Then, Nodular defects were researched by AFM, SEM and optical microscopes. Finally, The Laser Induced Damage Threshold (LIDT) test was performed by 16 mj Nd:YAG pulsed laser, by 160 µm diameter in beam waist, in 1064 nm, for all samples. Finally, Damaged places were investigated by optical microscopes(Zeiss).

Keywords: Nodular defects, Electron beam, Laser Induced Damage Threshold (LIDT), Seed.

۱- مقدمه

آستانه تخریب ناشی از لیزر (LIDT) در لایه‌های بازتاب بالا (HR)، یکی از عوامل محدود کننده برای توسعه سیستم‌های لیزری است. برهمکنش بین پالس‌های لیزری با عرض بسیار کوتاه(ns) و لایه‌های نازک عمدتاً به دلیل حضور عوامل بیرونی(آلودگی‌ها و نقص‌هایی که جاذب انرژی هستند)، رخ می‌دهد[۱]. به همین دلیل برای افزایش LIDT، باید در تمامی مراحل انباشت از ورود نقص‌ها جلوگیری کرد. منشأ این نقص‌ها را می توان به آلودگی‌های قبل از فرآیند لایه‌نشانی[۲]، آلودگی‌های مربوط به چشمه تبخیر[۳] و انتقال آلودگی‌ها از زیرلایه به درون لایه تقسیم‌بندی کرد. تمیزکاری زیرلایه اولویت نخست را در جلوگیری از ورود نقایص لایه‌نشانی دارد، نقص‌هایی که می‌توانند منجر به افزایش میدان الکتریکی[۴] و اتلاف‌های جذبی بیشتر شوند[۵]. بررسی LIDT لایه‌های نازک در طی سال‌های اخیر نمایانگر این نکته بوده است، که نقص‌های میکروسکوپی محل های آغازین تخریب هستند[۶]. یکی از بارزترین این نقص‌ها، نقص کلوخه‌ای است، که باعث ایجاد

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

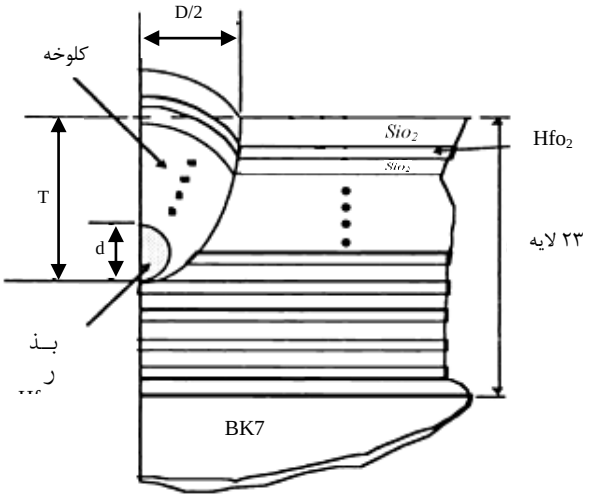
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]

پراگندگی و نفوذ رطوبت می شود، در فیلترهای اپتیکی مورد استفاده در لیزرهای توان بالا، استرس‌های موضعی[۷]، گرمای موضعی[۸]، و اثرات عدسی‌های میکرونی[۹] که به وسیله ی کلوخه‌ها تولید شده اند، را می‌توان از عوامل شکل‌دهنده تخریب لیزری محسوب کرد. نقص‌های کلوخه ای در انواع فیلم‌های دی-الکتریکی و فلزی که توسط روش‌های کندوپاش، بخار فیزیکی (هم تبخیر مقاومتی و هم باریکه الکترونی)تولید می‌شوند، یافت می-شوند[۱۰]. تعداد بسیار بالای گزارش‌هایی که در طی چند سال اخیر به این موضوع پرداخته‌اند، بیان‌گر اهمیت موضوع نقص‌های کلوخه‌ای در لایه‌نشانی‌های اپتیکی است. منشأ کلوخه‌ها ذرات نانومتری به نام بذر[۴]است. انباشت بر روی بذرها و رشد ساختار ستونی بر روی آن‌ها که در انتها منجر به تشکیل کلوخه‌ها می‌شود به دلیل اثر خویش‌سایه‌اندازی[۵]ست[۱۰]. کلوخه‌هایی که به وجود می‌آیند، با لایه‌های پیرامون خود دارای ناپیوستگی هستند. قطر کلوخه‌ها را از رابطه زیر می‌توان به دست آورد.

$$D= (8.T.d)^{0.5} \qquad ۱$$

D قطر کلوخه، d قطر بذر و T عمقی است که بذر نسبت به سطح لایه قرار دارد[۱۱].

همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، بذر به عنوان عامل شکل‌گیری نقص، با انباشت مواد بر روی خود باعث به وجود آمدن یک ساختار سهمی‌وار می شود. گنبدهای حاصل که بر روی سطح لایه قابل مشاهده هستند، همان نقص‌های کلوخه‌ای هستند. همه نقص‌ها در لایه‌های نازک، به صورت یک مخروط رفتار می‌کنند. کلوخه‌ها در برخورد پالس لیزر همچون عدسی محدب رفتار می-کنند و باریکه لیزر را در محل بذر کانونی می‌کنند، این باعث افزایش چند برابر انرژی می‌شود، که منجر به تخریب فیلترهای اپتیکی در انرژی‌های پایین می‌شود. [۱۲]. پیوستگی بسیار ضعیف بین کلوخه و لایه‌های پیرامونش باعث می‌شود تا در زمان برخورد پالس پرانرژی یک لیزر پالسی، از جای خود خارج شود. که به آن پدیده خروج[۶]می‌گویند. در اثر برخورد پالس لیزر بر روی کلوخه، در محل بذر پلاسما تشکیل می‌شود که بروز تخریب را تسریع می-کند[۱۱].



شکل ۱: مدل شماتیک از نقص کلوخه‌ای [۱۱]

۲- شرح آزمایش

برای انجام این تحقیق زیرلایه‌های از جنس BK7 برای لایه‌نشانی فیزیکی با روش باریکه الکترونی تمیزکاری شدند. در ابتدا زیرلایه‌ها به مدت ۱۵ دقیقه درون محلول سود قرار داده شدند و عمل تمیزکاری بر روی آن‌ها انجام گرفت، در ادامه به مدت ۵ دقیقه درون اسید کلریدریک ۱۵ درصد قرار داده شدند و سپس درون محلول ٪۵۰ (اتانول- آبDI) توسط دستمال مخصوص شستشو شدند، سپس به مدت ۱۵ دقیقه درون دستگاه التراسونیک، در دمای ۶۰^0C و در داخل آب DI قرار داده شدند، در انتها توسط آب DI شستشو و با باد نیتروژن خشک گردیدند.

در ادامه، لایه‌نشانی بازتاب بالا (۲۱ لایه - Tio_2/Sio_2) در طول موج ۱۰۶۴nm با روش باریکه الکترونی، بر روی زیر لایه‌ها انجام شد. برای لایه‌نشانی، از TiO_2 (به عنوان لایه با ضریب شکست بالا) و SiO_2 (به عنوان لایه با ضریب شکست پایین) استفاده شد.

۳- بررسی نقص های کلوخه‌ای

همان‌گونه که در مقدمه نیز اشاره شد، نقص‌های کلوخه‌ای دارای ویژگی‌هایی مثل عدسی‌شدگی، خویش‌سایه‌اندازی، و عدم پیوستگی مناسب به لایه‌های پیرامون خود هستند. در شکل ۲ ساختار هندسی یک کلوخه که توسط میکروسکوپ AFM به دست آمده،

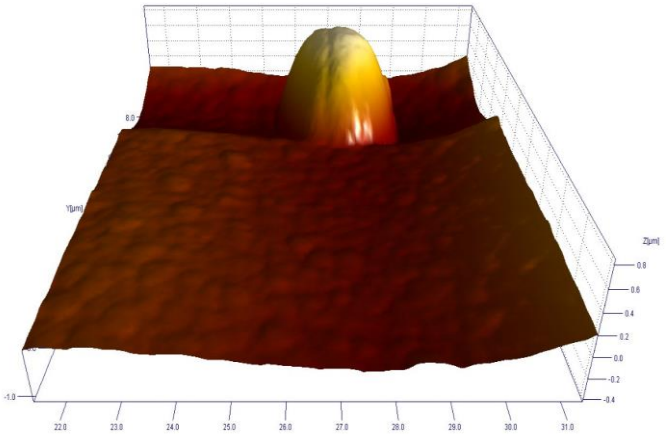
---

۱ *localized stress*
۲ *localized heat*
۳ *Micro-lens effects*
۴ *seed*
۵ *self-shadowing*
6 Ejection

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]

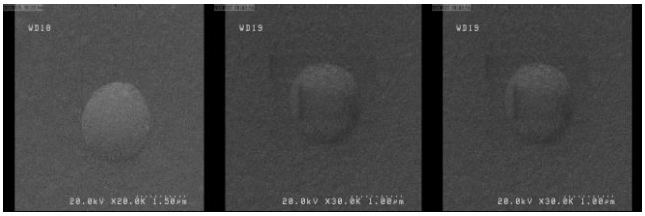
نشان داده شده است.



شکل ۲: ساختار نقص کلوخه‌ای ایجاد شده بر روی سطح لایه‌ها، به دست آمده توسط میکروسکوپ AFM

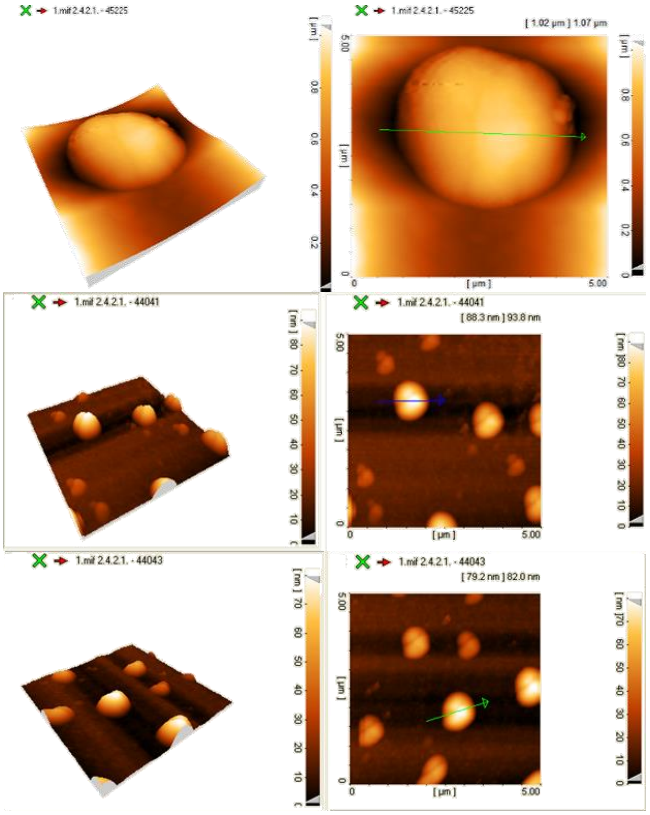
در شکل ۲ در کنار نقص کلوخه‌ای بزرگی که دیده می‌شود، می توان نقص‌های کلوخه‌ای فراوانی را که در مقیاس بسیار کوچکتر وجود دارند نیز بر روی سطح مشاهده کرد.

بررسی ساختار کلوخه‌ها توسط میکروسکوپ SEM انجام شد و نمای گنبدی شکل آن‌ها که مشابه به یک عدسی محدب است، مشاهده شد. در شکل ۳ کلوخه‌های موجود بر روی سطح نمونه‌ها که توسط میکروسکوپ SEM به دست آمده، نشان داده شده است.



شکل۳: تصاویر SEM مربوط به نقص‌های کلوخه‌ای به وجود آمده بر روی سطح نمونه ها

هنگام برخورد باریکه لیزر با سطح نمونه، کلوخه‌هایی که در ناحیه تابش قرار دارند همچون عدسی‌های محدب رفتار کرده و باریکه لیزر را کانونی می‌کنند، که این امر باعث افزایش مقدار انرژی به میزان ۲ تا ۳ در محل شکل‌گیری نقص می‌شود. این رخداد موجب تخریب سریع‌تر المان اپتیکی می شود، ضمن آن که منجر به خروج کلوخه از محل خود نیز می‌شود. این پدیده به وضوح در شکل۶ قابل مشاهده است. نقاط تیره در شکل، محل کلوخه هایی است که در اثر برخورد باریکه لیزر از جای خود خارج شده‌اند. تصاویر به دست آمده از کلوخه‌ها با استفاده از میکروسکوپ AFM، در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل۴: تصاویر مربوط به کلوخه‌های ایجاد شده بر روی سطح لایه‌ها: عدسی‌هایی با ابعاد میکرونی. تصاویر به دست آمده توسط میکروسکوپ AFM

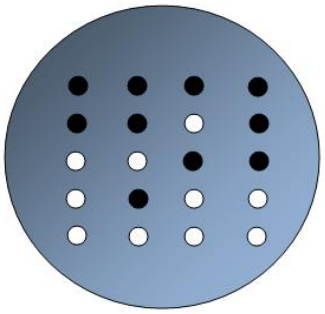
۴- آزمون آستانه تخریب ناشی از لیزر(LIDT)

آستانه تخریب ناشی از لیزر، بیشترین چگالی انرژی یا چگالی توان است که المان‌های اپتیکی بدون تخریب شدن در برابر لیزر می توانند تحمل کنند. برای انجام این آزمون از استاندارد ۱-۲۱۲۵۴ استفاده شد. برای انجام این کار کمترین چگالی انرژیی که در آن نمونه آزمون آسیب نمی‌دید توسط پالس لیزر، بر روی آن تابیده شد و به تدریج این چگالی در نقاط دیگر نمونه افزایش یافت تا جایی که نمونه دچار تخریب شد، این مقدار به عنوان چگالی سطحی انرژی تخریب ناشی از لیزر ثبت شد. الگوی کلی آزمون بر روی یک نمونه آزمون در شکل ۵ نشان داده شده است. دایره‌های سفید رنگ نمایان‌گر محل‌هایی است که دچار تخریب نشده‌اند و دایره‌های تیره رنگ، محل‌هایی که توسط باریکه لیزر تخریب شده-

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]

اند.



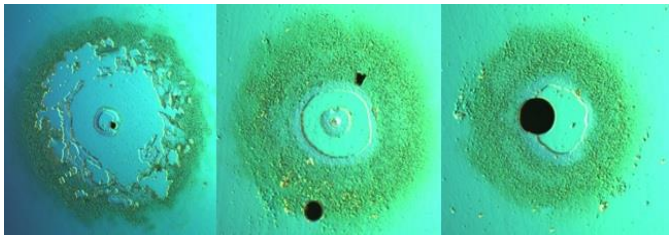
شکل۵: شمایی از محل‌های آزمون بر روی نمونه‌ها

لیزر مورد استفاده در این تحقیق، لیزر پالسی Nd:YAG در طول موج ۱۰۶۴ nm ، با عرض پالس ۱/۵ ns و انرژی ۱۶mj بود. نمونه-های آزمون به ترتیب در چیدمان مخصوص این آنالیز قرار گرفتند و تک پالس‌های لیزر پس از کانونی‌شدن بر روی نمونه اصابت می‌کرد. قطر باریکه لیزر در کانون ۱۶۰µm اندازه‌گیری شد. چگالی انرژی به شکل تقریبی، از تقسیم کردن انرژی هر پالس بر مساحت باریکه لیزر در کانون آن به دست آمد. مقادیر مربوط به LIDT سه مورد از نمونه‌ها در جدول شماره ۱ آمده است.

جدول ۱: مقادیر چگالی سطحی تخریب مربوط به نمونه‌ها

	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳
ρ_A (J/cm^2)	٦/٥٤	٦/١٨	٧/٢٣

تصاویر مربوط به سه مورد از نمونه‌های تخریب شده با استفاده از میکروسکوپ نوری Zeiss در شکل ٦ نشان داده شده است.



شکل۶: تصاویر نمونه‌ها پس از تخریب شدن توسط برخورد پالس لیزر، که توسط میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی ۵۰۰ برابر به دست آمد.

۵- نتیجه‌گیری

هدف از انجام این تحقیق بررسی یکی از دلایل اصلی تخریب زود هنگام فیلترهای اپتیکی در برخورد پالس‌های لیزرهای با انرژی بالا به سطح آن‌ها بود. مطالعه سطح نمونه‌ها، قبل و بعد از تخریب، بیانگر آن است که نقص‌های کلوخه‌ای یکی از عوامل اصلی تخریب فیلترهای اپتیکی در برخورد پالس‌های پر انرژی هستند. این نقایص در برخورد باریکه لیزر همچون عدسی محدب رفتار کرده و باریکه لیزر را کانونی می کنند، در نتیجه آن انرژی باریکه لیزر چندین برابر شده و تخریب فیلتر اپتیکی در چگالی انرژی بسیار پایین‌تری اتفاق می‌افتد. نتیجه دیگر آن‌که، ناپیوستگی کلوخه به لایه‌های پیرامون باعث می‌شود که پس از برخورد پالس لیزر با آن از جای خود خارج شده و یک حفره بر جای بگذارد، به این پدیده "خروج کلوخه " گفته می‌شود.

۶- مرجع‌ها

[1] T. W. Walker, J. K. Mclver, A. H. Guenther, "Pulsed laser-induced damage to thin film optical coatings", IEEE J. Quant. Elec. QE17, 1941-2065(1981)

[2] D. W. Reicher, K. C. Jungling, F. L. Williams, C. K. Carniglia, "Contamination of surfaces prior to optical coating observed by in-situ total internal reflection microscopy", 25th Annual Symposium on Optical Materials for High Power Lasers, NIST Boulder, Colorado, October 27-29, Proc. SPIE vol. 2114, (1994)

[3] A. Bodemann. N. Kaiser, M. Kozlowski, E. Pierce, "Comparison between 355 nm and 1064 nm damage of high grade dielectric mirror coatings", Proc SPIE vol. 2714, 395-404 (1995)

[4] V. E. Gruzdev, M. N. Libenson, "Electrodynamic instability as a reason for bulk and surface optical damage of transparent media and thin films", Proc. SPLE Vol. 2714, 595-604 (1996)

[5] D. J. Gaillant, M. Law, B. Pand, "Effect of cleaning on the optical absorption of calcium fluoride and silica at 351 am", NIST SF 752, 159467 (1986)

[6] R. Chow, I. M. Thomas, "Optical coatings for high power laser applications," in Handbook of Laser Science and Technology, supplement to: Optical Materials, M. J. Weber, Ed., CRC Press (1995)

[7] T. Spalvins and W. A. Brainard, J. Vac. Sci. Technol. 11, 1186 (1974).

[8] K. H. Guenther, Appl. Opt. 23, 3806 (1 984).

[9] J. Murphy, Contemporary Infra-Red Sensors and Instruments (SPIE, Bellingham, WA, 1980), Vol. 246, p. 64.

[10] K. H. Guenther, Appl. Opt. 20, 1034 (1981).

[11] S. A. Letts, D. W. Meyers, and L. A. Witt, "Ultra smooth plasma coatings for fusion targets," J. Vac. Sci. Tech., 19, 736-742, 1981.

[12] R.J. Tench, R. Chow, M.R. Kozlowski, Defect geometries in multilayer optical coatings, J. Vac. Sci. Technol. A 12 (5) (1994)

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]