



جمهوری اسلامی ایران  
Islamic Republic of Iran  
سازمان ملی استاندارد ایران

Iranian National Standardization Organization



استاندارد ملی ایران  
۱۸۵۴۷-۴  
چاپ اول  
۱۳۹۶



دارای محتوای رنگی

INSO

18547-4

1st. Edition

2017

Identical with  
ISO/TR 21254-4:2011

لیزرها و تجهیزات مرتبط با لیزر- روش‌های  
آزمون برای آستانه تخریب ناشی از لیزر -  
قسمت ۴: بررسی، تشخیص و اندازه‌گیری

**Lasers and laser-related equipment -Test  
methods for laser-induced damage  
threshold- Part 4: Inspection, detection and  
measurement**

ICS: 31.260

استاندارد ملی ایران شماره ۴-۱۸۵۴۷: سال ۱۳۹۶

سازمان ملی استاندارد ایران

تهران، ضلع جنوب غربی میدان ونک، خیابان ولیعصر، پلاک ۲۵۹۲

صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۶۱۳۹ تهران - ایران

تلفن: ۵-۸۸۸۷۹۴۶۱

دورنگار: ۸۸۸۸۷۱۰۳ و ۸۸۸۸۷۰۸۰

کرج، شهر صنعتی، میدان استاندارد

صندوق پستی: ۳۱۵۸۵-۱۶۳ کرج - ایران

تلفن: ۸-۳۲۸۰۶۰۳۱ (۰۲۶)

دورنگار: ۳۲۸۰۸۱۱۴ (۰۲۶)

رایانامه: [standard@isiri.gov.ir](mailto:standard@isiri.gov.ir)

وبگاه: <http://www.isiri.gov.ir>

**Iranian National Standardization Organization (INSO)**

No.2592 Valiasr Ave., South western corner of Vanak Sq., Tehran, Iran

P. O. Box: 14155-6139, Tehran, Iran

Tel: + 98 (21) 88879461-5

Fax: + 98 (21) 88887080, 88887103

Standard Square, Karaj, Iran

P.O. Box: 31585-163, Karaj, Iran

Tel: + 98 (26) 32806031-8

Fax: + 98 (26) 32808114

Email: [standard@isiri.gov.ir](mailto:standard@isiri.gov.ir)

Website: <http://www.isiri.gov.ir>

## به نام خدا

### آشنایی با سازمان ملی استاندارد ایران

سازمان ملی استاندارد ایران به موجب بند یک ماده ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱ تنها مرجع رسمی کشور است که وظیفه تعیین، تدوین و نشر استانداردهای ملی (رسمی) ایران را به عهده دارد.

تدوین استاندارد در حوزه‌های مختلف در کمیسیون‌های فنی مرکب از کارشناسان سازمان، صاحب‌نظران مراکز و مؤسسات علمی، پژوهشی، تولیدی و اقتصادی آگاه و مرتبط انجام می‌شود و کوششی همگام با مصالح ملی و با توجه به شرایط تولیدی، فناوری و تجاری است که از مشارکت آگاهانه و منصفانه صاحبان حق و نفع، شامل تولیدکنندگان، مصرف‌کنندگان، صادرکنندگان و واردکنندگان، مراکز علمی و تخصصی، نهادها، سازمان‌های دولتی و غیردولتی حاصل می‌شود. پیش‌نویس استانداردهای ملی ایران برای نظرخواهی به مراجع ذی‌نفع و اعضای کمیسیون‌های مربوط ارسال می‌شود و پس از دریافت نظرها و پیشنهادهای در کمیته ملی مرتبط با آن رشته طرح و در صورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی (رسمی) ایران چاپ و منتشر می‌شود.

پیش‌نویس استانداردهایی که مؤسسات و سازمان‌های علاقه‌مند و ذی‌صلاح نیز با رعایت ضوابط تعیین شده تهیه می‌کنند در کمیته ملی طرح، بررسی و در صورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی ایران چاپ و منتشر می‌شود. بدین ترتیب، استانداردهایی ملی تلقی می‌شود که بر اساس مقررات استاندارد ملی ایران شماره ۵ تدوین و در کمیته ملی استاندارد مربوط که در سازمان ملی استاندارد ایران تشکیل می‌شود به تصویب رسیده باشد.

سازمان ملی استاندارد ایران از اعضای اصلی سازمان بین‌المللی استاندارد (ISO)<sup>۱</sup>، کمیسیون بین‌المللی الکتروتکنیک (IEC)<sup>۲</sup> و سازمان بین‌المللی اندازه‌شناسی قانونی (OIML)<sup>۳</sup> است و به عنوان تنها رابط<sup>۴</sup> کمیسیون کدکس غذایی (CAC)<sup>۵</sup> در کشور فعالیت می‌کند. در تدوین استانداردهای ملی ایران ضمن توجه به شرایط کلی و نیازمندی‌های خاص کشور، از آخرین پیشرفت‌های علمی، فنی و صنعتی جهان و استانداردهای بین‌المللی بهره‌گیری می‌شود.

سازمان ملی استاندارد ایران می‌تواند با رعایت موازین پیش‌بینی شده در قانون، برای حمایت از مصرف‌کنندگان، حفظ سلامت و ایمنی فردی و عمومی، حصول اطمینان از کیفیت محصولات و ملاحظات زیست‌محیطی و اقتصادی، اجرای بعضی از استانداردهای ملی ایران را برای محصولات تولیدی داخل کشور و/یا اقلام وارداتی، با تصویب شورای عالی استاندارد، اجباری کند. سازمان می‌تواند به منظور حفظ بازارهای بین‌المللی برای محصولات کشور، اجرای استانداردهای کالاهای صادراتی و درجه‌بندی آن را اجباری کند. همچنین برای اطمینان بخشیدن به استفاده‌کنندگان از خدمات سازمان‌ها و مؤسسات فعال در زمینه مشاوره، آموزش، بازرسی، ممیزی و صدور گواهی سیستم‌های مدیریت کیفیت و مدیریت زیست‌محیطی، آزمایشگاه‌ها و مراکز واسنجی (کالیبراسیون) وسایل سنجش، سازمان ملی استاندارد این‌گونه سازمان‌ها و مؤسسات را بر اساس ضوابط نظام تأیید صلاحیت ایران ارزیابی می‌کند و در صورت احراز شرایط لازم، گواهینامه تأیید صلاحیت به آن‌ها اعطا و بر عملکرد آن‌ها نظارت می‌کند. ترویج دستگاه بین‌المللی یکاها، واسنجی وسایل سنجش، تعیین عیار فلزات گرانبها و انجام تحقیقات کاربردی برای ارتقای سطح استانداردهای ملی ایران از دیگر وظایف این سازمان است.

1- International Organization for Standardization

2- International Electrotechnical Commission

3- International Organization for Legal Metrology (Organisation Internationale de Metrologie Legals)

4- Contact point

5- Codex Alimentarius Commission

کمیسیون فنی تدوین استاندارد

«لیزرها و تجهیزات مرتبط با لیزر - روش‌های آزمون برای آستانه تخریب ناشی از لیزر -

قسمت ۴: بررسی، تشخیص و اندازه‌گیری»

سمت و/یا محل اشتغال:

پژوهشگاه استاندارد

رئیس:

میرزائی کجانی، مریم  
(دکتری فیزیک)

دبیر:

مشایخی اصل، علی  
(کارشناسی ارشد فیزیک)

مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران

اعضا: (اسامی به ترتیب حروف الفبا)

آل علی، هدی  
(دکتری فیزیک)

پژوهشگاه استاندارد-گروه اندازه‌شناسی

جانعلی پور شهرانی، محمدرضا  
(کارشناسی ارشد فیزیک)

پژوهشکده سیستم‌های پیشرفته صنعتی (شرکت سهامی خاص)

حمید بهنام، غزال  
(کارشناسی ارشد پرتو پزشکی)

سازمان ملی استاندارد ایران - اداره کل نظارت بر اجرای استاندارد

سمیع پور، فرهاد  
(کارشناسی ارشد مهندسی شیمی)

پژوهشکده سیستم‌های پیشرفته صنعتی (شرکت سهامی خاص)

عجمی، عاطفه  
(کارشناسی ارشد مهندسی صنایع)

جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی شریف- آزمایشگاه اپتیک

کاشی، پریرسا  
(کارشناسی ارشد فیزیک)

شرکت تک فام‌سازان شفا

عربلو، رضا  
(کارشناسی فیزیک اتمی)

پژوهشکده سیستم‌های پیشرفته صنعتی (شرکت سهامی خاص)

مشایخی اصل، جهانبخش  
(کارشناسی ارشد فیزیک)

مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران

مرتضوی قوام‌آبادی، سید عبدالمهدی  
(کارشناسی مهندسی الکترونیک)

شرکت مهندسی هماهنگ سامان ایرانیان

**ویراستار:**

فرجی، رحیم

(کارشناسی ارشد شیمی)

پژوهشگاه استاندارد- گروه پژوهشی مهندسی پزشکی

فهرست مندرجات

صفحه	عنوان
ز	پیش‌گفتار
ح	مقدمه
۱	۱ هدف و دامنه کاربرد
۱	۲ مراجع الزامی
۱	۳ اصطلاحات و تعاریف
۲	۴ روش‌های تشخیص تخریب
۲	۴-۱ کلیات
۲	۴-۲ خلاصه‌ای از روش‌های تشخیص تخریب
۴	۴-۳ جمع‌آوری تابش از نمونه
۴	۴-۳-۱ تکنیک‌های تشخیص پراکندگی
۶	۴-۳-۲ تکنیک تشخیص پلاسما و تابش حرارتی
۷	۴-۳-۳ فلوئورسانس
۹	۴-۴ تشخیص تغییرات در بازتاب یا عبور و تکنیک‌های تصویربرداری
۹	۴-۴-۱ تشخیص آنالین تغییرات در بازتاب یا عبور
۱۰	۴-۴-۲ میکروسکوپی آنالین
۱۳	۴-۵ طرح‌های تشخیص فوتوترمال
۱۳	۴-۵-۱ کلیات
۱۳	۴-۵-۲ شکست فوتوترمال و عدسی‌شدگی حرارتی سطح
۱۵	۴-۵-۳ اثر میریج
۱۶	۴-۶ مشاهده تغییر آنی فشار
۱۸	۵ تکنیک‌های بررسی پس از آزمون‌های متوالی لیزر
۱۸	۵-۱ کلیات
۱۹	۵-۲ میکروسکوپ نومارسکی
۱۹	۵-۳ مقایسه‌گر میکروسکوپی تصویر
۲۳	۵-۴ میکروسکوپ روبشی لیزری
۲۴	۵-۵ تکنیک‌های نگاشت
۲۴	۵-۶ روش میکروسکوپی الکترونی
۲۵	۵-۷ روش میکروسکوپی نیروی اتمی
۲۶	۵-۸ روش میکروسکوپی هم‌کانون
۲۹	کتاب‌نامه

## پیش‌گفتار

استاندارد «لیزرها و تجهیزات مرتبط با لیزر - روش‌های آزمون برای آستانه تخریب ناشی از لیزر - قسمت ۴: بررسی، تشخیص و اندازه‌گیری» که پیش‌نویس آن در کمیسیون‌های مربوط بر مبنای پذیرش استانداردهای بین‌المللی به عنوان استاندارد ملی ایران به روش اشاره شده در مورد الف، بند ۷، استاندارد ملی شماره ۵ تهیه و تدوین شده، در ششصد و هشتاد و هفتمین اجلاس کمیته ملی استاندارد مهندسی پزشکی مورخ ۱۳۹۶/۰۶/۲۵ تصویب شد. اینک این استاندارد به استناد بند یک ماده ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱، به عنوان استاندارد ملی ایران منتشر می‌شود.

استانداردهای ملی ایران بر اساس استاندارد ملی ایران شماره ۵ (استانداردهای ملی ایران - ساختار و شیوه نگارش) تدوین می‌شوند. برای حفظ همگامی و هماهنگی با تحولات و پیشرفت‌های ملی و جهانی در زمینه صنایع، علوم و خدمات، استانداردهای ملی ایران در صورت لزوم تجدیدنظر خواهند شد و هر پیشنهادی که برای اصلاح یا تکمیل این استانداردها ارائه شود، در هنگام تجدیدنظر در کمیسیون فنی مربوط، مورد توجه قرار خواهد گرفت. بنابراین، باید همواره از آخرین تجدیدنظر استانداردهای ملی ایران استفاده کرد.

این استاندارد ملی بر مبنای پذیرش استاندارد بین‌المللی زیر به روش «معادل یکسان» تهیه و تدوین شده و شامل ترجمه تخصصی کامل متن آن به زبان فارسی می‌باشد و معادل یکسان استاندارد بین‌المللی مزبور است:

ISO/TR 21254-4: 2011, Lasers and laser-related equipment-Test methods for laser-induced damage threshold- Part 4: Inspection, detection and measurement.

## مقدمه

روش‌های تشخیص آستانه تخریب ناشی از لیزر، همواره شامل روش‌های حساس برای بررسی سطوح و نیز تشخیص تخریب است. در پروتکل تشخیص، هر نمونه قبل از آزمون توسط روش‌های میکروسکوپی به منظور ارزیابی کیفیت سطح و ارزیابی نقایص بررسی می‌شود. در طی تابش بر روی نمونه، در آزمون تخریب چند-به-یک، طرح‌های متنوعی برای تشخیص تخریب مورد استفاده قرار می‌گیرند.

نمونه‌هایی از این روش‌ها، تشخیص نور پراکنده شده توسط ناحیه آزمون، جمع‌آوری تابش پلاسما، یا طرح‌های تشخیص فوتوترمال هستند. در اغلب موارد، سیستم تشخیص مستقیماً به لیزر متصل است تا تابش بر روی نمونه را بلافاصله در اولین لحظه تخریب متوقف کند. به این ترتیب، از تخریب فاجعه‌بار نمونه جلوگیری می‌شود و تعداد پالس‌ها تا پدیدار شدن اولین تخریب، می‌تواند به دقت تعیین شود. همچنین این اطلاعات مستقیم از وضعیت تخریب، می‌تواند در حین انجام آزمون مورد پردازش قرار گیرد تا سطوح انرژی برای بررسی‌های بعدی که به منظور بهینه‌سازی و کمینه کردن عدم قطعیت‌های تشخیص صورت می‌گیرد، تعیین شود. به همین دلیل، طرح‌های پیچیده تشخیص مبتنی بر تصویربرداری مستقیم و پردازش تصویر آنلاین، اغلب، در سیستم‌های تشخیص یک-به-یک به کار گرفته می‌شوند. تابش متوالی بر روی نمونه‌ها، با بررسی به وسیله یک روش مناسب برای تعیین مکان‌های تخریب و کسب اطلاعات از مکانیسم‌های درگیر در تخریب، همراه می‌شود. این بررسی مکان‌ها، برای تعیین دقیق آستانه تخریب ضروری است، چرا که ارزیابی نهایی و حساس‌ترین ارزیابی وضعیت تخریب است.

این استاندارد، روش‌های برگزیده برای بررسی سطوح اپتیکی قبل و پس از آزمون تخریب، و روش‌های تشخیص تخریب به کار گرفته شده در سیستم‌های تشخیص را شرح می‌دهد. روش‌های تشخیص تخریب شرح داده شده، نمونه‌هایی از روش‌های عملی است که مورد آزمون قرار گرفته و اغلب در سیستم‌های تشخیص به کار گرفته می‌شوند. این استاندارد، به کار بردن روش‌های دیگر برای تشخیص یا بررسی تخریب در قطعات اپتیکی را منع نمی‌کند.

این استاندارد یک قسمت از مجموعه استانداردهای ملی ایران به شماره ۱۸۵۴۷ است.

سایر قسمت‌های استاندارد ملی ایران شماره ۱۸۵۴۷ به شرح زیر است:

- لیزرها و تجهیزات مرتبط با لیزر- روش‌های آزمون برای آستانه تخریب ناشی از لیزر- قسمت ۱: تعاریف و اصول کلی
- لیزرها و تجهیزات مرتبط با لیزر- روش‌های آزمون برای آستانه تخریب ناشی از لیزر- قسمت ۲: تعیین آستانه
- لیزرها و تجهیزات مرتبط با لیزر- روش‌های آزمون برای آستانه تخریب ناشی از لیزر- قسمت ۳: تضمین قابلیت کار با توان (انرژی) تابش لیزر



## لیزرها و تجهیزات مرتبط با لیزر - روش‌های آزمون برای آستانه تخریب ناشی از لیزر - قسمت ۴: بررسی، تشخیص و اندازه‌گیری

### ۱ هدف و دامنه کاربرد

هدف از تدوین این استاندارد، تعیین روش‌های بررسی و تشخیص تخریب ناشی از لیزر بر روی سطوح و درون حجم قطعات اپتیکی است.

### ۲ مراجع الزامی

در مراجع زیر ضوابطی وجود دارد که در متن این استاندارد به صورت الزامی به آن‌ها ارجاع داده شده است. بدین ترتیب، آن ضوابط جزئی از این استاندارد محسوب می‌شوند.

در صورتی که به مرجعی با ذکر تاریخ انتشار ارجاع داده شده باشد، اصلاحیه‌ها و تجدیدنظرهای بعدی آن برای این استاندارد الزام‌آور نیست. در مورد مرجعی که بدون ذکر تاریخ انتشار به آن‌ها ارجاع داده شده است، همواره آخرین تجدیدنظر و اصلاحیه‌های بعدی برای این استاندارد الزام‌آور است.

استفاده از مراجع زیر برای کاربرد این استاندارد الزامی است:

#### 2-1 ISO 11145, Optics and photonics - Lasers and laser-related equipment - Vocabulary and symbols

یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۲۱۷۳۶: سال ۱۳۹۶، اپتیک و فوتونیک - لیزر و تجهیزات مرتبط با لیزر - واژگان و نمادها، با استفاده از استاندارد ISO 11145: 2016 تدوین شده است.

#### 2-2 ISO 21254-1, Lasers and laser-related equipment - Test methods for laser-induced damage threshold - Part 1: Definitions and general principles

یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۱-۱۸۵۴۷: سال ۱۳۹۳، لیزر و تجهیزات مرتبط با لیزر - روش‌های آزمون برای آستانه تخریب ناشی از لیزر - قسمت ۱: تعاریف و اصول کلی، با استفاده از استاندارد ISO 21254-1: 2011 تدوین شده است.

### ۳ اصطلاحات و تعاریف

در این استاندارد، اصطلاحات و تعاریف ذکر شده در استانداردهای ISO 11145 و ISO 21254-1 به کار می‌رود.

## ۴ روش‌های تشخیص تخریب

### ۴-۱ کلیات

برای روش‌های آزمون تخریب که بیش از یک پالس در محل آزمون را شامل می‌شوند، یک سیستم آنلاین تشخیص تخریب مناسب برای ارزیابی وضعیت سطح تحت آزمون طبق استاندارد ISO 21254-1 لازم است. توصیه می‌شود سیستم آنلاین تشخیص تخریب، امکان قطع پالس‌های بعدی و نگاه داشتن شمارش‌گر پالس، پس از تشخیص تخریب را داشته باشد.

برای تشخیص آنلاین تخریب، از هر روش مناسبی می‌توان استفاده کرد. تکنیک‌های مناسب برای این منظور به طور مثال، روش‌های میکروسکوپی آنلاین، تشخیص فوتوآکوستیک<sup>۱</sup> و فوتوترمال<sup>۲</sup>، و همچنین تشخیص‌های مبتنی بر پراکندگی با استفاده از یک لیزر مجزا و یا تابش لیزر تخریب‌کننده هستند. در ادامه مثال‌هایی برای طرح‌های تشخیص آنلاین تخریب براساس جمع‌آوری تابش از نمونه، تشخیص ویژگی‌های خاص نمونه و روش‌های فوتوترمال شرح داده می‌شود. علاوه بر آن، روشی براساس مشاهده تغییرات آنی فشار به عنوان مثالی برای تشخیص آنلاین غیراپتیکی تعیین شده است. روش‌های توصیف شده توسط طرح‌های منتشر شده در نوشته‌های قابل دسترسی، نشان داده شده‌اند. این انتخاب از مثال‌های کاربردی فقط برای اهداف توصیفی در نظر گرفته شده و نشان دهنده هیچ‌گونه مزیت یا توصیه‌ای برای این طرح‌ها نمی‌باشد.

### ۴-۲ خلاصه‌ای از روش‌های تشخیص تخریب

ویژگی‌های اصلی روش‌های توصیف شده تشخیص آنلاین تخریب در جدول ۱ گردآوری شده است. در کنار اصول بنیادی، مزایا و معایب ویژه‌ای نیز مورد توجه قرار گرفته است.

---

1- Photoacoustic  
2- Photothermal

جدول ۱ - مزایا و معایب روش‌های تشخیص تخریب

معایب	مزایا	روش تشخیص تخریب (ارجاع)
<ul style="list-style-type: none"> <li>تشخیص غیرمستقیم: سیگنال با مکانیسم تخریب ارتباطی ندارد</li> <li>برای ساختارهای لایه با پوشش لایه‌نشانی شده یا فیلترهای پیچیده، چندان مناسب نیست</li> <li>عدم حساسیت به فشردگی</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>هزینه کم آزمایشگاهی</li> <li>ارتباط آشکار با تخریب مورفولوژیکی<sup>۱</sup> و روشی ارجح برای این نوع تخریب‌ها</li> <li>مناسب برای آزمون‌های خودکار متوالی</li> <li>حساسیت و قابلیت اطمینان بالا</li> <li>کوتاه بودن زمان واکنش (ns)</li> <li>تشخیص انتخابی سطح یا حجم<sup>۲</sup> و تخریب سطح</li> </ul>	<p>تکنیک‌های تشخیص پراکندگی (۱-۳-۴)</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>وابستگی به محیط</li> <li>حساسیت پایین‌تر: تابش پلاسما ممکن است بدون تخریب سطح، ظاهر شود یا برعکس آن</li> <li>دشواری بودن تفسیر سیگنال با توجه به تخریب</li> <li>دشواری بودن کاهش داده‌ها</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>هزینه کم آزمایشگاهی</li> <li>ارتباط دامنه سیگنال به مکانیسم‌های تخریب</li> <li>کوتاه بودن زمان واکنش (ns)</li> </ul>	<p>تابش پلاسما و تابش حرارتی (۲-۳-۴)</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>هزینه بالای آزمایشگاهی</li> <li>حساسیت پایین‌تر: رابطه تخریب با سیگنال فلورسانس ممکن است پیچیده و وابسته به نمونه باشد</li> <li>دشواری بودن تفسیر سیگنال با توجه به تخریب</li> <li>ضرورت کالیبراسیون برای مواد مختلف</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ارتباط سیگنال به مکانیسم‌های تخریب و قابل تفسیر بودن آن</li> <li>کوتاه بودن زمان واکنش (ns)</li> <li>امکان بهتر تشخیص مرکز رنگ</li> </ul>	<p>فلورسانس (۳-۳-۴)</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>تشخیص غیر مستقیم: سیگنال با مکانیسم تخریب ارتباطی ندارد</li> <li>برای همه انواع قطعه‌های اپتیکی مناسب نیست</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>هزینه پایین آزمایشگاهی</li> <li>حساسیت بالا و ارتباط واضح با تخریب</li> <li>مناسب برای آزمون‌های خودکار متوالی</li> <li>قابلیت اعتماد بالا</li> <li>کوتاه بودن زمان واکنش</li> </ul>	<p>بازتاب<sup>۳</sup> عبور<sup>۴</sup> (۱-۴-۴)</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>هزینه بالای آزمایشگاهی</li> <li>کوتاه بودن زمان پاسخ دهی (در حدود ۱۰ ms)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ایجاد تصویر مستقیم</li> <li>بهترین قابلیت اعتماد ممکن برای سطوح</li> <li>امکان کاهش داده‌های پیچیده</li> <li>مناسب برای آزمون‌های خودکار متوالی</li> </ul>	<p>روش میکروسکوپی آنلاین (۲-۴-۴)</p>

معایب	مزایا	روش تشخیص تخریب (ارجاع)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• دشوار بودن تفسیر سیگنال با توجه به تخریب</li> <li>• تفکیک پذیری زمانی پایین (ms)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ارزیابی میزان جذب</li> <li>• حساسیت بالا</li> <li>• ارتباط سیگنال با مکانیسم‌های تخریب</li> <li>• قابل تشخیص بودن اثرات پیش از تخریب</li> <li>• اثرات فوتو آکوستیک و حرارتی (اثر میریج)</li> </ul>	<p>شکست فوتوترمال و اثر عدسی شدگی و میریج<sup>۵</sup> (۴-۵)</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• تنها برای شرایط خلأ بالا مناسب است</li> <li>• برای قطر لکه‌های کوچک (جرم کنده شده اندک) (کمتر از ۲۰۰ μm) مناسب نیست.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• عدم حساسیت به لرزش و ناتنظیمی</li> <li>• مناسب برای نمونه‌های انحنادار و پراکنده</li> <li>• امکان آنالیز نمونه‌های کنده کاری شده، اجازه تفسیر مکانیسم‌های تخریب را می‌دهد (با اسپکترومتر جرمی)</li> </ul>	<p>مشاهده تغییر آبی فشار (۴-۶)</p>
<p>1- Morphological 2- Bulk 3- Reflectance 4- Transmittance 5- Mirage</p>		

#### ۳-۴ جمع‌آوری تابش از نمونه

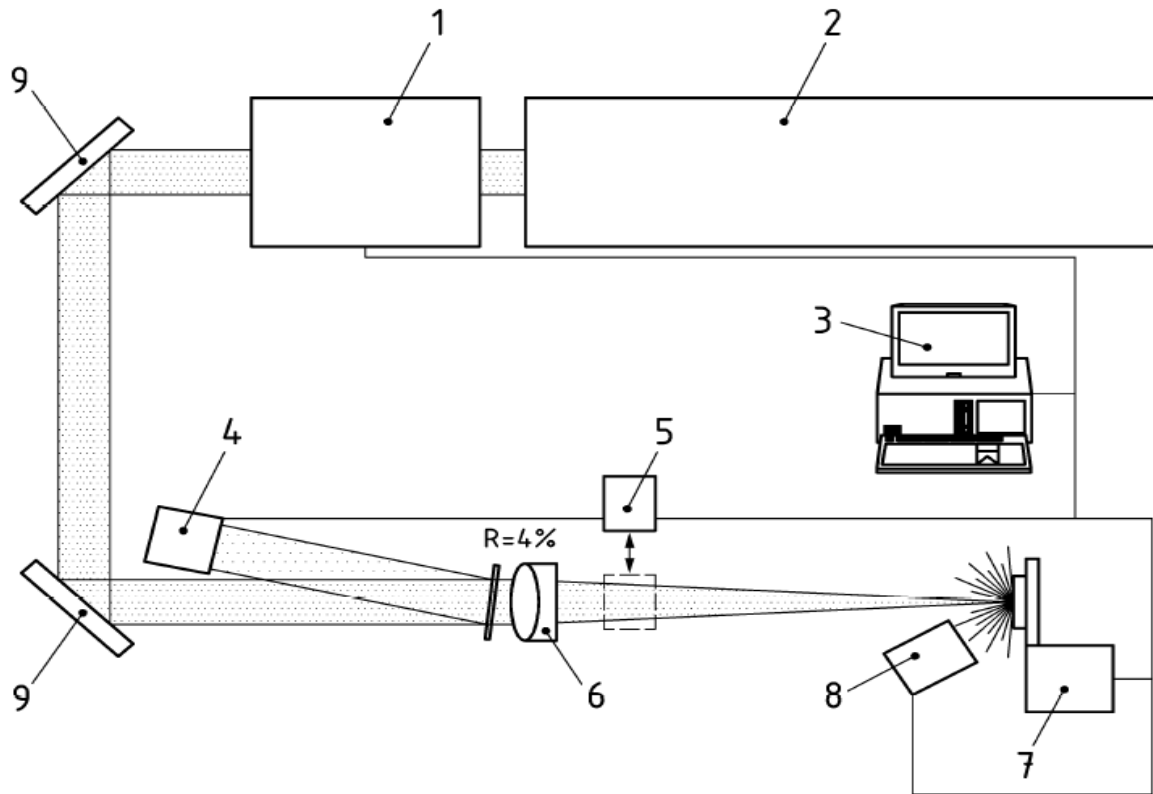
#### ۱-۳-۴ تکنیک‌های تشخیص پراکندگی

ایده اصلی تشخیص آنالیز تخریب، جمع‌آوری تابش پراکنده شده به وسیله قطعه تحت آزمون است. افزایش پراکندگی اپتیکی از محل آزمون، نتیجه مستقیم تغییر خصوصیات حجم یا سطح به وسیله مکانیسم‌های تخریب است.

چیدمان‌ها را می‌توان مستقیماً براساس تشخیص تابش پراکنده شده حاصل از لیزر آزمون (به شکل ۱ مراجعه شود) یا بر اساس پراکندگی ناشی از لیزری دیگر که همراه با باریکه لیزر آزمون بر روی محل آزمون (به شکل ۲ مراجعه شود) متمرکز می‌شود، به کار برد. در سیستم‌هایی که براساس پراکندگی حاصل از تابش لیزر آزمون هستند، این روش را می‌توان با تعدادی قطعه اپتیکی اضافی که تابش پراکنده شده را روی آشکارساز جمع می‌کنند، تکمیل کرد. برای جمع‌آوری تابش پراکنده شده در آشکارساز، از عدسی‌ها یا آینه‌های مقعر استفاده می‌شود. برای چیدمان‌هایی با منبع تابش مجزا، از یک لیزر با پایداری نقطه‌ای عالی و نوسان شدت کمینه به عنوان منبع تابش استفاده می‌شود. نور لیزر با استفاده از سیستم آماده‌ساز باریکه که معمولاً شامل سیستم‌های تلسکوپی با روزنه‌ها، فیلترهای فضایی و قطعه‌های اپتیکی برای مدوله‌سازی<sup>۱</sup> چگالی توان لیزر است، تصحیح می‌شود. پس از آماده‌سازی باریکه، باریکه لیزر بر روی محل دقیق آزمون

1- Modulating

تحت آزمون تخریب، متمرکز می‌شود. تابش پراکنده شده به وسیله یک عدسی جمع‌آوری می‌شود و به وسیله آشکارساز نوری<sup>۱</sup> تشخیص داده می‌شود. بخشی از باریکه لیزر بازتابیده شده از سطح آزمون، توسط یک روزنه منفی حذف می‌شود. برای رسیدن به حساسیت بالا و تداخل اندک با دیگر منابع نوری موجود در محیط چیدمان، روش‌های تشخیص حساس به فاز و یک فیلتر تداخلی برای طول موج لیزر مورد نیاز است. برای تشخیص دقیق، در تمامی چیدمان‌ها، سیگنال آشکارساز باید با تفکیک‌پذیری زمانی کافی ثبت شود به طوری که بتواند آغاز تخریب حاصل از تک پالس‌های لیزر آزمون را در لحظه نشان دهد.



راهنما

تضعیف کننده موتوری	1	عدسی آکروماتیک	6
لیزر تیتانیوم سفایر CPA <sup>۲</sup>	2	جابه‌جاکننده نمونه	7
رایانه کنترل کننده محاسبات	3	آشکارساز آنالین تخریب	8
آشکارساز انرژی	4	آینه بازتاب بالای ۴۵°	9
توان سنج	5		

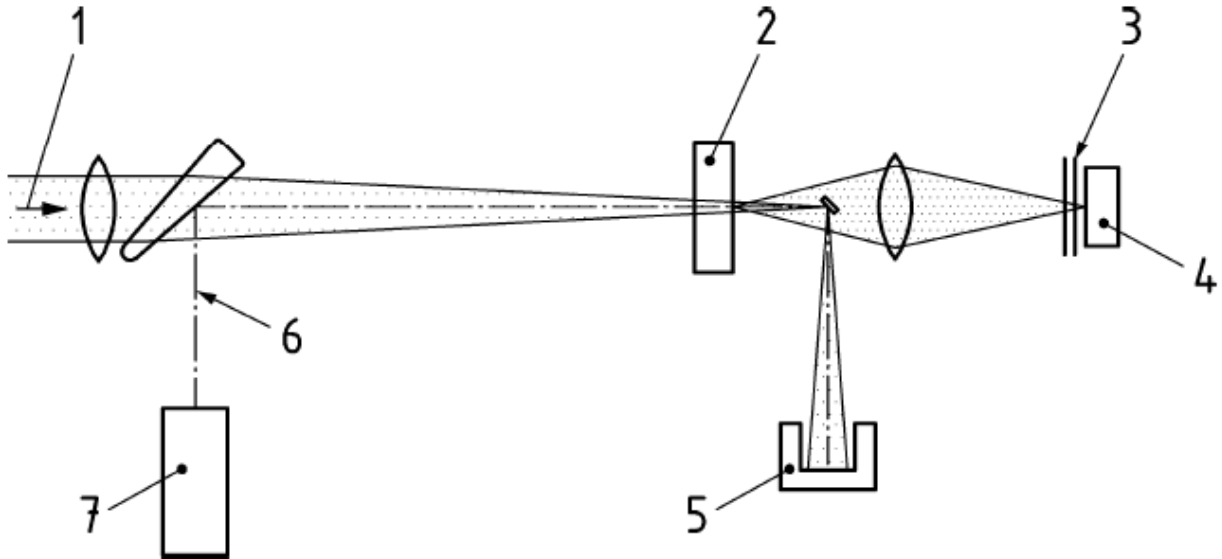
یادآوری - به منبع [۵] کتاب‌نامه مراجعه شود.

شکل ۱- چیدمان نوعی سیستم آنالین آشکارساز پراکندگی بر اساس تابش پراکنده شده از باریکه لیزر آزمون

سیستم‌های آشکارساز پراکندگی که برای تشخیص تخریب به کار می‌روند، قابلیت اعتماد بالایی را برای مکانیسم‌های تخریبی که بر ساختار سطح اثر می‌گذارند یا نقایصی را در حجم نمونه آزمون القا می‌کنند،

1- Photo detector  
2- Ti:Sapphire

نشان می‌دهند. این شمای تشخیص، در برخی موارد برای آزمون‌هایی که به وسیله اثراتی شامل لایه‌برداری<sup>۱</sup> کامل پوشش‌هایی از سطح تخریب می‌شوند، مناسب نیست. در برخی موارد در سیگنال پراکندگی در طول فاز اولیه تابش، کاهش مشاهده می‌شود که با اثرات تمیزکاری یا آماده‌سازی سطح مرتبط است.



راهنما

باریکه‌آزمون	1
نمونه‌آزمون	2
فیلتر <sup>۲</sup>	3
آشکارساز	4
تله <sup>۳</sup> باریکه	5
باریکه <sup>۴</sup> پروب	6
لیزر پروب	7

شکل ۲- چیدمان نوعی سیستم آنلاین آشکارسازی پراکندگی با یک منبع لیزری مجزا و یک روزنه منفی

۲-۳-۴ تشخیص پلاسما و تابش حرارتی

در صورت تخریب سطح، اغلب گسیل تابش حاصل از پلاسمای ناشی از لیزر مشاهده می‌شود (به منابع [۶] و [۱۵] کتاب‌نامه مراجعه شود). با به‌کارگیری چیدمانی مشابه با سامانه تشخیص استفاده شده برای روش‌های تشخیص آنلاین مستقیم مبتنی بر پراکندگی، می‌توان این تابش را به عنوان نشانه تخریب آشکارسازی کرد. برای جدا کردن گسیل پلاسما از تابش لیزر آزمون، مجموعه‌ای از فیلترها با چگالی اپتیکی بالا برای طول موج لیزر آزمون، توصیه می‌شود. تابش پلاسما می‌تواند در گستره طیفی وسیعی از MIR<sup>۵</sup>

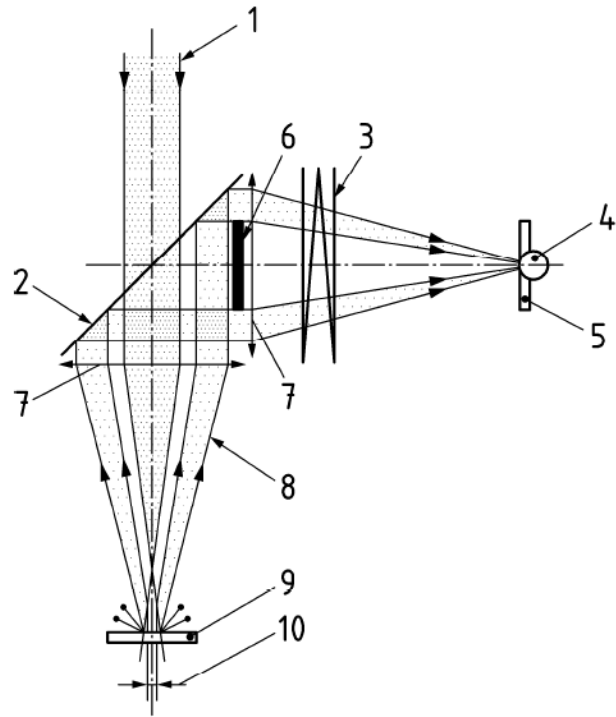
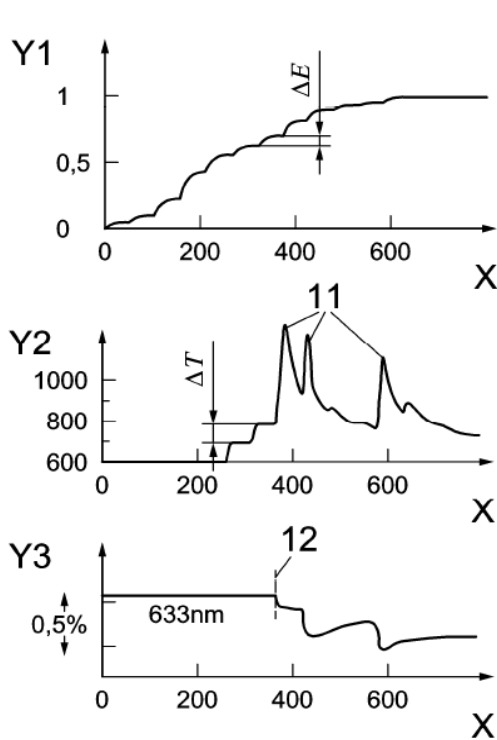
1- Delamination  
2- Filter stack  
3- Dump  
4- Probe  
5- Middle Infrared

تا DUV<sup>۱</sup>، اندازه‌گیری شود. در برخی چیدمان‌ها، طول موج در NIR<sup>۲</sup> انتخاب شده و هم‌زمان به عنوان سیگنال پیرومتریک برای تشخیص درجای<sup>۳</sup> دمای نمونه (به شکل ۳ مراجعه شود) تفسیر می‌شود. اگرچه کالیبراسیون دمایی سامانه به پارامترهای ویژه مختلفی از نمونه بستگی دارد، ارزیابی دمایی تابش، درباره مکانیسم‌های مشارکت کننده در تخریب درک بیشتری به دست می‌دهد. طرح‌های تشخیص مبتنی بر تابش پلاسما، با این مشکل که پلاسما در طی تابش لیزر و بدون تخریب سطح نیز می‌تواند ایجاد شود، مواجه هستند.

#### ۳-۳-۴ فلوئورسانس

تشخیص طیف‌سنجی نوری تابش فلوئورسانس، امکان تفسیر با جزئیات ترازهای الکترونی و گذارها در طی پرتودهی<sup>۴</sup> ماده نمونه را می‌دهد. به دلیل وجود فوتون‌های با انرژی بالا، این روش جنبه‌های جالبی را برای آزمون تخریب در گستره طیفی UV<sup>۵</sup> تا DUV پیشنهاد می‌کند. در اغلب موارد، فلوئورسانس در انرژی‌های تابشی نسبتاً پایین که به اندازه کافی پایین‌تر از آستانه تخریب قطعه تحت آزمون است، رخ می‌دهد. بنابراین، تشخیص تخریب به ارزیابی پیچیده‌ای از طیف‌های فلوئورسانس بستگی دارد که این روش را به آزمون‌ها و کاربردهای خاص محدود می‌کند.

- 
- 1- DeepUltra Violet
  - 2- Near Infa Red
  - 3- In-situ
  - 4- Irradiation
  - 5- Ultra Violet



شکل ب- سیگنال‌های آشکار شده در طی

پرتودهی به وسیله یک قطار پالسی

(۱۲ پالس،  $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ،  $d_{86.5} = 0.5 \text{ mm}$ <sup>[6]</sup>)

شکل الف- مثالی از چیدمان

راهنما:

نمونه	9	باریکه لیزر فرودی	1
قطر لکه	10	تقسیم کننده باریکه با خاصیت دوقامی <sup>1)</sup> HT 1060/HR 850/45	2
پلازما	11	مجموعه فیلتر HT 850/HR 1060	3
تخریب	12	فوتودیود سیلیسیم <sup>۲</sup>	4
مقیاس زمانی (μs)	X	روزنه تنظیم شده برای قطر لکه	5
انرژی (یکاهای نسبی)	Y1	میدان پراکندگی	6
دما (°C)	Y2	عدسی کانونی کننده	7
عبور (/.)	Y3	تابش حرارتی	8

شکل ۳- مثالی از چیدمان بر اساس تابش گسیل شده از سطح نمونه در طی تخریب یا گرمایش لیزری؛ نمودار

نشان دهنده سیگنال‌های آشکار شده در طی پرتودهی، به وسیله ی یک قطار پالسی

1- Dichroitic  
2- Si-photodiode

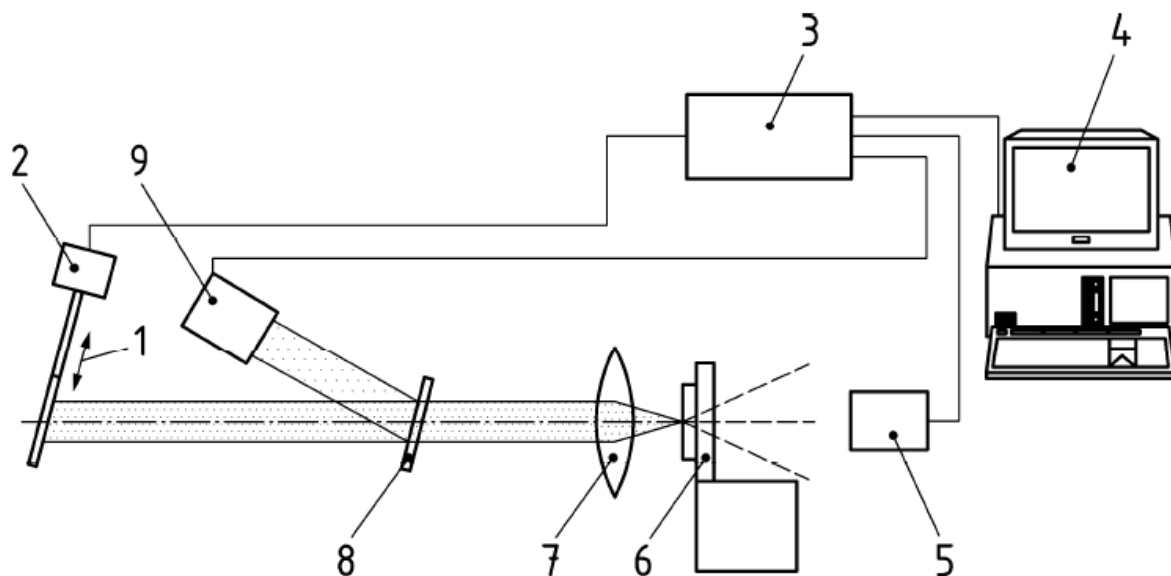


#### ۴-۴ تشخیص تغییرات در بازتاب یا عبور و تکنیک‌های تصویربرداری

##### ۱-۴-۴ تشخیص آنلاین تغییرات در بازتاب یا عبور

در حین یا پس از رُخ دادن تخریب، خواص اپتیکی عبوری نمونه به شکل قابل توجهی تغییر می‌کند. این اثر، مبنای تنوع در طرح‌های تشخیص تخریب مبتنی بر تشخیص‌های آنلاین تغییرات در بازتاب یا عبور از نمونه است. همانند طرح‌های تشخیص با استفاده از پراکندگی، می‌توان از تابش لیزر آزمون یا منبع جداگانه‌ای برای تشخیص استفاده کرد.

در طرح‌های تشخیصی که در آن تابش لیزر آزمون به وسیله نمونه عبور داده می‌شود، از یک واحد آشکارساز پشت نمونه (به شکل ۴ مراجعه شود) استفاده می‌شود. این سیستم آشکارساز شامل تضعیف‌کننده‌هایی برای تنظیم بیشینه توان لیزر فرودی بر آشکارساز و یک سامانه پردازش سیگنال مناسب با پهنای باند کافی برای تشخیص اثر هر پالس جداگانه در عبور از نمونه است. قابلیت اطمینان این سامانه‌ها با واحدهای تشخیص آنلاین پراکندگی قابل مقایسه است. نمونه‌های با عبور یا بازتاب بالا، همچنین نمونه‌های با تخریب حجمی بالا، نیازمند بررسی با رعایت احتیاط هستند.



راهنما:

- |   |  |
|---|--|
| 1 | آینه بازتاب بالا (HR) <sup>۱</sup>     |
| 2 | شاتر <sup>۲</sup>                      |
| 3 | کنترل کننده شاتر                       |
| 4 | رایانه کنترل کننده                     |
| 5 | آشکارساز                               |
| 6 | نگهدارنده نمونه                        |
| 7 | عدسی کانونی کننده                      |
| 8 | آینه بازتاب جزئی (PR) <sup>۳</sup> ۴ % |
| 9 | آشکارساز مرجع                          |
- یادآوری - به منبع [۷] کتاب نامه مراجعه شود.

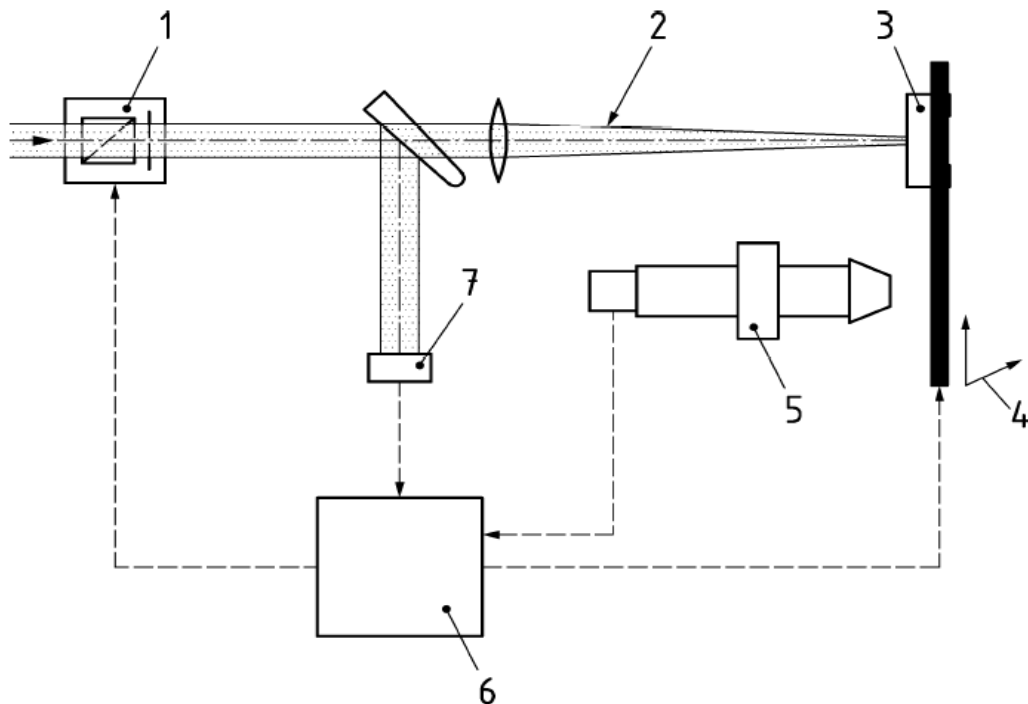
شکل ۴- مثالی از یک طرح تشخیص مبتنی بر تشخیص مستقیم عبور در طول موج آزمون

#### ۲-۴-۴ میکروسکوپی آنلاین

سامانه‌های میکروسکوپی آنلاین، امکان بررسی مستقیم سطح را در طی تابش متوالی فراهم می‌آورد. اغلب، سامانه‌های میکروسکوپی درجا با استفاده از یک میکروسکوپ فاصله دور که به یک دوربین الکترونیکی متصل است (به شکل ۵ مراجعه شود) ساخته می‌شوند. تصاویر معمولاً در یک کامپیوتر و با الگوریتم‌های مقایسه ای پیکسل به پیکسل پردازش می‌شوند، که تخریب را بر پایه آستانه عددی از پیش انتخاب شده‌ای از پیکسل‌ها که به وسیله تخریب ناشی از لیزر تغییر داده می‌شود، تعیین می‌کنند (به شکل ۶ مراجعه شود). با توجه به فرآیند نسبتاً زمان‌بر کاهش داده، تفکیک‌پذیری زمانی روش‌های میکروسکوپی آنلاین به گستره چند ده میلی ثانیه محدود می‌شود. همچنین، شناسایی رویداد تخریب، نسبتاً پیچیده و به اثرات

1- High Reflector  
2- Shutter  
3- Partial Reflector

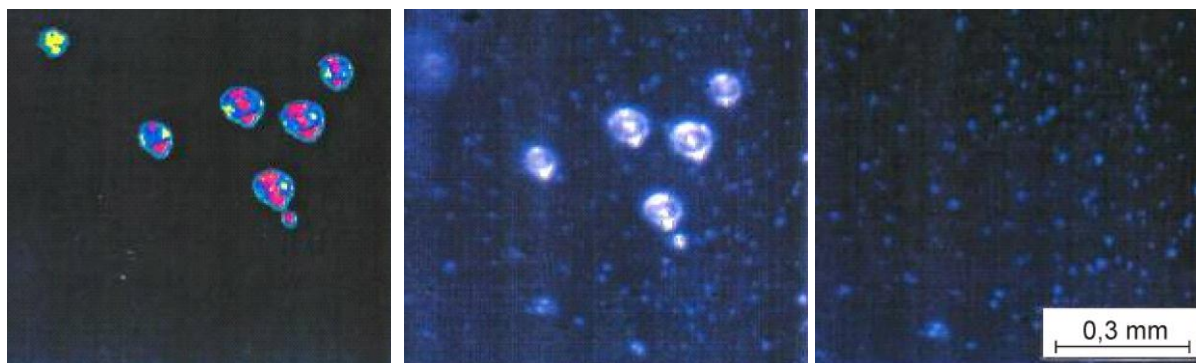
محیطی حساس است. اثرهای تمیزکاری لیزری ممکن است توسط سامانه‌های میکروسکوپی آنلاین به عنوان پدیده تخریب تفسیر شود. کمینه اندازه پیکسل سامانه‌های دوربین پیشرفته، محدودیت‌های دیگری روی تفکیک پذیری مکانی این تکنیک اعمال می‌کند. به منظور افزایش تفکیک پذیری، یک سامانه میکروسکوپی با فاصله کار کوچک نیز می‌تواند نزدیک نگهدارنده نمونه قرار گیرد. در این پیکربندی، نمونه را می‌توان با استفاده از یک پایه نوعی، از ناحیه تابش به کانون میکروسکوپ جابه‌جا کرد. پس از بررسی، نمونه می‌تواند مجدداً در ناحیه پرتودهی قرار گیرد. این تکنیک فقط برای تخریب یک-به-یک یا آزمون چند-به-یک بر اساس روش برون‌یابی کاربرد دارد (به شکل ۵ مراجعه شود)



راهنما:

- |   |                        |
|---|------------------------|
| 1 | تضعیف کننده            |
| 2 | باریکه آزمون           |
| 3 | نمونه آزمون            |
| 4 | پایه متحرک x/y         |
| 5 | میکروسکوپ و دوربین CCD |
| 6 | رایانه                 |
| 7 | آشکارساز انرژی         |
- یادآوری - به منبع [۸] کتاب‌نامه مراجعه شود.

شکل ۵- مثالی از چیدمان به همراه سامانه بررسی میکروسکوپی، جدا از ناحیه پرتودهی



پ- تشخیص مکان‌های تخریب به وسیله یک الگوریتم مقایسه‌گر تصویر شامل نمایش رنگی ساختگی<sup>۱</sup>

ب- مثالی از ارزیابی تصاویر میکروسکوپی ثبت شده پس از پرتودهی (لیزر TEA-CO<sub>2</sub>) به سطح نمونه

الف- مثالی از ارزیابی تصاویر میکروسکوپی ثبت شده قبل از پرتودهی (لیزر TEA-CO<sub>2</sub>) به سطح نمونه

یادآوری- به منبع [۹] کتاب‌نامه مراجعه شود.

شکل ۶- تصاویر تخریب ناشی از لیزر

#### ۴-۵ طرح‌های تشخیص فوتوترمال

##### ۴-۵-۱ کلیات

می‌توان چندین نوع از طرح‌های تشخیص متفاوت برای آنالیز اثرهای فوتوترمال ایجاد شده در طی تخریب را به کار بُرد (به منابع [۱۶]، [۱۷] و [۱۸] کتاب‌نامه مراجعه شود). نمای کلی این اثرها در شکل ۷ آورده شده است. اغلب این طرح‌ها برای تشخیص تخریب به کار می‌روند. در ادامه، طرح‌های تشخیصی که کاربرد بیشتری دارند، بررسی می‌شود. تفسیر سیگنال‌های مشاهده شده مربوط به پدیده تخریب فوق‌العاده پیچیده بوده و در اغلب موارد نمی‌تواند بدون مداخله انسان انجام شود. بنابراین، طرح‌های تشخیص فوتوترمال به طور عمده در تحقیقات بنیادی استفاده می‌شود و به ندرت در دستگاه‌های تشخیص تخریب که برای کنترل کیفیت معمول در نظر گرفته شده‌اند، به کار می‌روند.

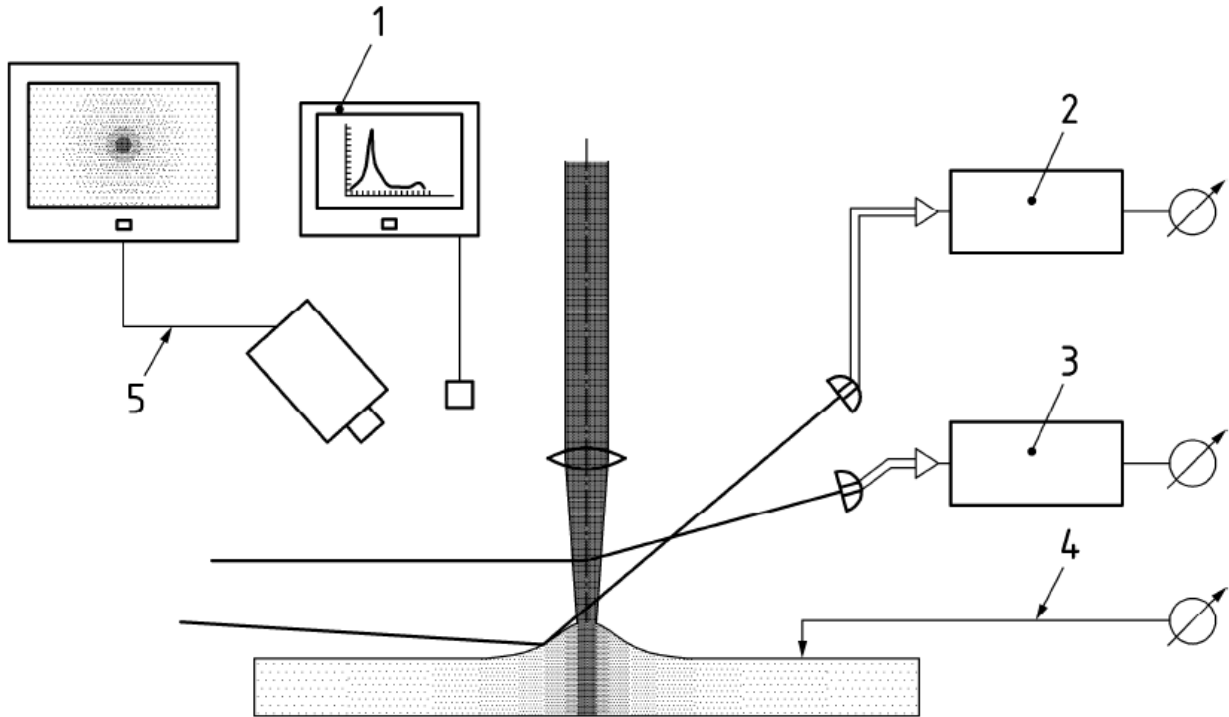
##### ۴-۵-۲ شکست فوتوترمال و عدسی‌شدگی حرارتی<sup>۲</sup> سطح

اساس روش انحراف فوتوترمال به وسیله طرح تشخیص<sup>۲</sup> (تکنیک انحراف)، در شکل ۷ نشان داده شده است. در نتیجه گرمایش لیزری سطح تحت بررسی، یک برآمدگی شکل می‌گیرد که باریکه پروب<sup>۱</sup> را منحرف می‌کند. برای تشخیص سیگنال منحرف شده حاصل از پدیده فوتوترمال، یک باریکه پروب بر روی محل

1- False colour representation  
2- Thermal lensing

آزمون هدایت می‌شود. موقعیت باریکه پروب بازتاب شده، توسط یک آشکارساز حساس به مکان، پایش می‌شود. جابه‌جایی‌های سطحی زیر  $1 \text{ \AA}$  قابل تشخیص است. قطعات اصلی آزمایش عدسی‌شدگی حرارتی سطح در شکل ۸ شرح داده شده است.

بر خلاف اثر انحراف حرارتی<sup>۲</sup>، انحراف کانون باریکه پروب که به واسطه برآمدگی ناشی از لیزر است، تشخیص داده می‌شود. مزیت‌های این دو طرح تشخیص، حساسیت نسبتاً بالای آنها و امکان تشخیص پدیده پیش‌تخریب است. اگر سامانه انحراف برای جذب کالیبره شود، رفتار دینامیکی جذب آزمون را نیز می‌توان آنالیز کرد.



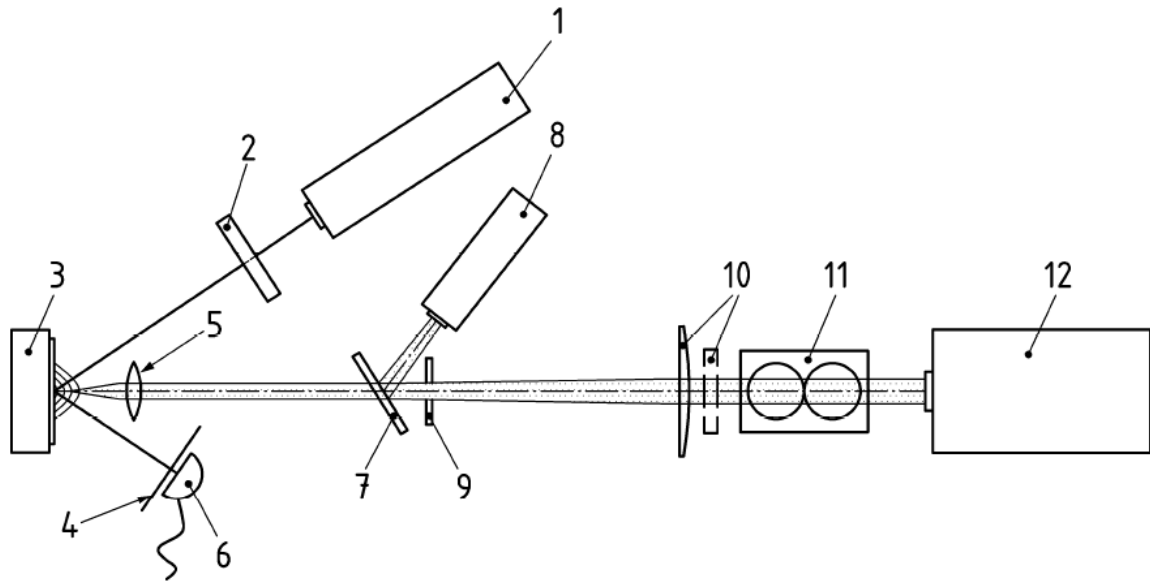
راهنما:

- 1 تکنیک فوتو آکوستیک
- 2 تکنیک شکست یا تغییر شکل فوتوترمال
- 3 اثر میریج<sup>۱</sup>
- 4 کالری متری<sup>۲</sup> لیزر
- 5 رادیومتری<sup>۳</sup>

یادآوری - روش‌های فوتوترمال مختلف را می‌توان برطبق کانال‌های تشخیص برای اثرهای حرارتی ناشی از لیزر طبقه‌بندی کرد. مثال‌هایی برای تکنیک‌های فوتوآکوستیک (۱)، تکنیک شکست یا تغییر شکل فوتوترمال (۲)، اثر میریج (۳)، کالریمتری لیزر (۴)، و رادیومتری (۵) نشان داده شده است.

شکل ۷- طرح‌های تشخیص فوتوترمال

- 
- 1- Mirage
  - 2- Calorimetry
  - 3- Radiometry



راهنما:

1	لیزر He-Ne	5	عدسی کانونی کننده	9	ماسک <sup>۱</sup>
2	تضعیف کننده	6	فوتودیود <sup>۲</sup>	10	هموژنایزر <sup>۳</sup> و عدسی میدانی
3	نمونه	7	تقسیم کننده باریکه	11	تضعیف کننده متغیر
4	روزنه <sup>۴</sup>	8	پیرومتر <sup>۵</sup>	12	لیزر اگزایمر <sup>۶</sup>

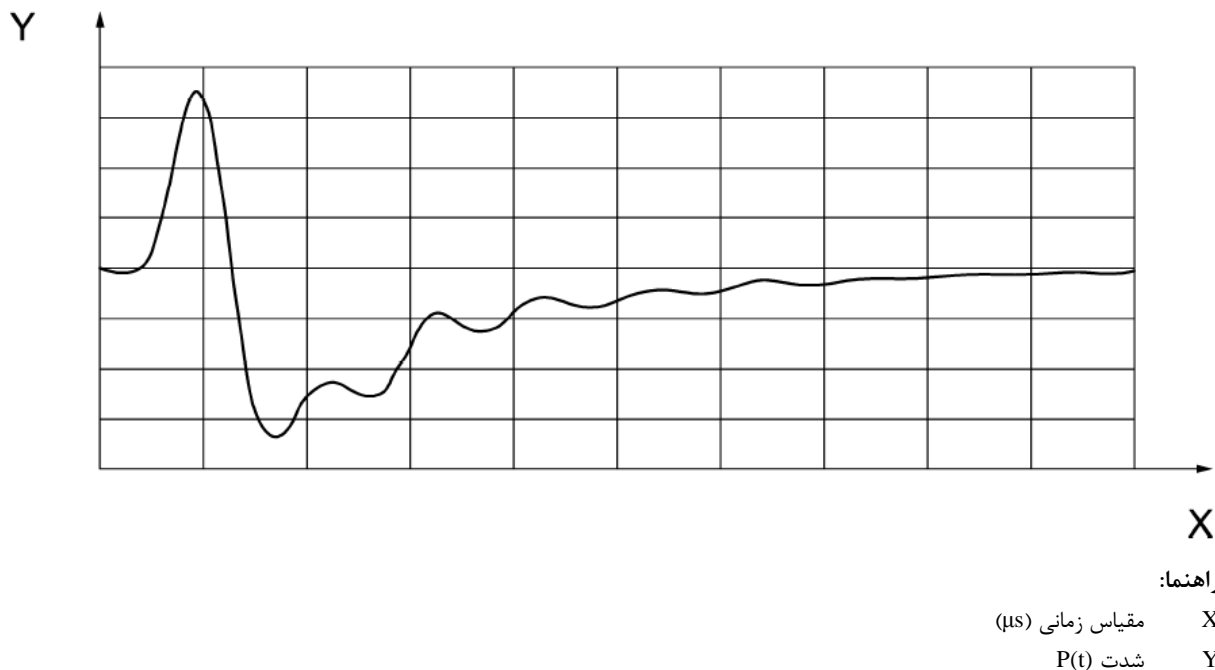
یادآوری - به منبع [۱۰] کتابنامه مراجعه شود.

شکل ۸- مثالی از چیدمان برای تشخیص تخریب به وسیله عدسی شدگی حرارتی سطح

#### ۴-۵-۳ اثر میریج

اثر میریج<sup>۷</sup> در شکل ۷، در طرح تشخیص شماره ۳، نشان داده شده است. در نتیجه گرم شدن آبی سطح، یک موج شوک صوتی (اثر میریج فوتوآکوستیک) گسیل می شود و باریکه پروب را منحرف می کند. همچنین گرما به وسیله رسانش گرمایی از سطح به محیط مادی پیرامون منتقل می شود که منجر به تغییری گذرا در ضریب شکست در مسیر باریکه پروب می گردد. این موج دمایی هم منجر به انحراف باریکه پروب می شود. انحراف باریکه پروب توسط یک آشکارساز حساس به مکان یاب و وسیله یک چیدمان همراه باروزنه شبیه به سیستم نشان داده شده در شکل ۸، آشکار سازی می شود. سیگنال انحرافی اثر میریج فوتوآکوستیک (به شکل ۹ مراجعه شود) را همچنین می توان با توجه به مکانیسم های مختلف برهم کنشی باریکه لیزر با قطعه اپتیکی ارزیابی کرد.

- 1- Mask
- 2- Photodiode
- 3- Homogenizer
- 4- Pinhole
- 5- Pyrometer
- 6- Eximer-Laser
- 7- Mirage effect



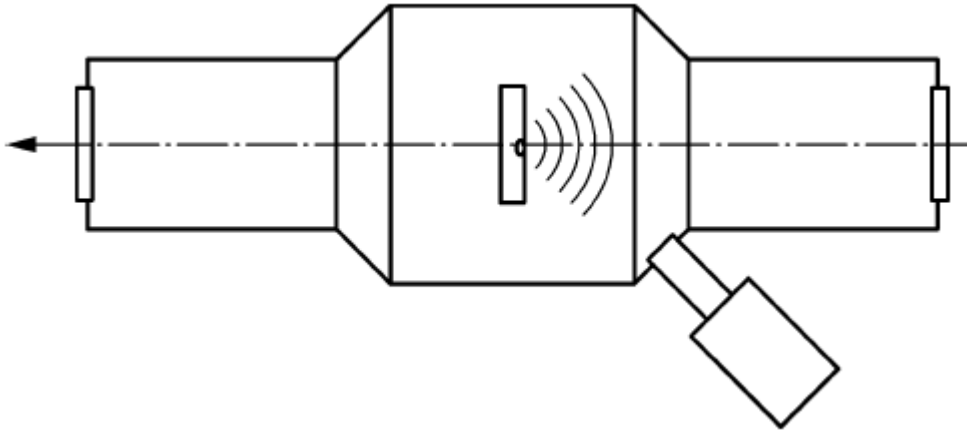
شکل ۹- تغییر زمانی نوعی شکست باریکه پروب (اثر میریج فوتوآکوستیک،  $0.25 \mu\text{s}/\text{div}$ ) پس از تخریب قطعه اپتیکی توسط لیزر TEA-CO<sub>2</sub>

#### ۴-۶ مشاهده تغییر آنی فشار

در حالتی که لازم است قطعه‌های اپتیکی تحت شرایط خلأ آزمون شوند، از یک روش پایش آنلاین تخریب براساس روش آشکارسازی غیر اپتیکی می‌توان استفاده کرد. اساس این روش آشکارسازی، قطعات کنده شده‌ای است که همزمان با وقوع تخریب لیزری از سطح تحت تابش پخش می‌شوند. آشکارسازی را می‌توان با حسگرهای فشار کاند سرد یا به‌طور کلی با خلأسنج‌های یونی که در مجاورت نمونه تحت بررسی قرار می‌گیرند، انجام داد. کار باید با حساسیت زیاد، تحت شرایط خلأ بالا در فشار پس زمینه کمتر از  $10^{-4}$  mbar انجام شود (در فشار  $10^{-4}$  mbar، مسافت آزاد میانگین مولکولی  $0.5$  m است، که باید قابل مقایسه با اندازه محفظه خلأ باشد). خلأسنج‌های یونی، فشار را به‌طور غیرمستقیم با شمارش تعداد یون‌های الکتریکی که در بمباران گاز به وسیله الکترون‌ها تولید می‌شوند، اندازه‌گیری می‌کنند. از این رو یا ذرات کنده شده خنثی یونیزه می‌شوند، یا یون‌های پخش شده مستقیماً به صورت جریان کاتد آشکارسازی می‌شوند. از آن‌جا که محفظه‌های خلأ در یک مد پمپاژ دینامیک کار می‌کنند، افزایش فشار آنی خواهد بود، یعنی مقدار فشار اصلی در کمتر از یک ثانیه پس از وقوع تخریب، به حالت نخست بر می‌گردد.

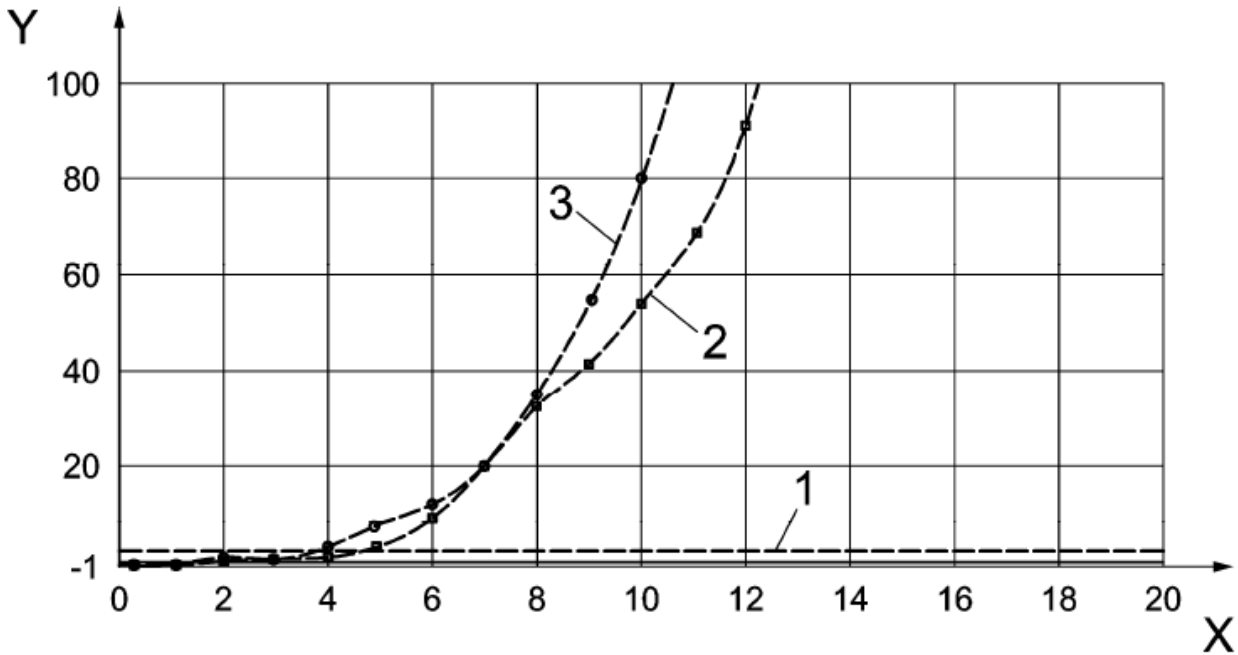
در شکل ۱۰ محفظه خلأ با حسگر فشار که در فاصله مناسب از نمونه تحت بررسی قرار گرفته، نشان داده شده است. گسیل ذرات یا مولکول‌ها از نمونه در اثر برهم‌کنش با لیزر توسط حسگر جمع‌آوری می‌شوند.





شکل ۱۰- قرارگیری حسگر فشار در مجاورت نمونه تحت آزمون در معرض خلأ؛ مواد کنده شده، پخش شده و ترجیحاً در جهت رو به جلو آشکارسازی می‌شوند.

سنجش تغییر آنی فشار که اساساً پهنای باند تشخیص بزرگی از مرتبه  $\text{KHz}$  دارد، به تداخل اپتیکی حساس نمی‌باشد، و می‌تواند برای پایش وقوع تخریب در سطوح انحنادار یا در نمونه‌های با پراکندگی بالا مثل تله‌های باریکه استفاده شود. شکل ۱۱ مثالی نشان داده شده است، که در آن نمودار تشخیص پراکندگی با نمودار افزایش همزمان فشار حسگر کاتد سرد که  $200\text{mm}$  دورتر از نمونه قرار دارد، تفاوت دارد. برای بررسی نمونه‌های کنده شده، یک تحلیل‌گر گاز باقی‌مانده می‌تواند به محفظه خلأ وصل شود.



راهنما:

X	تعداد پالس
Y	دامنه [a.u.]
۱	آستانه
۲	پراکندگی
۳	فشار

شکل ۱۱- نمودار پراکندگی و نمودار فشار ناشی از تخریب آینه بازتاب بالا که با اعمال حدود ۴ ضربه<sup>۲</sup> به وقوع پیوسته است. است. ( $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ,  $\tau_{\text{eff}} = 3.5 \text{ ns}$ , فشار پس زمینه  $4 \times 10^{-6} \text{ mbar}$ ,  $f_p = 100 \text{ Hz}$ )

## ۵ تکنیک‌های بررسی پس از آزمون‌های متوالی به وسیله لیزر

### ۱-۵ کلیات

تکنیک‌های بررسی میکروسکوپی و چشمی برای آزمایش سطح و حجم قطعه اپتیکی، قبل و پس از آزمون مطابق با استاندارد ISO 21254-1، اجباری است. برای تعیین هویت محل‌های تخریب شده روی نمونه آزمون شده، بررسی سطح مطابق با استاندارد ISO 21254-1، و با به‌کارگیری میکروسکوپ کنتراست تداخل تفاضلی<sup>۳</sup> نوع نومارسکی<sup>۴</sup> انجام می‌شود. با این حال، در صورتی که اثبات شود روش‌های بررسی دیگر با

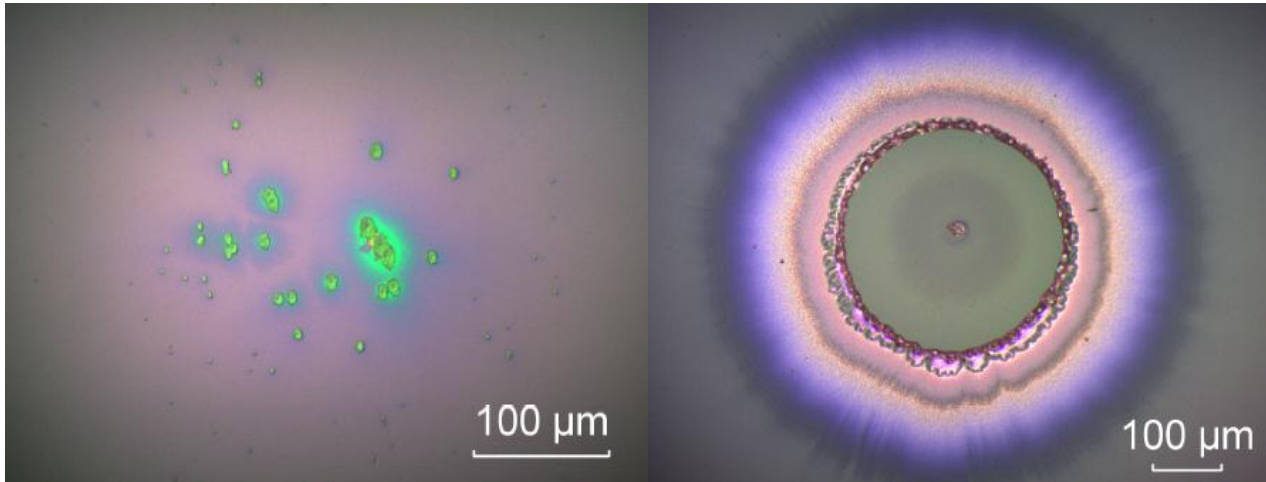
1- Angstrom unit

2- Shots

3- Differential interference contrast microscope

4- Nomarski-type

میکروسکوپ کنتراست تداخلی مطابقت دارند، می‌توان از آن‌ها نیز استفاده کرد. در ادامه، مثال‌هایی برای میکروسکوپ نومارسکی و برای روش‌های بررسی جایگزین شرح داده می‌شود.



الف- آینه بازتاب بالا برای لیزر Nd:YAG،  
 $E_0 = 78.2 \text{ J/cm}^2$ ، تخریب ناشی از جذب<sup>۲</sup>

ب- لایه ضدبازتاب برای لیزر Nd:YAG،  
 $E_0 = 31.8 \text{ J/cm}^2$ ، تخریب ناشی از نقص<sup>۱</sup>

شکل ۱۲- نمایشی از تکنیک‌های بررسی میکروسکوپی نومارسکی: میکروگراف‌هایی از محل تخریب‌های مختلف (پارامترهای آزمون:  $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ,  $\tau_{\text{eff}} = 12 \text{ ns}$ ,  $d_{\text{eff}} = 298 \mu\text{m}$ )

### ۵-۲ میکروسکوپ نومارسکی

تصاویر نوعی گرفته شده به وسیله سیستم میکروسکوپ نومارسکی، که مطابق با تکنیک بررسی شرح داده شده در استاندارد ISO 21254-1، به دست آمده است، در شکل ۱۲ نشان داده شده است. برای بررسی معمول و تشخیص عینی تخریب لیزر، می‌توان یک تحلیل‌گر تصویر را به میکروسکوپ متصل کرد. برای نمونه‌های شفاف در ناحیه طیفی مرئی، یک بررسی چشمی برای یافتن محل‌های تخریب توصیه می‌شود. اگر گمان بر تخریب حجمی باشد، کانون میکروسکوپ باید بر درون حجم قطعه تخریب شده منطبق شود.

قطعه‌های اپتیکی عبور دهنده<sup>۳</sup> که در ناحیه طیفی مرئی شفاف نیستند (به‌طور مثال Ge, CdTe, Si) نیازمند بررسی با استفاده از دوربین‌ها و میکروسکوپ‌هایی هستند که برای ناحیه شفاف آن‌ها تطبیق یافته‌اند.

### ۵-۳ مقایسه‌گر میکروسکوپی تصویر

میکروساختار تخریب ایجاد شده بر روی سطح یا درون قطعه آزمون در اثر تابش لیزر، پیچیدگی زیادی دارد. با وجود این که میکروسکوپ پروبی روبشی<sup>۱</sup> (SPM) تفکیک‌پذیری مناسبی را فراهم می‌کند، با این حال به

1- Defect-induced damage  
 2- Absorption-induced damage  
 3- Transmitting

دلیل محیط آزمون، نیاز به کاهش داده و هزینه، کاربردی به نظر نمی‌رسد. روش‌های اپتیکی به شرط این که عینی و قابل ردیابی<sup>۲</sup> باشند، روش‌های ارجح‌تری هستند. استاندارد ISO 14997، یک روش آزمون اپتیکی را برای عیوب سطح شرح داده است که استفاده از تیره‌سازی رادیومتر<sup>۳</sup> را برای نقایص با ابعاد کمتر از  $10 \mu\text{m}$  توصیه می‌کند. مراکز تخریب بزرگ‌تر را می‌توان با یک میکروسکوپ متحرک اندازه‌گیری کرد. در یک روش جایگزین، لکه‌های ماتی با اندازه مشخص جایگزین مرکز تخریب می‌شوند طوری که، وقتی هر دو در شرایط یکسان تحت تابش قرار می‌گیرند و بررسی می‌شوند، میزان تابش حذف شده به وسیله مرکز تخریب برابر با میزان تابش حذف شده به وسیله لکه با اندازه مشخص باشد. تخریب برحسب میکرومتر اندازه‌گیری شده و برحسب یکاهای قطر لکه معادل (sed)<sup>۴</sup>، بیان می‌شود.

طرحی از یک مقایسه‌گر میکروسکوپی تصویر ساده و کم هزینه که می‌تواند برای کمیت بخشی به تخریب‌هایی مثل حفره‌ها و خراش‌ها مورد استفاده قرار گیرد، در شکل ۱۳ نشان داده شده است. به دلیل بی‌نظمی شکل تخریب که الگوهای پراکندگی نامتقارن را به دنبال دارد، تابش فرودی باید عمودی باشد و برای حذف اثرهای اپتیکی ساختار ظریف تخریب، از یک سیستم تصویربرداری با دهانه‌ای کوچک<sup>۵</sup> استفاده می‌شود. دستگاه بر اساس یک میکروسکوپ استاندارد کار می‌کند که شامل مجموعه قطعات ۱، ۲، ۳ برای ایجاد تابش عمودی بر روی نمونه، و فیلتر فرکانس فضایی (قطعه ۸)، در پشت صفحه کانونی عدسی شیئی میکروسکوپ (قطعه ۷) می‌باشد. یک لامپ هالوژنی تنگستن و یک متراکم‌کننده<sup>۶</sup>، چشمه نقطه‌ای (قطعه ۱) را که در کانون موازی ساز (قطعه ۲) قرار دارد، روشن می‌کنند. باریکه موازی تولید شده، به وسیله تقسیم‌کننده قطبش‌گر<sup>۷</sup> (قطعه ۳) به سمت پایین بازتاب می‌شود تا سطح آزمونه تحت آزمون (قطعه ۴) را روشن کند.

باریکه عبور داده شده توسط آزمونه به وسیله بازتاب‌کننده به سمت عقب<sup>۸</sup> (قطعه ۵) برگشت داده می‌شود و در طول این مسیر دو بار از تیغه ربع موج (قطعه ۶) عبور می‌کند. تیغه ربع موج به این دلیل مورد نیاز است که باریکه برگشتی که توسط تقسیم‌کننده قطبش‌گر عبور داده شده، توسط عدسی شیئی تصویرسازی شود و از فیلتر فرکانس فضایی و عدسی میدان با دهانه بزرگ (قطعه ۹) عبور کند. این امر برای همگرا کردن پرتوهای میدان برای ورود به عدسی دهانه کوچک دوربین (قطعه ۱۰) مورد نیاز است. اگر آزمونه یک نمونه بازتابی باشد، دیگر نیازی به بازتاب‌کننده به سمت عقب نیست، و تیغه ربع موج بین آزمونه و تقسیم‌کننده قطبش‌گر قرار می‌گیرد. از آنجایی که خروج از کانون حتی به اندازه یک ربع طول موج، که از جابه‌جایی شیء در حدود  $0.3 \text{mm}$  نتیجه می‌شود، منجر به تغییر در حدود  $20\%$  در مقدار کنتراست تصویر می‌شود،

- 
- 1- Scanning probe microscope
  - 2- Traceability
  - 3- Radiometric obscuration
  - 4- Spot-equivalent diameter
  - 5- Low aperture
  - 6- Condenser
  - 7- Polarising beam splitter
  - 8- Retro-reflector

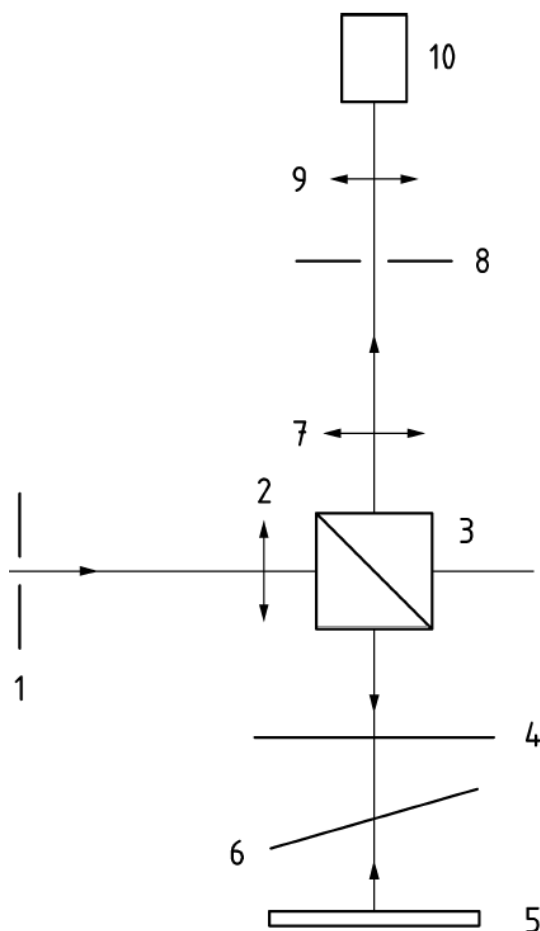
لازم است در انتخاب بهترین کانون دقت شود. برای انتخاب بهترین نقطه کانون می توان از یک کانال اپتیکی شامل یک چشمی<sup>۱</sup> استفاده کرد و یا یک دوربین دیجیتال را که به یک تلویزیون متصل شده است، جایگزین آن کرد. LCD دوربین ممکن است تفکیک پذیری کافی برای انجام این کار با دقت لازم را نداشته باشد. با این دستگاه مرکز تخریب به صورت یک لکه سیاه با یک پس زمینه سفید دیده می شود. در صورت کارکرد صحیح شاتر دوربین و قرار داشتن در نقطه کانونی، کار بعدی ذخیره سازی تصویر در یک کامپیوتر مجهز به نرم افزار پردازشگر تصویر است. بزرگنمایی تصویر در روی پرده باید به گونه ای تنظیم شود که تصاویر با حداقل ۱۰ پیکسل در تصویر دیده شود. نمایش دیجیتال تصویر در هیستوگرام و مقادیر درخشندگی<sup>۲</sup> تصویر در منوبار<sup>۳</sup> داده می شوند. برای تعیین کمینه مقدار درخشندگی،  $I_{min}$ ، یک پنجره به طور مثال  $1 \times 50$  پیکسل در تصویر انتخاب و به طور دستی روبش می شود. با جابه جایی پنجره انتخابی بیشینه مقدار  $I_{max}$  به دست می آید. کنتراست [%] C به صورت  $[I_{max} - I_{min}] / [I_{max} + I_{min}] \cdot 100$  محاسبه می شود. با توجه به این که مقدار درخشندگی به ۵ عامل مهم زیر بستگی دارد:

- تصویر باقی مانده؛
- بهم ریختگی حاصل از تغییرات پس زمینه؛
- خطا در تنظیم کانون؛
- نقایص باقیمانده از پولیش قطعات؛
- و
- گرد و غبار بر روی قطعات.

عدم قطعیت در آشکارسازی یک تصویر با کنتراست بالا، احتمالاً بهتر از  $\pm 5\%$  نخواهد بود. برای تبدیل کنتراست اندازه گیری شده تصویر مرکز تخریب نسبت به قطر لکه معادل (یکای sed)، لازم است دستگاه با استفاده از لکه های مات با ابعاد مشخص کالیبره شود. برای این منظور خطوط و نقطه های شطرنجی مات مطابق با سری های لگاریتمی در استاندارد ISO به صورت تجاری در دسترس هستند. این خطوط برای تعیین کمی شدت خراش ها بر حسب یکای عرض معادل خط (lew)<sup>۴</sup> مورد استفاده قرار می گیرند.

---

1- Eyepiece  
 2- Luminosity  
 3- MenuBar  
 4- Line-equivalent width



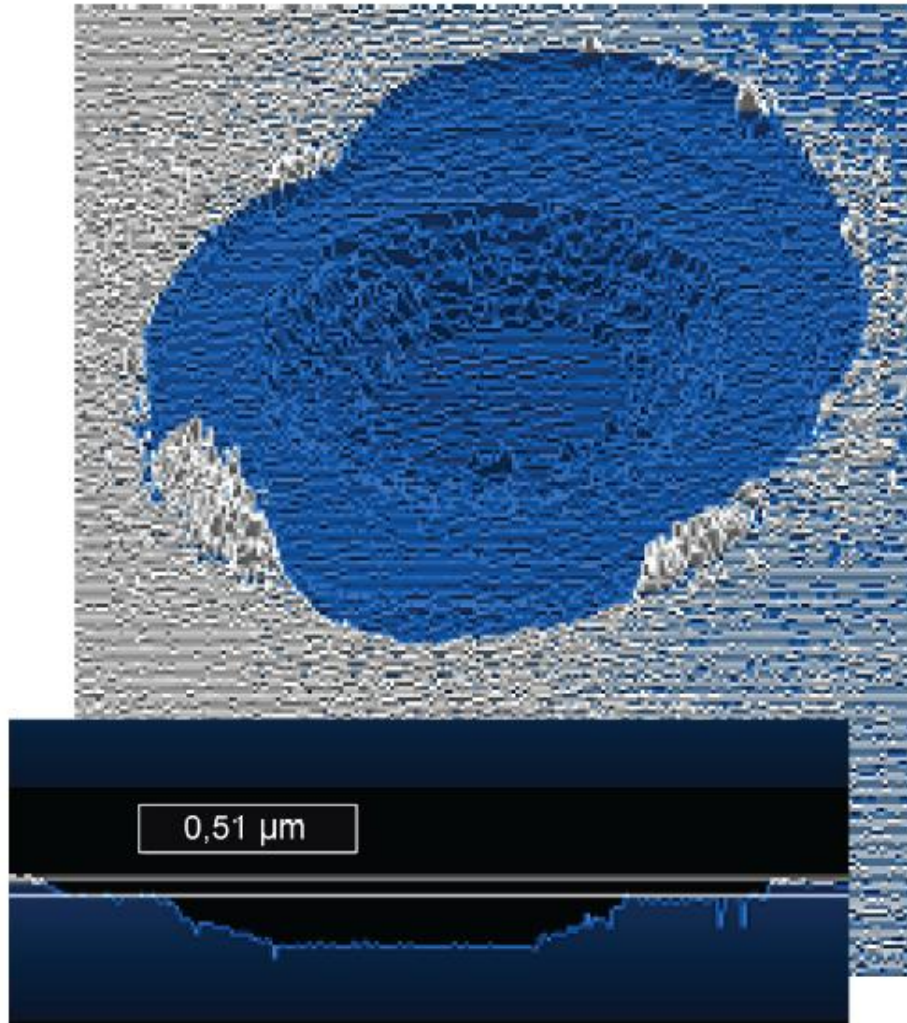
راهنما:

- |                              |    |
|------------------------------|----|
| روزنه                        | 1  |
| موازی‌ساز                    | 2  |
| تقسیم‌کننده قطبش‌گر          | 3  |
| آزمونه تحت آزمون             | 4  |
| صفحه بازتاب‌کننده به سمت عقب | 5  |
| صفحه ربع موج                 | 6  |
| عدسی تصویرساز                | 7  |
| روزنه                        | 8  |
| عدسی میدانی                  | 9  |
| دوربین دیجیتال               | 10 |

شکل ۱۳- اصول یک مقایسه‌گر تصویرساز میکروسکوپی

#### ۴-۵ میکروسکوپ روبشی لیزری

میکروسکوپ‌های روبشی لیزری (LSM)<sup>۱</sup>، دستگاه‌های مناسبی برای بررسی توپوگرافی تک محل‌های تخریب شده هستند. برخلاف تکنیک‌های بررسی با میکروسکوپ الکترونی، LSM می‌تواند برای نمونه‌ها با اندازه و شکل سطح دلخواه به کار گرفته شود. با توجه به روبش در سطح و عمق، LSM، امکان ثبت مستقیم توپوگرافی سه بعدی از سطح مورد نظر آزمون را فراهم می‌کند (به شکل ۱۴ مراجعه شود). همچنین LSM می‌تواند برای آشکارسازی شدت فلورسانس گسیل شده از سطح نمونه نیز مورد استفاده قرار گیرد.

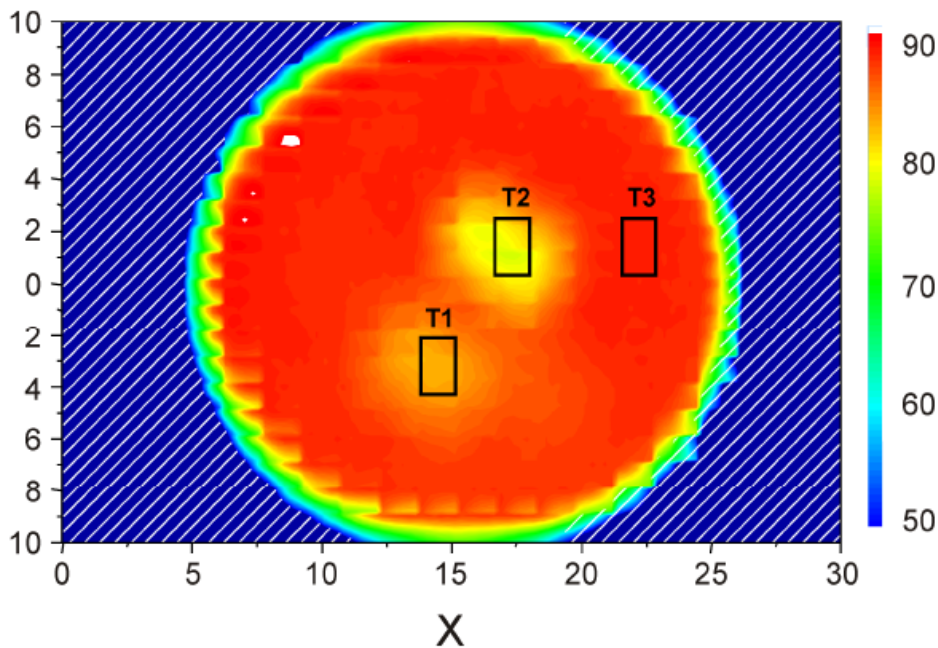


شکل ۱۴- میکروگراف روبش لیزری (توپوگرافی ۳ بعدی) از یک آینه بازتاب بالا (IBS  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ) برای کاربردهای پالس فوق کوتاه (Nd:YAG-Laser,  $\tau_{\text{eff}}=8 \text{ ns}$ ,  $d_{\text{eff}}=184 \mu\text{m}$ )

1- Laser scanning microscopes

## ۵-۵ تکنیک‌های نگاشت<sup>۱</sup>

برای شناسایی محل‌های تغییر داده شده به وسیله تابش لیزر، خواص مختلف سطح را می‌توان ترسیم کرد. علاوه بر پراکندگی یا جذب، بازتاب یا عبور نمونه پارامترهای کیفی هستند که می‌توانند از تابش لیزر تأثیر بپذیرند. دستگاه‌های تشخیص دقت بالا برای روبش بازتابش یا عبور در یک تک طول موج، براساس اصول شرح داده شده در استاندارد ISO 13697 عمل می‌کنند. برای آنالیز اسپکتروفوتومتری، اسپکتروفوتومترهای نگاشتی را می‌توان به کار برد (به شکل ۱۵ مراجعه شود). دستگاه‌های روبش گر سریع با حساسیت بالا براساس آشکارسازی پراکندگی کل مطابق با استاندارد ISO 13696 عمل می‌کنند.



راهنما:

X مکان (mm)

یادآوری ۱- محور عمودی سمت چپ مکان (mm)، و محور عمودی سمت راست عبور (/) را نشان می‌دهد.

یادآوری ۲- به منبع [۱۳] کتاب‌نامه مراجعه شود.

شکل ۱۵- نگاشت اسپکتروفوتومتری عبور ( $\lambda = 193 \text{ nm}$  لایه  $\text{SiO}_2$  بر روی کوارتز، ضخامت اپتیکی  $6\lambda/4$  و لکه‌ها تحت تابش سینکروترونی 2 GeV قرار گرفته‌اند)

## ۵-۶ روش میکروسکوپی الکترونی

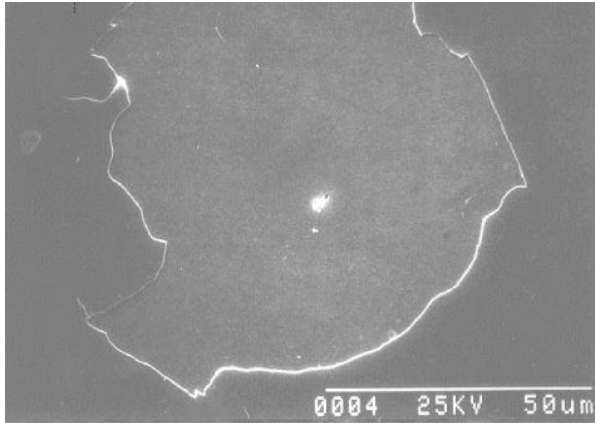
علاوه بر روش میکروسکوپی اپتیکی، تکنیک‌های بررسی با تفکیک‌پذیری بهبود یافته بر اساس روش میکروسکوپی الکترونی، برای بررسی تخریب مناسب هستند. تکنیک‌های میکروسکوپی روبشی الکترونی (SEM)<sup>۲</sup>، امکان بررسی با جزئیات را در مورفولوژی محل تخریب خاص فراهم می‌کند و اطلاعات تکمیلی در

1- Mapping

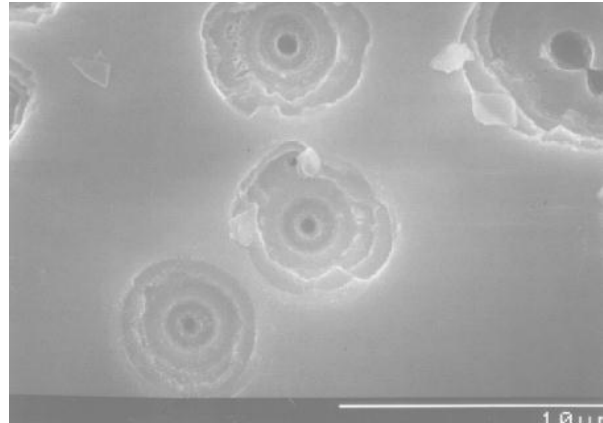
2- Scanning electron microscopic



مورد مکانیسم‌های دخیل در تخریب را ارائه می‌دهد. آماده‌سازی نمونه‌ها برای تکنیک‌های SEM معمولاً شامل شکستن نمونه و یک لایه‌نشانی<sup>۱</sup> اضافی برای بهبود هدایت الکتریکی سطح است. میکروگراف‌های SEM نوعی، از محل‌های تخریب انتخاب‌شده روی لایه‌های اپتیکی دی الکتریک در شکل ۱۶ نشان داده شده است. به دلیل پیچیدگی کنترل و مراحل آماده‌سازی لازم برای نمونه‌های لایه‌نشانی، کاربرد میکروسکوپ الکترونی عبوری به تحقیق‌های خاص در ساختار و مورفولوژی محل‌های تخریب شده محدود می‌شود.



الف - 2-QWOT-stack  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$   
 $\tau = 45\text{ns}$ ,  $E_0 = 45 \text{ J/cm}^2$ , Nd:YAG-Laser  
 تخریب ناشی از تنش، تخریب ناشی از نقص



ب - QWOT-stack  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$   
 $\tau = 14 \text{ ns}$ , Nd:YAG-Laser  
 تخریب ناشی از نقص

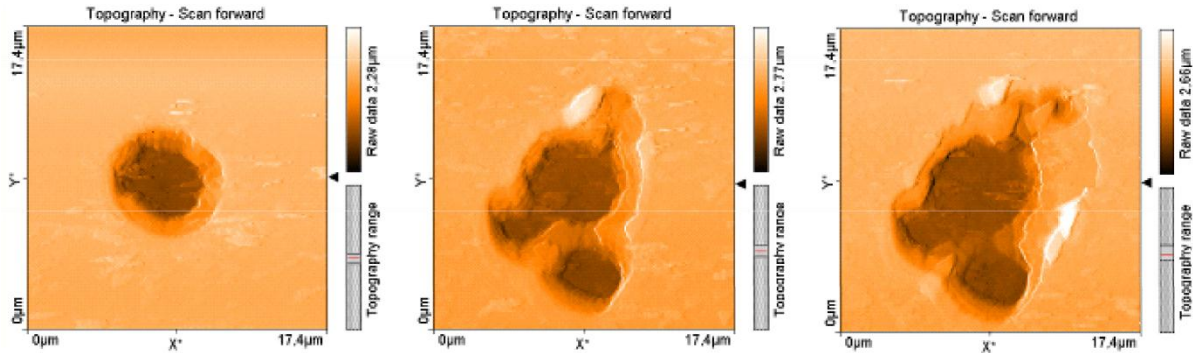
شکل ۱۶- نمایش تکنیک‌های بررسی میکروسکوپی الکترونی: میکروگراف‌هایی از محل‌های تخریب مختلف

#### ۷-۵ روش میکروسکوپی نیروی اتمی

به خاطر تفکیک‌پذیری افقی و عمودی بالا از مرتبه چندین نانومتر، روش میکروسکوپی نیروی اتمی یا AFM<sup>۲</sup> می‌تواند مورفولوژی تخریب را با جزئیات فراوان در یک پروفایل سطحی سه بعدی واقعی نمایش دهد، و از این رو می‌تواند بینش عمیقی درباره مکانیسم تخریب فراهم آورد. افزون بر آن، نمونه‌های بررسی شده توسط AFM نیاز به هیچ گونه عملیات خاصی (مثل لایه‌نشانی کربن یا فلز) که تغییرات برگشت‌ناپذیری را بر روی خواص نمونه به جای می‌گذارد، ندارند. در حالی که میکروسکوپ الکترونی برای عملکرد صحیح، نیازمند محیط خلأ پیچیده است، اغلب AFMها می‌توانند به خوبی در هوای محیط کار کنند. علاوه بر آن، دستگاه‌های AFM فشرده موجود می‌توانند به عنوان بخشی از یک میز آزمون اپتیکی به کار گرفته شوند. با دور کردن سر روبش‌گر برای تابش لیزر بر روی نمونه و سپس بازگشت درست آن، رشد مورفولوژی تخریب لیزری را می‌توان به صورت آفلاین<sup>۳</sup> دنبال کرد. به طور مثال در شکل ۱۷، تغییر

1- Overcoating  
 2- Atomic force microscopy  
 3- Offline

مورفولوژی پس از ضربه‌های متوالی اعمال شده بر روی پنجره لایه‌نشانی شده ضدبازتاب نشان داده شده است.



شکل ۱۷- روبش AFM، رشد تخریب لیزری پس از ضربه‌های متوالی (۱، ۲ و ۵ ضربه، از چپ به راست) بر روی پنجره لایه‌نشانی شده ضد بازتاب ( $\lambda = 532 \text{ nm}$ ; fluence  $\sim 20 \text{ J/cm}^2$ ,  $\tau = 3 \text{ ns}$ ,  $d = 50 \text{ }\mu\text{m}$ ) را نشان می‌دهد.

#### ۵-۸ روش میکروسکوپی هم‌کانون<sup>۱</sup>

مکان‌های تخریب شده را می‌توان با استفاده از میکروسکوپ هم‌کانون اندازه‌گیری کرد. میکروسکوپ هم‌کانون، سیستم میکروسکوپ یکپارچه‌ای است که شامل میکروسکوپ فلئورسانس، چشمه‌های نور لیزری، سر روبشگر که تابش لیزر را روی نمونه هدایت کرده و گسیل از آن را جمع می‌کند، رایانه به همراه نرم‌افزار برای کنترل سر روبشگر و نمایش داده‌های به‌دست آمده، می‌باشد. میکروسکوپ‌های هم‌کانون می‌توانند درمدهای روبش لیزری اپی فلئورسانس (ELSM)<sup>۲</sup>، بازتابی و عبوری مورد استفاده قرار گیرند. در مد ELSM، برانگیختگی توسط تابش منبع نقطه‌ای لیزر که به شکل هم‌کانونی به نمونه می‌رسد، ایجاد می‌شود. نور فلئورسانس گسیل شده از نقطه‌ای که تحت تابش قرار گرفته است، به صورت هم‌کانون در روزنه آشکارساز متمرکز می‌شود. نور فلئورسانس تابیده شده از خارج از نقطه کانونی (بالا و پایین صفحه کانونی)، وارد روزنه نمی‌شود و در نتیجه آشکارسازی نمی‌شود. با روبش نمونه در جهت‌های X و Y، یک تصویر بازسازی می‌شود. برای به‌دست آوردن یک تصویر سه بعدی، پایه X و Y در جهت Z به صورت خودکار حرکت می‌کند. برای تفکیک نور برانگیخته شده از نور گسیل شده، از یک آینه دوفامی<sup>۳</sup> استفاده می‌شود و یک فیلتر در جلوی آشکارساز (فوتومالٹی پلایر<sup>۴</sup>) قرار می‌گیرد. در مد روبش لیزری بازتابی، آینه دوفامی با یک آینه بازتاب جزئی<sup>۵</sup> جایگزین می‌شود تا نور بازتاب شده را بر روی فوتومالٹی پلایر هدایت کند. برای دستیابی به

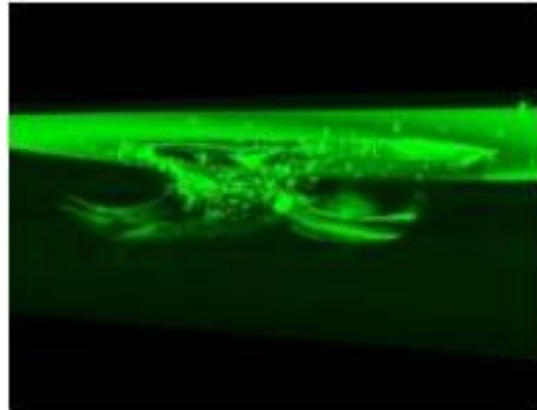
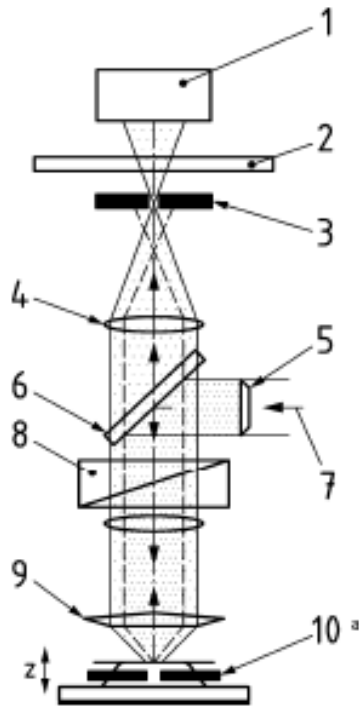
- 1- Confocal
- 2- Epi-fluorescence laser scanning mode
- 3- Dichroic
- 4- Photomultiplier
- 5- Partially

تفکیک‌پذیری هم‌کانون، نور بازتابی به وسیله روزنه فیلتر می‌شود. مقادیر تفکیک‌پذیری  $\sigma_{x,y}$  در جهت‌های x و y، و  $\sigma_z$  در جهت z در روش میکروسکوپی هم‌کانون از فرمول‌های زیر به دست می‌آید:

$$\sigma_{x,y} = 0.4\lambda/NA \quad (۱)$$

$$\sigma_z = 1.4\lambda n/NA^2 \quad (۲)$$

که در آن  $NA$  روزنه عددی،  $\lambda$  طول موج و  $n$  ضریب شکست اپتیکی است. تفکیک‌پذیری‌های نوعی بسته به عدسی‌های شیئی به کار گرفته شده، به طور تقریبی  $150 \text{ nm}$  در جهت x-y و  $300 \text{ nm}$  در جهت z هستند.



الف- اصول روش میکروسکوپ هم‌کانونی؛

ب- مورفولوژی نوعی محل تخریب مشاهده شده با روش میکروسکوپی هم-کانون (تصویر سه‌بعدی)

مدایی فلوتورسانس (به منبع [۱۴] کتاب‌نامه مراجعه شود).

راهنما:

1	فوتومولتی پلایر (آشکارساز چندفوتونی)	6	آینه دوفامی کننده <sup>۱</sup>
2	فیلتر گسیل	7	باریکه لیزر
3	روزنه	8	رویش‌گر
4	عدسی	9	عدسی شیئی <sup>۲</sup>
5	بسط دهنده <sup>۳</sup>	10	صفحه کانونی

<sup>a</sup> صفحه کانونی در جهت Z تغییر می‌کند.

شکل ۱۸- اصول روش میکروسکوپی هم‌کانون

مورفولوژی نوعی محل تخریب مشاهده شده بر روی وجه پشتی یک قطعه از جنس سیلیسیوم ذوب شده<sup>۴</sup>، به عنوان مثالی از مشخصه‌یابی روش میکروسکوپی هم‌کانون گزارش شده است (به شکل ۱۸ مراجعه شود): علاوه بر آن چه روی سطح رخ داده، ترک‌های زیر سطح هم نشان داده می‌شود.

- 1- Dichroir
- 2- Objective
- 3- Expander
- 4- Fused silica

کتابنامه

- [1] ISO 10110-7, Optics and photonics - Preparation of drawings for optical elements and systems - Part 7: Surface imperfection tolerances
- [2] ISO 13696, Optics and optical instruments - Test methods for radiation scattered by optical components
- [3] ISO 13697, Optics and photonics - Lasers and laser-related equipment - Test methods for specular reflectance and regular transmittance of optical laser components
- [4] ISO 14997, Optics and photonics - Lasers and laser-related equipment - Test methods for surface imperfections of optical elements
- [5] K. STARKE, T. GROB and D. RISTAU, Laser-induced damage investigation in chirped mirrors for ultrashort pulse laser systems, in Proc. of SPIE, vol. 4347 (edited by G.J. Exarhos, A.H. Guenther, M.R. Kozlowski, K.L. Lewis and M.J. Soileau), pp. 528–534, Proceedings of the 32th Annual Symposium on Laser-Induced Damage in Optical Materials, 2001
- [6] H. KÜSTER and J. EBERT, Pyroelectric measurement of absorption in oxide layers and correlation to damage threshold., in NBS Special Publication vol. 568 (edited by H.E. Bennett, A.J. Glass, A.H. Guenther and B.E. Newnam), pp. 269-281, Proceedings of the 10th Annual Symposium on Laser-Induced Damage in Optical Materials, 1979
- [7] K. STARKE, T. GROB, D. RISTAU, W. RIGGERS and J. EBERT, Laser-induced damage threshold of optical components for high repetition rate Nd:YAG-lasers, in Proc. of SPIE, vol. 3578 (edited by H.E. Bennett, A.H. Guenther, M.R. Kozlowski, B.E. Newnam and M.J. Soileau), pp. 584–593, Proceedings of the 30th Annual Symposium on Laser Induced Damage in Optical Materials, 1999
- [8] W. PLAB and A. GIESEN, Stress- and defect damage of CO<sub>2</sub>-laseroptics: time of damage analysis, in Proc. of SPIE, vol. 2714 (edited by H.E. Bennett, A.H. Guenther, M.R. Kozlowski, B.E. Newnam and M.J. Soileau), pp. 166–176, Proceedings of the 27th Annual Symposium on Laser-Induced Damage in Optical Materials, 1995
- [9] M. RAHE, E. OERTEL, L. REINHARDT, D. RISTAU and H. WELLING, Absorption Calorimetry and Laser Induced Damage Threshold Measurements of AR-coated ZnSe and Metal Mirrors at 10.6 μm, Proc. Of SPIE (edited by H.E. Bennett, L.L. Chase, A.A. Guenther, B.E. Newnam and M.J. Soileau), vol. 1441, pp. 113-126, Proceedings of the 22nd Annual Symposium on Laser-Induced Damage in Optical Materials, 1990
- [10] H. BLASCHKE, D. RISTAU, E. WELSCH and O. APEL, Absolute Measurements of non-linear Absorption near LIDT at 193 nm, in Proc. of SPIE, vol. 4347 (edited by G.J. Exarhos, A.H. Guenther, M.R. Kozlowski, K.L. Lewis and M.J. Soileau), pp. 447–453, Proceedings of the 32th Annual Symposium of Laser Induced Damage in Optical Materials, 2001
- [11] L. BAKER, Surface damage metrology: precision at low cost, in Proc. of SPIE Vol. 4779 (edited by A. Duparré and B. Singh) pp. 41-51, Proceedings of Advanced Characterization Techniques for Optical, Semiconductor, and Data Storage Components, 2002

- [12] B. WU, U. BARTUCH, M. JUPÉ, L. JENSEN, M. LAPPSCHIES, K. STARKE and D. RISTAU, Morphology investigations of laser induced damage, in Proc. of SPIE, vol. 6403 (edited by G.J. Exarhos, A.H. Guenther, K.L. Lewis, D. Ristau, M.J. Soileau and C.J. Stolz), p. 640319 ff., Proceedings of the 38th Annual Symposium on Optical Materials for High Power Lasers, 2006
- [13] S. GÜNSTER, H. BLASCHKE, K. STARKE, D. RISTAU, M. DANAILOV, B. DIVIACCO, A. GATTO, N. KAISER, F. SARTO, and E. MASETTI, Surface investigation of VUV-optical components after exposure to high energetic synchrotron radiation, in Proc. of SPIE, vol. 5273 (edited by G.V. Klimusheva, A.G. Iljin and S.A. Kostyukevych), pp. 281-287, Proceedings of the Ninth International Conference on Nonlinear Optics of Liquid and Photorefractive Crystals, 2004
- [14] J. NEAUPORT, P. CORMONT, P. LEGROS, C. AMBARD and J. DESTRIEATS, Imaging subsurface damage of grinded fused silica optics by confocal fluorescence microscopy, Opt. Express 17, 3543-3554, 2009
- [15] L. LAMAIGNÈRE, V. CAVARRO, C. ALLAIS, D. BERNARDINO, M. JOSSE and H. BERCEGOL, Time-resolved measurements of reflectivity, plasma formation and damage of Hafnia/Silica multilayers mirrors at 1064 nm, in Proc. of SPIE, vol. 4679 (edited by G.J. Exarhos, A.H. Guenther, M.R. Kozlowski, K.L. Lewis and M.J. Soileau), pp. 410-419, Proceedings of the 33th Annual Symposium on Laser-Induced Damage in Optical Materials, 2001
- [16] A. DURING, M. COMMANDRÉ, C. FOSSATI, B. BERTUSSI, J.Y. NATOLI, J.L. RULLIER and P. BOUCHUT, Integrated photothermal microscope and laser damage test facility for in-situ investigation of nanodefekt induced damage, Optics express 11, 2497 (2003)
- [17] A. DURING, C. FOSSATI and M. COMMANDRÉ, Photothermal deflection microscopy for imaging submicronic defects in optical materials, Optics Communications 230, 279 (2004)
- [18] B. BERTUSSI, J.Y. NATOLI and M. COMMANDRÉ, High resolution photothermal microscope: a very sensitive tool for the detection of isolating absorbing defects in optical coatings, Applied optics 45, 1410 (2006)