INSO
13018-2
1st.Edition
2017
Identical with
ISO 17901-2: 2015

جمهوری اسلامی ایران
Islamic Republic of Iran
سازمان ملی استاندارد ایران
Iranian National Standardization Organization

استاندارد ملی ایران
۱۳۰۱۸-۲
چاپ اول
۱۳۹۶

اپتیک و فوتونیک – تمام‌نگاری-
قسمت ۲: روش‌های اندازه‌گیری مشخصه‌های ثبت تمام‌نگار

Optics and photonics - Holography - Part 2:Methods for measurement of hologram recording characteristics

ICS: 31.020

سازمان ملی استاندارد ایران

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

صندوق‌پستی: ۶۱۳۹-۱۴۱۵۵ تهران- ایران

تلفن: ۵-۸۸۸۷۹۴۶۱

دورنگار: ۸۸۸۸۷۰۸۰ و ۸۸۸۸۷۱۰۳

کرج ، شهر صنعتی، میدان استاندارد

صندوق پستی: ۱۶۳-۳۱۵۸۵ کرج - ایران

تلفن: ۸- ۳۲۸۰۶۰۳۱ (۰۲۶)

دورنگار: ۳۲۸۰۸۱۱۴ (۰۲۶)

رایانامه: standard@isiri.org.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.org.ir

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

به نام خدا

آشنایی با سازمان ملی استاندارد ایران

سازمان ملی استاندارد ایران به موجب بند یک مادهٔ ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسهٔ استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱ تنها مرجع رسمی کشور است که وظیفهٔ 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 منصفانهٔ 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 پیشنهادها در کمیتهٔ 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 درکمیته ملی طرح، بررسی و درصورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی ایران چاپ و منتشر می‌شود. بدین ترتیب، استانداردهایی ملی تلقی می‌شود که بر اساس مقررات استاندارد ملی ایران شمارهٔ ۵ تدوین و در کمیتهٔ 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)[1]، کمیسیون بین‌المللی الکتروتکنیک (IEC)[2] و سازمان بین‌المللی اندازه‌شناسی قانونی (OIML)[3] است و به عنوان تنها رابط[4] کمیسیون کدکس غذایی (CAC)[5] 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 استاندارد کالاهای صادراتی و درجه‌بندی آن را اجباری کند. همچنین برای اطمینان بخشیدن به استفاده‌کنندگان از خدمات سازمان‌ها و مؤسسات فعال در زمینهٔ مشاوره، آموزش، بازرسی، ممیزی و صدور گواهی سامانه‌های 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، گواهینامهٔ 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

« اپتیک و فوتونیک – تمام‌نگاری قسمت ۲:روش‌های اندازه‌گیری مشخصه‌های ثبت تمام‌نگار »

	سمت و/ یا محل اشتغال
رئیس :	
مبشری، ابوالحسن (دکتری فیزیک- فیزیک اتمی مولکولی)	پژوهشگر- دانشگاه صنعتی مالک اشتر
دبیر :	
فاطمی، سیده راحیل (کارشناسی ارشد مهندسی برق- الکترونیک)	مدیر عامل- شرکت اندیشه فاخر شهرکرد
اعضاء : (اسامی به ترتیب حروف الفبا)	
رحمنی، سعید (کارشناسی ارشد اپتومتری)	عضو هیئت علمی- دانشگاه شهید بهشتی تهران
صیادی، سعید (کارشناسی ارشد مهندسی برق- الکترونیک)	مدیر عامل- شرکت بهساز طب
عجمی، عاطفه (کارشناسی ارشد فیزیک)	عضو جهاد دانشگاهی- دانشگاه صنعتی شریف
فاطمی، سید احسان (کارشناسی مهندسی برق الکترونیک)	کارشناس- اداره کار و تعاون اجتماعی شهرکرد
کارگر راضی، مریم (فوق دکتری مواد معدنی- علوم شیشه)	عضو هیئت علمی- دانشگاه آزاد واحد تهران شمال
کاظمی، سید مهدی (کارشناسی ارشد مهندسی پزشکی)	کارشناس تجهیزات- دانشگاه علوم پزشکی شهرکرد
میرزائی کجانی، مریم (دکتری فیزیک)	عضو پژوهشی مهندسی پزشکی- پژوهشگاه استاندارد

ویراستار:

صیادی، سعید — مدیر عامل- شرکت بهساز طب
(کارشناسی ارشد مهندسی برق- الکترونیک)

فهرست مندرجات

عنوان **صفحه**

پیش‌گفتار ح
مقدمه ط
۱ هدف و دامنه کاربرد ۱
۲ مراجع الزامی ۱
۳ اصطلاحات و تعاریف ۱
۳-۱ نوردهی ۲
۳-۲ منحنی مشخصه‌های نوردهی ۲
۳-۳ نوردهی در نصف حداکثر ۲
۳-۴ مقدار R ۳
۳-۵ فرکانس فضایی ۳
۳-۶ دامنه مدولاسیون ضریب شکست ۳
۴ نمادها ۴
۵ اصول ۴
۶ روش‌های اندازه‌گیری ۵
۶-۱ کلیات ۵
۶-۲ تعریف سیستم محورهای مختصات ۶
۶-۳ محیط ثبت تمام‌نگار ۶
۶-۴ وسایل و تمهیدات اندازه‌گیری ۷
۶-۵ روش اندازه‌گیری نوردهی در نصف حداکثر برای ثبت تمام‌نگار ۹
۶-۶ روش اندازه‌گیری نوردهی در نصف حداکثر برای ثبت تمام‌نگار ۱۰
۶-۷ روش اندازه‌گیری مقدار R تمام‌نگار ۱۱
۶-۸ روش اندازه‌گیری دامنه تمام‌نگار مدولاسیون ضریب شکست ۱۲
۷ شرح نتایج اندازه‌گیری ۱۳
۷-۱ کلیات ۱۳
۷-۲ شرح اطلاعات مربوط به شیئ تحت اندازه‌گیری ۱۳
۷-۳ شرح نتایج اندازه‌گیری بر روی منحنی مشخصه نوردهی در نصف حداکثر برای ثبت تمام‌نگار ۱۴
۷-۴ شرح نتایج اندازه‌گیری مقدار R تمام‌نگار ۱۴
۷-۵ شرح نتایج اندازه‌گیری مدولاسیون ضریب شکست تمام‌نگار ۱۵

عنوان **صفحه**

پیوست الف ۱۸
الف-۱ رویه مونتاژ سامانه اپتیکی ثبت تمام‌نگار ۱۸
پیوست ب ۲۱
ب-۱ رویه ثبت تمام‌نگار ۲۱
پیوست پ ۲۲
پ-۱ تمام‌نگار انتقال ۲۲
پ-۲ تمام‌نگار بازتاب حجمی ۲۳
پ-۳ ارتباط بین فرکانس فضایی و زاویه برخورد نوارهای تداخل تمام‌نگار بر پایه تداخل دسته پرتو دوتایی ۲۶

پیش‌گفتار

استاندارد « اپتیک و فوتونیک – تمام‌نگاری قسمت ۲:روش‌های اندازه‌گیری مشخصه‌های ثبت تمام‌نگار » 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 ایران شمارهٔ ۵ تهیه و تدوین شده، در ششصد و سی و یکمین اجلاسیه کمیتهٔ ملی استاندارد مهندسی پزشکی مورخ ۹۶/۰۸/۰۶ تصویب شد. اینک این استاندارد به استناد بند یک مادهٔ 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 شمارهٔ ۵ (استانداردهای ملی ایران- ساختار و شیوهٔ نگارش) تدوین می‌شوند. برای حفظ همگامی و هماهنگی با تحولات و پیشرفت‌های ملی و جهانی در زمینه صنایع، علوم وخدمات، 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 17901-2: 2015, first edition, Optics and photonics- Holography- Part 2: Methods for measurement of hologram recording characteristics

مقدمه :

تمام‌نگار یک وسیله اپتیکی با استفاده از تداخل است و در حوزه‌های مختلف قابل کاربرد است. برای دانستن مشخصه‌های نوردهی موادی که قرار است تمام‌نگار در آن ثبت شود، کافی است در ابتدا تمام‌نگار تحت شرایط متداول ثبت شود و بعد از آن با اندازه‌گیری بازده پراش، مقادیر عددی که مشخصه‌های نوردهی را ارائه می‌دهند ایجاد گردند. هر چند اصطلاحات مربوط به تمام‌نگار و روش اندازه‌گیری پارامترهای بحرانی ارزیابی(بازده پراش، انتخاب زاویه، طول موج انتخابی) مربوط به مشخصه‌های اپتیکی در استاندارد ISO 17901-1 مشخص شده‌اند، اما هیچ قید و شرطی تحت عنوان شرایط مربوط به ثبت تمام‌نگار یا راه محاسبه مقادیر عددی وجود ندارد. بنابراین، هدف تدوین این استاندارد تهیه اصطلاحات و روش اندازه‌گیری مربوط به مشخصه‌های نوردهی تمام‌نگار می‌باشد. این استاندارد قصد ندارد هیچ‌گونه محدودیتی در ارتباط با فرایند ساخت تمام‌نگار ایجاد کند.

"این استاندارد یک قسمت از مجموعه استانداردهای ملی ایران شماره ۱۳۰۱۸ است" و سایر قسمت‌های این مجموعه عبارتند از:

- قسمت ۱: روش‌های اندازه‌گیری بازده پراش و مشخصه اپتیکی تمام‌نگارها؛

اپتیک و فوتونیک – تمام‌نگاری

قسمت ۲:

روش‌های اندازه‌گیری مشخصه‌های ثبت تمام‌نگار

۱ هدف و دامنهٔ کاربرد

هدف از تدوین این استاندارد، تعیین اصطلاحات و روش اندازه‌گیری مشخصه‌های نوردهی (منحنی مشخصه نوردهی، نوردهی در نصف حداکثر، مقدار R، و دامنه مدولاسیون ضریب شکست) برای تمام‌نگاری است که به‌وسیله تداخل دو دسته باریکه نور ثبت می‌شود. ماده تمام‌نگاری که اندازه‌گیری‌ها روی آن انجام می‌شود، به هیچ مورد خاصی محدود نمی‌شود. این استاندارد قصد ندارد هیچ‌گونه محدودیتی در ارتباط با فرآیند ساخت ایجاد کند.

۲ مراجع الزامی

در مراجع زیر ضوابطی وجود دارد که در متن این استاندارد به صورت الزامی به آن‌ها ارجاع داده شده است. بدین‌ترتیب، 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 مراجعی 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 15902, Optics and photonics- Diffractive optics- Vocabulary.

۲-۲ استاندارد ملی ایران شماره ۱-۱۳۰۱۸: سال ۱۳۹۶، عنوان: اپتیک و فوتونیک- تمام‌نگاری- قسمت ۱: روش‌های اندازه‌گیری بازده پراش و مشخصه‌های اپتیکی مربوط به تمام‌نگارها.

۳ اصطلاحات و تعاریف

در این استاندارد، علاوه بر اصطلاحات و تعاریف مندرج در استانداردهای ISO 15902 و ISO 17901-1، اصطلاحات و تعاریف زیر نیز به کار می‌رود.

۱-۳

نوردهی

exposure

حاصل ضرب تابیدگی باریکه نور لیزر و زمان نوردهی بر روی سطح ماده ثبات، در مدت زمانی‌که قرار است تمام‌نگار بر روی ماده ثبات ثبت شود.

یادآوری ۱ – نوردهی در دستگاه SI بر حسب یکای ژول بر متر مربع (J/m^2) در سامانه SI بیان می‌شود، اما ممکن است به صورت میکروژول بر سانتی متر مربع ($\mu J/cm^2$) یا میلی ژول بر سانتی متر مربع (mJ/cm^2) نیز بیان شود.

یادآوری ۲- اگر در مسیر اندازه‌گیری تابیدگی، موج حاصل از شیئ یا موج مرجع به صورت مورب وارد آشکارساز شود، به دلیل ضریب شکست سطح آشکارساز ممکن است مقدار تابیدگی به درستی اندازه‌گیری نشود. در چنین وضعیتی کافی است برای اندازه‌گیری شار تابشی، موج حاصل از شیئ یا موج مرجع به صورت تقریباً عمود به آشکارساز وارد شده و سپس آن‌را بر مقدار به دست آمده توسط سطح مقطع شار بر روی سطح ماده ثبات تقسیم شود.

۲-۳

منحنی مشخصه‌های نوردهی

exposure characteristic curve

منحنی مشخصه‌های نوردهی تمام‌نگار منحنی ترسیم شده بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده تمام‌نگار که در آن مقادیر نوردهی بر روی محور افقی و مقادیر بازده پراش بر روی محور عمودی رسم می‌شود که این منحنی مشخصه‌های مواد ثبات تمام‌نگار را نشان می‌دهد.

یادآوری – این منحنی، منحنی مشخصه‌های $\eta - E$ نیز خوانده می‌شود.

۳-۳

نوردهی در نصف حداکثر

exposure at half-maximum

کوچک‌ترین نوردهی تمام‌نگار است که می‌توان در آن به ۵۰٪ بیشترین بازده پراش در منحنی مشخصه‌های نوردهی دست یافت.

یادآوری – این واژه، یک اندازه برای نشان دادن حساسیت ماده ثبات تمام‌نگار می‌باشد. هر چه مقدار نوردهی در نصف حداکثر کوچکتر باشد، مقدار نور کمتری برای ثبت تمام‌نگار مورد نیاز است.

۴-۳

مقدار R

R-value

بازده پراش یک تمام‌نگار است که نوارهای[1] تداخلی از یک فرکانس فضایی معینی را ثبت کرده است.

یادآوری ۱- برای فرکانس فضایی نوارهای تداخلی، از مقدار اندازه‌گیری شده در هوا استفاده می‌شود.

یادآوری ۲- این یک شاخص برای نشان دادن قدرت تفکیک[2] ماده ثبات برحسب جزئیات ریز نوارهای تداخلی است که به صورت فضایی در تمام‌نگار مشخص شده‌اند. برای نوارهای تداخلی ریزتر، ماده ثباتی که می‌تواند به مقدار R (بازده پراش) بالایی برسد، می‌تواند ماده ثباتی باشد که قدرت تفکیک بالایی را در تمام‌نگار تضمین کند. برای مثال، زمانی‌که بازده پراش تمام‌نگار ثبت شده با فرکانس فضایی ۱ ۰۰۰lines/mm نوارهای تداخلی برابر۳۰٪ فرض شود، مقدار R(۱ ۰۰۰) مساوی با ۳۰ است.

۵-۳

فرکانس فضایی

spatial frequency

تعداد نوارهای تداخلی تمام‌نگار در واحد طول است.

یادآوری - این فرکانس، میزان تراکم الگوی متناوب نوارهای تداخلی را نشان می‌دهد و بر حسب تعداد نوارهای تداخلی تکرار شده در واحد طول (lines/mm) بیان می‌شود. این مقدار با عکس فاصله بین نوارهای تداخلی متناسب است.

۶-۳

دامنه مدولاسیون ضریب شکست

amplitude of refractive index modulation

مقدار مدولاسیون ضریب شکست تمام‌نگار است و معادل تباین[3] نوارهای تداخلی و میانگین ضریب شکست در ماده ثبات یک تمام‌نگار فازی است که در آن فاز مطابق با اختلاف در ضریب شکست ماده ثبات مدوله شده است.

یادآوری۱- این یک شاخص برای نشان دادن ظرفیت مدولاسیون فازی ماده ثبات می‌باشد که به صورت Δn نیز بیان می‌شود.

1 - Fringes
2 - Resolution
3 - Contrast

۴ نمادها و کوته‌نوشت‌ها

NA روزنه عددی شیئ

λ طول موج لیزر در هوا (µm)

η بازده پراش (٪)

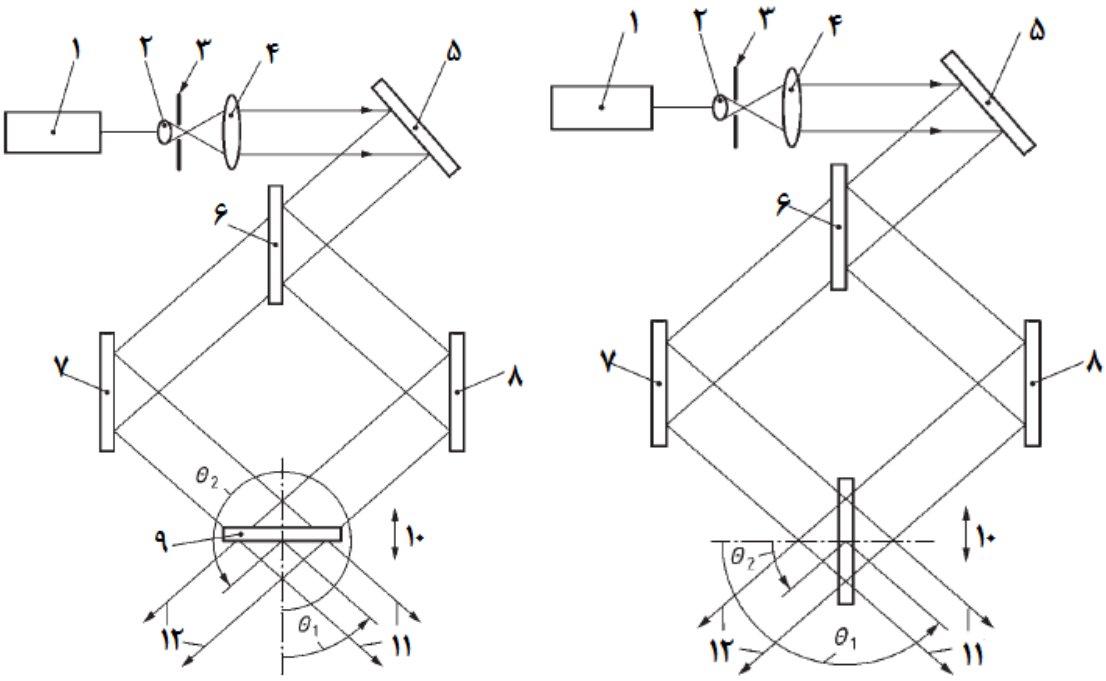
T ضخامت تمام‌نگار (µm)

θ'_B زاویه پراش براگ (زاویه داخل تمام‌نگار)(رادیان)

۵ اصول

تمام‌نگارها از طریق تداخل متقابل دو دسته باریکه نور از نوع موج‌های تخت ثبت می‌شوند. در شکل ۱ مثال‌هایی از سامانه‌های اپتیکی ثبت تمام‌نگار، نشان داده شده است. اندازه‌گیری بازده پراش در هر تمام‌نگار مطابق با روش‌های اندازه‌گیری مشخص شده در بند ۶-۵ این استاندارد انجام می‌شود. از ارتباط بین مقدار بازده پراش اندازه‌گیری شده و شرایط نوردهی، منحنی مشخصه‌های نوردهی، نوردهی در نصف حداکثر، مقدار R، یا دامنه مدولاسیون ضریب شکست به دست می‌آیند.

برای استخراج منحنی مشخصه‌های نوردهی یا نوردهی در نصف حداکثر، در حالی‌که نوردهی و ضریب شکست تغییر می‌کند، چندین تمام‌نگار ثبت می‌شوند و سپس بازده پراش برای هر تمام‌نگار اندازه‌گیری می‌شود. برای استخراج مقدار R، با تنظیم زاویه تابش دو دسته باریکه، یک یا چندین تمام‌نگار ثبت می‌شود. تنظیم زاویه تابش به‌صورتی انجام می‌شود که نوارهای تداخلی با فرکانس فضایی مشخص به دست آید و سپس بازده پراش هر تمام‌نگار اندازه‌گیری می‌شود. برای استخراج دامنه مدولاسیون ضریب شکست، بازده پراش مطابق با هر یک از روش‌های اندازه‌گیری مشخص شده در بند ۶-۵ این استاندارد اندازه‌گیری می‌شود. در انتها با جایگزین کردن مقادیر طول موج نور استفاده شده برای اندازه‌گیری بازده پراش، حجم تمام‌نگار، زاویه تابش دو دسته باریکه نور، میانگین ضریب شکست تمام‌نگار، و بازده پراش اندازه‌گیری شده، دامنه مدولاسیون ضریب شکست را می‌توان از فرمول (۲) یا فرمول (۳) مندرج دربند ۶-۸، به دست آورد.



الف- تمام‌نگار عبوری **ب- تمام‌نگار بازتابی حجمی**

راهنما:

۱	لیزر	۷	آینه ۲
۲	شیئ	۸	آینه ۳
۳	روزنه	۹	ماده ثبات تمام‌نگار
۴	عدسی موازی‌ساز	۱۰	نگهدارنده
۵	آینه	۱۱	موج مرجع
۶	نیم‌آینه	۱۲	موج حاصل از شیئ

شکل ۱- مثالی از چیدمان اپتیکی برای ثبت تمام‌نگار

۶ روش‌های اندازه‌گیری

۶-۱ کلیات

مشخصه‌های نوردهی (منحنی مشخصه‌های نوردهی، نوردهی در نصف حداکثر، مقدار R، و دامنه مدولاسیون ضریب شکست) همان‌طور که در این استاندارد ملی مشخص شده، بر اساس بازده پراش مشخص شده در استاندارد ....، به ترتیب زیر اندازه‌گیری می‌شوند. باید توجه داشت که مطابق با این استاندارد ملی، با اندازه‌گیری بازده پراش تمام‌نگارهای ثبت شده از طریق تداخل دو دسته باریکه نور با جبهه موج تخت، مشخصه‌های نوردهی در طی ثبت یک تمام‌نگار استخراج می‌شوند.

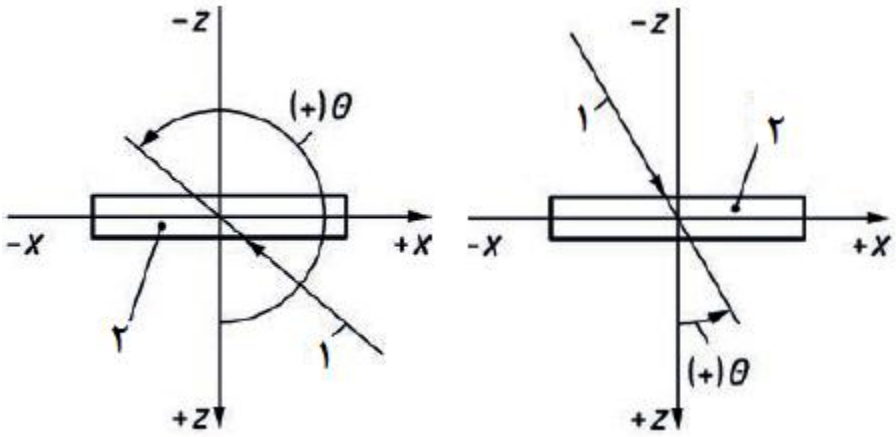
۲-۶ تعریف سیستم مختصات

محور مختصات و زاویه موج به ترتیب زیر تعریف می‌شوند.

الف- صفحه ماده ثبات (یا تمام‌نگار)، باید صفحه xy، و محور عمود براین صفحه باید محور z باشد.

ب- جهت حرکت پیشروی موج شیئ (یا موج بازسازی شده) باید جهت مثبت محور z باشد.

پ- مطابق با شکل ۲، زاویه تابش (θ) زاویه بین جهت مثبت محور z و امتداد موج تابش است که حرکت در جهت خلاف عقربه‌های ساعت، مقدار مثبت θ است.



الف- پیشروی موج در جهت z+ **ب- پیشروی موج در جهت z-**

راهنما:

۱ موج نور

۲ ماده ثبات یا تمام‌نگار

شکل ۲- چگونگی استقرار سیستم مختصات و زاویه موج در اندازه‌گیری مشخصه‌های نوردهی تمام‌نگار

۳-۶ محیط ثبت تمام‌نگار

ثبت تمام‌نگار باید درون یک اتاق تاریک با دما و رطوبت پایدار و تحت شرایطی با اقدامات کنترلی در برابر ارتعاشات مکانیکی و آشفتگی[1] هوا، انجام شود.

برای مثال با نصب همه تجهیزات، از جمله لیزر، بر روی یک میز اپتیکی حفاظت شده در برابر ارتعاش، می‌توان از ارتعاش مکانیکی جلوگیری کرد. برای جلوگیری از آشفتگی هوا، می‌توان کل میز اپتیکی را در یک پوشش پلاستیک یا پرده‌ای با بافت متراکم و محکم[2] محصور نمود، تا جریان هوا از مسیر تهویه و غیره

1 - Turbulence
2 -Blackout curtain

مسدود شود. هنگامی‌که لیزر دارای خنک کننده‌ای است که با هوا یا آب کار می‌کند، توصیه می‌شود در خصوص بروز آشفتگی در هوا یا ارتعاش تولید شده ناشی از کار لیزر، مراقبت‌های لازم معمول شود.

۶-۴ دستگاه و وسیله اندازه‌گیری

سامانه اپتیکی نشان داده شده در شکل ۱، مثالی از یک سامانه اپتیکی است که می‌تواند برای اندازه‌گیری مشخصه‌های نوردهی ماده ثبات تمام‌نگار مورد استفاده قرار گیرد. این سامانه شامل اجزای زیر می‌باشد.

یادآوری- برای رویه مونتاژ توصیه شده و روش تأیید پایداری برای سامانه اپتیکی ثبت تمام‌نگار به پیوست الف مراجعه شود، برای رویه ثبت تمام‌نگار به پیوست ب مراجعه شود، و برای ارتباط بین فاصله نوارهای تداخلی تمام‌نگار ناشی از تداخل دو دسته باریکه نور و زاویه تابش امواج شیئ (و موج مرجع) به پیوست پ مراجعه شود.

الف- لیزر

توصیه می‌شود از پایداری زمانی بالای خروجی لیزر (برای مثال ٪۵± یا کمتر در نوسانات خروجی در ۳۰ دقیقه) اطمینان حاصل شود.

ب- شیئ

شیئ مناسبی که قرار است انتخاب شود بهتر است یک شیئ با قابلیت بسط قطر باریکه نور باشد، به گونه ای که تابیدگی باریکه نور لیزر تابیده شده بر عدسی موازی‌ساز، تقریباً به اندازه قطر موثر عدسی موازی‌ساز باشد (برای مثال بزرگنمایی از ۱۰× تا ۴۰×).

پ- روزنه[1]

توصیه می‌شود روزنه مورد استفاده دارای قطر سوراخ مناسب (برای مثال ۵ تقریباً ۲۵μm) نسبت به طول موج لیزر و فاصله کانونی شیئ، باشد.

یادآوری- فرمول نظری قطر باریکه نور، d، در نقطه کانونی شیئ توسط فرمول (۱) ارائه می‌شود. مقدار دو برابر بزرگ‌تر از مقدار داده شده توسط فرمول (۱) را می‌توان به عنوان استاندارد سخت‌گیرانه[2] برای قطر روزنه استفاده نمود.

$$d = \frac{4 f \lambda}{\pi \omega} \approx \frac{4\lambda}{\pi\, NA} \qquad (۱)$$

که در آن

f فاصله کانونی شیئ (μm)؛

ω قطر باریکه نور تابش (پهنایی که در آن شدت باریکه نور $\frac{1}{e^2}$ مقدار حداکثر می‌شود) (μm)؛

1- Pinhole
2 - Rough standard

NA روزنه عددی شیئ؛

ت- عدسی موازی‌ساز

عدسی وصل شده به مقر عدسی که نسبت به طول موج لیزر مورد استفاده دارای بیراهی کروی تصحیح شده می‌باشد.

ث- آینه

توصیه می‌شود آینه دارای تختی سطح بالایی باشد (برای مثال، بهتر از ۱/۱۰ طول موج). بهتر است سکویی که آینه در آن نصب می‌شود، قابلیت حرکت چرخشی و کج کردن[1] ظریفی را با استفاده از یک پایه کنترل شده میکرومتری داشته باشد.

ج- نیم‌آینه

بهتر است نسبت نور بازتاب یافته به نور منتقل شده برابر با ۱:۱ در نیم‌آینه قابل دستیابی باشد.

یادآوری- برای مثال نیم‌آینه‌های دارای چندین لایه با پوشش کروم[2]، نیم‌آینه‌هایی که برای جلوگیری از تداخل نویز ایجاد شده توسط بازتاب قسمت پشت آینه به‌صورت گوه[3] با زاویه گوه ۱ درجه [$\frac{\pi}{180}$ (rad)=] شکل داده می‌شوند، و آن‌هایی که با پوشش ضد بازتاب[4] فراهم می‌شوند، از انواع مختلف نیم‌آینه هستند.

چ- نگهدارنده قطعه آزمون

بهتر است نگه‌دارنده، در حالی‌که ماده ثبات تمام‌نگار را نگه‌داشته است، در یک گستره تقریباً برابر با اندازه قطعه آزمون قادر به حرکت باشد. در این وضعیت، بهتر است نگهدارنده دارای مشخصه‌های ضد ارتعاش باشد. جدا نمودن یا نصب مواد ثبات باید در یک اتاق تاریک انجام شود بنابراین بهتر است نگه‌دارنده طوری پیکربندی شود که به راحتی بتوان آن‌را جدا یا نصب نمود. برای مثال، نگه‌دارنده می‌تواند دارای یک قاب فلزی با لبه‌ای تقریباً برابر با اندازه قطعه آزمون (یک قاب با پهنای حدود ۱۰mm، و با پوشش سیاه مات) باشد که قطعه آزمون توسط لبه‌های یک گیره[5] بر آن مهار می‌شود.

ح- آشکارساز

توصیه می‌شود آشکارساز دارای گستره دینامیکی و پاسخ‌دهی کافی به شدت نوری که قرار است اندازه‌گیری شود، بوده و بهتر است کالیبره شده باشد.

1 - Tilt
2 - Chromium
3 - Wedges
4 - Anti-reflection
5 - Clamped

۶-۵ روش اندازه‌گیری منحنی مشخصه‌های نوردهی برای ثبت تمام‌نگار

مشخصه‌های نوردهی توسط منحنی مشخصه نوردهی که در شکل ۳ نشان داده شده است، تعریف می‌شوند. یک منحنی مشخصه نوردهی (منحنی $\eta - E$ که ارتباط بین اثرات پراش و نوردهی را نشان می‌دهد) به ترتیب زیر رسم می‌شود:

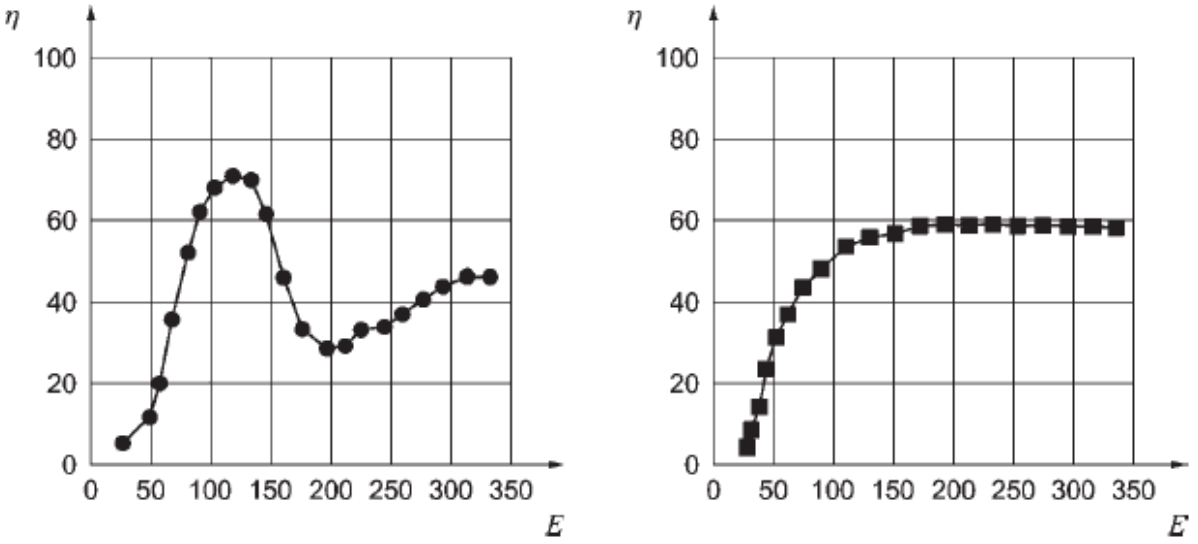
الف- طول موج منبع نور و زاویه تابش امواج شیئ و امواج مرجع برای یک ثبت تمام‌نگار، باید آن‌گونه که الزام شده است تعیین شود. با استفاده از سامانه اپتیکی نشان داده شده در شکل ۱، در مورد هر ماده ثباتی که تحت شرایط نوردهی متفاوت قرار گرفته باشد، فرآیند مشخص شده برای هر ماده ثبات (ظهور[1]، سفیدکردن[2] و غیره) باید انجام شده باشد.

ب- بازده پراش باید مطابق با روش‌های اندازه‌گیری مشخص شده در زیربند ۶-۵ استاندارد ملی ایران شماره ۱-۱۳۰۱۸ اندازه‌گیری شود.

بازده پراش می‌تواند به چندین نوع مختلف تقسیم شود که به‌طور کلی مقادیر متناظر آن‌ها تغییر می‌کند. بنابراین اندازه‌گیری بازده پراش به انتخاب روش اندازه‌گیری متناسب با شیئ تحت اندازه‌گیری، نیازمند است. برای تمام‌نگار بازتابی حجمی، توصیه می‌شود اندازه‌گیری بازده پراش عبور طیفی یا اندازه‌گیری بازده پراش طیفی توسط بازتاب به ترتیب مطابق با زیربندهای ۶-۵-۴ و ۶-۵- ۵ از این استاندارد انجام شود.

برای به دست آوردن منحنی مشخصه‌های نوردهی، نتایج اندازه‌گیری نوردهی ($\mu j/cm^2$) باید بر روی محور افقی و نتایج اندازه‌گیری بازده پراش (٪) باید بر روی محور عمودی، رسم شوند.

1 - Development
2 - Bleach



راهنما:

η بازده پراش به (٪)

E نوردهی به (mJ/cm^2)

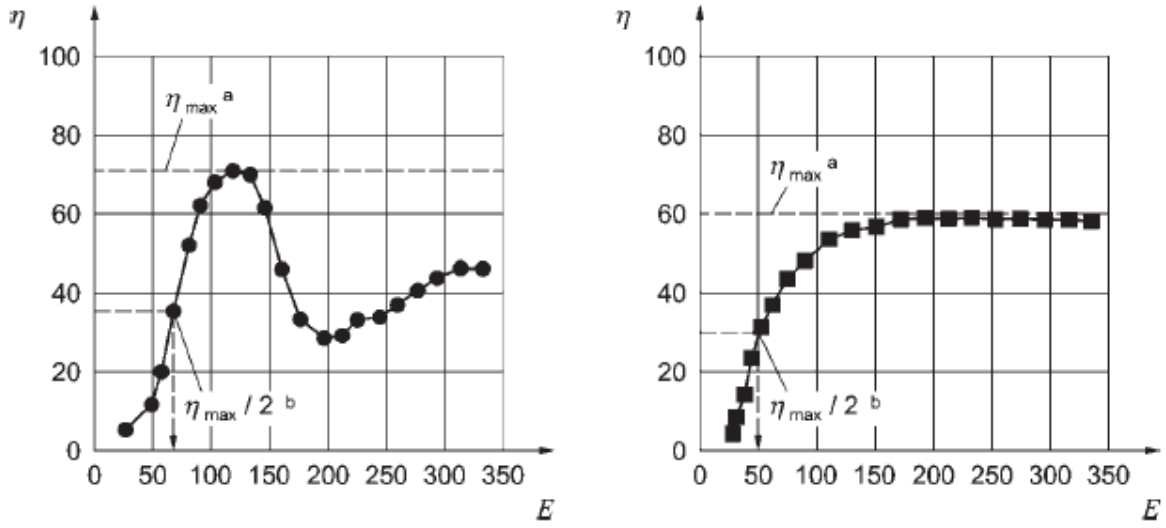
یادآوری- منحنی بالا که در آن یک قله (در طرف چپ) و یک منحنی مجانب به مقدار اشباع (در طرف راست) نشان داده شده است، به عنوان مثال‌هایی نوعی رسم شده است.

شکل ۳- مثالی از منحنی مشخصه‌های نوردهی(منحنی مشخصه (η-E))

۶-۶ روش اندازه‌گیری نوردهی در نصف حداکثر برای ثبت تمام‌نگار

برای نوردهی در نصف حداکثر، کم‌ترین مقدار نوردهی در میان آن‌هایی ($\mu J/cm^2$)که معادل با ۱/۲ بالاترین بازه پراش در منحنی مشخصه نوردهی که مطابق با زیربند ۶-۵ به دست آمده است (شکل ۳)، (یا ۱/۲ بازده پراش برای اشباع فرض شده است) باید از نمودار شکل ۴ خوانده شود.

عدد کوچک‌تر به معنی نوردهی کوچک‌تر مورد نیاز برای ثبت تمام‌نگار است. نوردهی در نصف حداکثر می‌تواند به‌عنوان اندازه‌ای برای نمایش حساسیت ماده برای ثبت تمام‌نگار استفاده شود. بهتر است توجه شود که این نوردهی در نصف حداکثر، کاملاً یک استاندارد سخت‌گیرانه برای تعیین نوردهی است و لزوماً یک نوردهی بهینه در خلال ثبت تمام‌نگار نیست.



راهنما:

η	بازده پراش به(%)	λ_{max}	بالاترین بازه پراش
E	نوردهی در $(\mathrm{mj/cm^2})$	$\lambda_{max/2}$	نوردهی در نصف حداکثر

شکل۴- منحنی مشخصه‌های نوردهی نوعی و طریقه خواندن نوردهی در نصف حداکثر

۶-۷ روش اندازه‌گیری مقدار R تمام‌نگار

مقدار R شاخصی است که قدرت تفکیک ماده تمام‌نگار را نشان می‌دهد و به صورت زیر تعریف می‌شود:

الف- تمام‌نگار باید با تغییر زاویه تابش دو دسته باریکه نور موازی شده ثبت شود (تغییر θ). در مورد تمام‌نگار عبوری دو پرتویی، فرض می‌شود که زاویه تابش موج شیئ برابر با θ و زاویه تابش موج مرجع برابر با $2\pi - \theta$ است. در حالت تمام‌نگار بازتابی دو پرتویی، فرض می‌شود که زاویه تابش موج شیئ برابر با θ و زاویه تابش موج مرجع برابر با π است.

زاویه تابش θ باید به گونه‌ای تنظیم شود که فرکانس فضایی نوارهای تداخلی در هوا (n= ۱٫۰) در وضعیت ماده ثبات، برای مثال ۵۰۰ lines/mm، ۱ ۰۰۰lines/mm، ۲ ۰۰۰lines/mm، ۳ ۰۰۰lines/mm، ۴ ۰۰۰lines/mm، شود. (برای نوع عبوری به فرمول پ-۴ و برای نوع بازتابی به فرمول پ-۸ مراجعه شود).

ب- بازده پراش هر تمام‌نگار باید مطابق با هر یک از روش های اندازه‌گیری مشخص شده در استاندارد .... زیربند ۶-۵ اندازه‌گیری شود.

پ- بازده پراش در هر فرکانس فضایی، برای مثال، ۵۰۰lines/mm، ۱ ۰۰۰lines/mm، ۲ ۰۰۰ lines/mm، ۳ ۰۰۰lines/mm، در هوا باید مقدار R فرض شود.

مثال: فرض کنید که بازده پراش هنگامی که تمام‌نگار عبوری با فرکانس فضایی ۱ ۰۰۰lines/mm در هوا بر یک ماده ثبات معین ثبت می‌شود برابر با ۳۰٪ است، مقدار R در فرکانس فضایی ۱ ۰۰۰lines/mm برابر با ۳۰ است، که به صورت R (۱ ۰۰۰) = ۳۰ نشان داده می‌شود.

۶-۸ روش اندازه‌گیری دامنه مدولاسیون ضریب شکست تمام‌نگار

۶-۸-۱ کلیات

دامنه مدولاسیون ضریب شکست تمام‌نگارهای فاز حجمی باید از اندازه‌گیری بازده پراش تمام‌نگار عبوری یا بازتابی مشتق شود. فرمول(۲) و فرمول (۳) تنها برای مدولاسیون با شاخص سینوسی قابل کابرد هستند.

۶-۸-۲ اندازه‌گیری با استفاده از تمام‌نگار عبوری

دامنه مدولاسیون ضریب شکست با استفاده از تمام‌نگار عبوری به ترتیب زیر اندازه‌گیری می‌شود:

الف- در حالی‌که فرض می‌شود زاویه تابش موج شیئ θ و زاویه تابش موج مرجع $2\pi - \theta$ است، تمام‌نگار باید با استفاده از دو دسته باریکه نور موازی شده ثبت شود.

ب- بالاترین مقدار بازده پراش (یا مقدار بازده پراش تشخیص داده شده برای اشباع) باید در منحنی مشخصه‌های نوردهی مشتق شده از زیربند ۶-۵، تعیین شود (به شکل ۳ مراجعه شود).

پ- دامنه مدولاسیون ضریب شکست Δn باید از فرمول (۲) محاسبه شود:

$$\Delta n = \frac{\lambda}{\pi T}\cos\theta'_B \arcsin\sqrt{\frac{\eta}{100}} \qquad (۲)$$

مقدار arcsin باید به رادیان محاسبه شود.

یادآوری- ارتباط بین زاویه پراش براگ θ'_B، و زاویه تابش و دو دسته باریکه نور، θ، طبق قانون اسنل می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$\theta'_B = \arcsin\left(\frac{\sin\theta}{\overline{n}}\right)$$

که در آن

$\overline{n}$ میانگین ضریب شکست تمام‌نگار است.

برای میانگین ضریب شکست تمام‌نگار، توصیه می‌شود از مقدار اندازه‌گیری شده بر روی تمام‌نگار ثبت شده استفاده شود. چون معمولاً اندازه‌گیری درست و صحیح، آسان نمی‌باشد، می‌توان از مقدار محاسبه شده بر اساس ترکیب مواد تمام‌نگاراستفاده کرد.

مثال: با استفاده از ماده حساس به نور هالید نقره با طول موج μm ۰٫۵۳۲ و $\theta = \frac{\pi}{8}$ (رادیان) و ضخامت μm ۷، یک تمام‌نگار ثبت شده و بازده پراش ٪۵۰ به دست آمده است. اگر $\bar{n}$ برابر با ۱٫۶۳ در نظر گرفته شود، دامنه مدولاسیون ضریب شکست در این حالت $\Delta n =$ ۰٫۰۱۸ تخمین زده می‌شود. توجه کنید که این مقدار نشانگر دامنه مدولاسیون ضریب شکست یک تمام‌نگارنوعی است که بازده پراش آن در شکل ۳- سمت چپ که مربوط به منحنی بازده پراش- مشخصه‌های نوردهی است، برای اولین بار به ٪۴۰ می‌رسد.

۳-۸-۶ اندازه‌گیری با استفاده از تمام‌نگار بازتابی

دامنه مدولاسیون ضریب شکست با استفاده از تمام‌نگار بازتابی به ترتیب زیر اندازه‌گیری می‌شود:

الف- در حالی‌که زاویه تابش امواج شیئ و امواج مرجع به ترتیب صفر(رادیان) و π (رادیان) یا θ (رادیان) و $\pi - \theta$ (رادیان) فرض می‌شوند، با استفاده از دو دسته باریکه نور موازی شده، تمام‌نگار باید ثبت شود.

ب- منحنی مشخصه‌های نوردهی باید بر اساس بازده پراش اندازه‌گیری شده مطابق با زیربند ۶-۵-۴ از استاندارد .... رسم شود (به شکل ۳ مراجعه شود). در این منحنی بالاترین مقدار بازده پراش (یا مقدار بازده پراشی که می‌تواند به عنوان اشباع شده تشخیص داده شود) باید تعیین شود.

پ- دامنه مدولاسیون ضریب شکست (Δn) باید از فرمول (۳) محاسبه شود:

$$\Delta n = \frac{\lambda}{2\pi T}\cos\theta'_B \cdot \log\frac{1+\sqrt{\eta/100}}{1-\sqrt{\eta/100}} \qquad (۳)$$

۷ توصیف نتایج اندازه‌گیری

۷-۱ کلیات

نتایج اندازه‌گیری مشخصه‌های نوردهی از یک ثبت تمام‌نگار باید مطابق با زیربندهای ۷-۳، ۷-۴ و ۷-۵ شرح داده شود. علاوه بر آن رویه و شرایط ثبت برای تمام‌نگار مربوطه نیز باید مطابق با زیربند ۷-۲، شرح داده شوند.

۷-۲ توصیف اطلاعات مربوط به شیئ تحت اندازه‌گیری

الف- نام ماده ثبات (برای مثال، اطلاعات قابل شناسایی مانند نشان تجاری، شماره کد ظهور و غیره).

ب- ضخامت ماده ثبات قبل از نوردهی (به استثنای زیر لایه یا قطعات تکیه‌گاه).

پ- نوع زیر لایه (یا قطعات تکیه گاه) (به تفکیک شیشه، فیلم پلیمری و غیره).

ت- ویژگی‌های باریکه نور لیزر استفاده شده برای ثبت تمام‌نگار [طول موج یا نوع لیزر (موج پیوسته یا پالسی)] .

ث- فرآوری (ظهور، سفیدکردن) استفاده شده در طی ثبت (فقط در صورت کاربرد). توصیه می‌شود این اطلاعات برای تجدیدپذیری توسط افراد دیگر نیزکافی باشند.

۳-۷ توصیف نتایج اندازه‌گیری بر روی منحنی مشخصه های نوردهی در نصف حداکثر برای ثبت تمام‌نگار

الف- مشخصه‌های نوردهی به دست آمده توسط منحنی‌های مشخصه‌های نوردهی (منحنی مشخصه E-$\square$) و/ یا مقدار ($\mu J/cm^2$) حداکثر نصف مقدار نوردهی مشتق شده از زیربند ۶-۶ و یا هر دو کمیت نمایش داده شود.

ب- برای تشریح منحنی مشخصه های نوردهی، اطلاعات زیر نیز باید توضیح داده شوند:

۱- زاویه تابش امواج شیئ و امواج مرجع در طی ثبت تمام‌نگار [درجه یا رادیان]؛
۲- روش(های) به کار رفته برای اندازه‌گیری بازده پراش مندرج در زیربند ۶-۵ ؛
۳- زاویه تابش موج روشنایی در طی اندازه‌گیری بازده پراش [درجه یا رادیان]؛
۴- طول موج موج روشنایی (طول موج لیزر اگر از زیربند ۶-۵-۲ یا ۶-۵-۳ این استاندارد استفاده شده، و طول موج در موقعیتی که عبور حداقل می‌شود، هنگامی‌که از زیربند ۶-۵-۴ این استاندارد استفاده شده است و طول موج در موقعیتی که بازتاب حداقل می‌شود هنگامی‌که از زیربند ۶-۵-۵ این استاندارد استفاده شده است).

۴-۷ توصیف نتایج اندازه‌گیری مقدار R تمام‌نگار

الف- مقدار R باید به‌وسیله مقدار به دست آمده از اندازه‌گیری مندرج در زیربند ۶-۷ ارائه شود.

ب- علاوه بر شرح مقدار R، اطلاعات زیر نیز باید شرح داده شوند:

۱- آیا شیئ تحت اندازه‌گیری، یک تمام‌نگار عبوری است یا یک تمام‌نگار بازتابی؛
۲- زاویه تابش امواج شیئ و امواج مرجع در طی ثبت تمام‌نگار [درجه یا رادیان]؛
۳- نوردهی ($\mu J/cm^2$) در طی ثبت تمام‌نگار؛
۴- کدام روش(های) مندرج در زیربند ۶-۵ برای اندازه‌گیری به کار رفته‌اند؛
۵- زاویه تابش موج روشنایی در طی اندازه‌گیری بازده پراش [درجه یا رادیان]؛
۶- طول موج موج روشنایی (طول موج لیزر اگر از زیربند ۶-۵-۲ یا ۶-۵-۳ این استاندارد استفاده شده، و طول موج در موقعیتی که عبور حداقل می‌شود، هنگامی‌که از زیربند ۶-۵-۴ این استاندارد

استفاده شده است و طول موج در موقعیتی که بازتاب حداقل می‌شود هنگامی‌که از زیربند ۶-۵-۵ این استاندارد استفاده شده است).

۵-۷ توصیف نتایج اندازه‌گیری مدولاسیون ضریب شکست تمام‌نگار

الف- مدولاسیون ضریب شکست باید به‌وسیله مقدار به دست آمده در زیربند ۶-۸ نشان داده شود.

ب- برای توصیف مدولاسیون ضریب شکست، اطلاعات زیر نیز باید توصیف شوند:

۱- زاویه تابش امواج شیئ یا امواج مرجع در طی ثبت تمام‌نگار [درجه یا رادیان]؛
۲- زاویه تابش موج روشنایی در طی اندازه‌گیری اثر پراش [درجه یا رادیان]؛
۳- طول موج موج روشنایی (µm) (طول موج در موقعیتی که عبور در بازده پراش طیفی، با اندازه‌گیری عبور مطابق با زیربند ۴، ۵ و۶ از استاندارد ISO 17901-1:2015 کوچک‌ترین می‌شود)؛
۴- روش اندازه‌گیری یا محاسبه (شامل تقریب) برای میانگین ضریب شکست تمام‌نگار.

جدول ۱-فهرست موارد گزارش

موارد	اطلاعات تشریح شده	ضرورت ثبت
۱- اطلاعات مربوط به شیئی که قرار است اندازه‌گیری شود	الف- نام ماده ثبات (برای مثال، اطلاعات قابل شناسایی همچون نشان تجاری، کد پدیدآوری و ...). ب- ضخامت ماده ثبت‌کننده تمام‌نگار قبل از نوردهی (به استثنای زیر لایه یا اجزای پشتیبانی) (μm). پ- نوع زیر لایه (یا اجزای پشتیبانی) (به تفکیک شیشه، فیلم پلیمری و...). ت- ویژگی‌های (طول موج (μm) لیزر موج پیوسته یا موج پالسی) دسته پرتو لیزر استفاده شده برای ثبت تمام‌نگار. ث- فرآیند (پدیدآوری، سفید کردن) به کار رفته در طی ثبت (تنها در صورت کاربرد، افراد دیگر باید حداقل اطلاعات مرتبط با قابلیت تولید مجدد را گزارش کند). ج- اگر بازده پراش وابستگی به قطبش دارد، حالت قطبش دسته پرتو لیزر نشان داده شود.	اجباری
۲- منحنی مشخصه‌های نوردهی برای ثبت تمام‌نگار	الف- منحنی مشخصه‌های نوردهی (منحنی مشخصه $\eta - E$) ب- زاویه برخورداموج شیئ و امواج مرجع در طی ثبت تمام‌نگار [درجه یا رادیان] ؛ پ- روش اندازه‌گیری بازده پراش (یک یا چند روش شرح داده شده در استاندارد ISO 17901:2015 زیربندهای ۶-۵-۲ تا ۶-۵-۵). ت- زاویه برخورد موج نوری در طی اندازه‌گیری بازده پراش [درجه یا رادیان]؛ ث- طول موج موج نوری (طول موج لیزر اگر روش اندازه‌گیری بازده پراش مطابق با زیربندهای ۶-۵-۲ یا ۶-۵-۳ از استاندارد ISO 17901-1:2015 باشد. طول موج متناظر با حداقل انتقال، اگر از زیربند ۶-۵-۴ در استاندارد ISO 17901:2015 استفاده شده باشد، و طول موج متناظر با حداقل ضریب شکست، اگر از زیربند ۶-۵-۵ استانداردISO 17901:2015 استفاده شده باشد.	یادآوری ۲-
۳- نوردهی در نصف حداکثر برای ثبت تمام‌نگار	الف- حداکثر مقدار بازده پراش(%) ب- نوردهی در نصف حداکثر (($\mu J/cm^2$) یا (mJ/cm^2)) پ- روش اندازه‌گیری بازده پراش	یادآوری ۲-

موارد	اطلاعات تشریح شده	ضرورت
۴- مقدار R تمام‌نگار	الف- مقدارR. ب- تمام‌نگار انتقال یا تمام‌نگار بازتاب قرار است اندازه‌گیری شود. پ- زاویه برخورد موج شیئ و امواج مرجع در طی ثبت تمام‌نگار [درجه یا رادیان]. ت- روش اندازه‌گیری بازده پراش (یک یا چند روش‌شرح داده شده در استاندارد ISO 17901-1:2015زیربند۶-۵-۲ تا ۶-۵-۴). ث- زاویه برخورد موج نوری در طی اندازه‌گیری بازده پراش [درجه یا رادیان]. ج- طول موج موج نوری (طول موج(μm) لیزر اگر که روش اندازه‌گیری بازده پراش مطابق با روش مندرج در استاندارد ISO 17901:2015 زیربند ۶-۵-۲ یا ۶-۵-۳ باشد. طول موج متناظر با حداقل انتقال اگر از استاندارد ISO 17901:2015 زیربند ۶-۵-۴ استفاده می‌شود، و طول موج متناظر با حداقل بازتاب اگر از استانداردISO 17901:2015 زیربند ۶-۵-۵ استفاده می‌شود).	اختیاری
۵- دامنه مدولاسیون ضریب شکست	الف- دامنه مدولاسیون ضریب شکست ب- زاویه برخورد امواج شیئ و امواج مرجع در طی ثبت تمام‌نگار [درجه یا رادیان]، پ- زاویه برخورد موج نوری در طی اندازه‌گیری بازده پراش [درجه یا رادیان]. ت- طول موج نوری((μm) (طول موج متناظر با حداقل انتقال در بازده پراش طیفی، اگر اندازه گیری مطابق با استاندارد ....زیربند ۶-۵-۴ انجام شده ث- روش اندازه‌گیری یا محاسبه (تخمینی) میانگین ضریب شکست تمام‌نگار	اختیاری
یادآوری ۱- اگر اطلاعات فهرست شده در برخی از موارد مشترک است، در صورتی که به آن شرح ارجاع داده شود، تکرار آن برای هر مورد لازم نیست. **یادآوری ۲**- درج حداقل یکی از موارد (۲) یا (۳) در گزارش الزامی است.		

پیوست الف

(آگاهی دهنده)

رویه مونتاژ و تأیید پایداری سامانه اپتیکی ثبت تمام‌نگار بر اساس تداخل دو دسته باریکه نور

الف-۱ رویه مونتاژ سامانه اپتیکی ثبت تمام‌نگار

رویه توصیه شده مونتاژ سامانه اپتیکی ثبت تمام‌نگار (به شکل ۱ مراجعه شود)، به ترتیب زیر است:

الف- تنظیم ارتفاع سامانه اپتیکی مرجع

سطح بدنه اصلی لیزر طوری تنظیم می‌شود که باریکه نور لیزر نسبت به سطح میز اپتیکی بدون ارتعاش، به صورت افقی قرار بگیرد. توصیه می‌شود ارتفاع باریکه نور در بالای سطح میز به عنوان ارتفاع سامانه اپتیکی مرجع فرض شود. ارتفاع باریکه نور را می‌توان به سادگی تراز کرد، برای مثال، با استفاده از یک پایه با ارتفاع مرجع، یعنی یک صفحه شیشه‌ای دارای یک علامت ضربدر بصورت یک خط نازک و متصل شده به این پایه. و هم مرکز کردن علامت ضربدر تراز شده با ارتفاع مرجع.

ب- تنظیم سامانه اپتیکی

باریکه نور لیزر در حین عبور از شیئ، روزنه و عدسی موازی‌ساز، از میان سامانه اپتیکی متشکل از آینه، نیم‌آینه و نگه‌دارنده قطعه آزمون نیز عبور می‌کند. پایه‌های ارتفاع مرجع به ترتیب در میان قطعات قرار گرفته و تنظیم با چرخش یا کج کردن هر آینه، تا وقتی‌که ارتفاع باریکه نور بین مسیرهای اپتیکی، با ارتفاع مرجع در یک خط قرار گیرند، تنظیم انجام می‌شود. در انتها ارتفاع دو باریکه نور با همان ارتفاع مرجع در صفحه نگه‌دارنده قطعه آزمون، تنظیم می‌شوند.

پ- تنظیم زاویه

توصیه می‌شود که تنظیم زاویه بازتاب آینه و نیم‌آینه، همچنین زاویه تابش با صفحه نگه‌دارنده قطعه آزمون، همزمان با قسمت ب در بالا، به ترتیب زیر انجام شود.

۱- هنگامی‌که باریکه نور لیزر وارد آینه‌ها می‌شود، قبل از آینه‌ها پایه ارتفاع مرجع باید قرار داشته باشد و مرکز خط ضربدر با مرکز باریکه نور هم تراز شود. با ورود باریکه نور به آینه، آینه طوری چرخانده و تنظیم می‌شود تا باریکه نور بازتاب شده به موقعیت اصلی برگردد، در این حالت مرکز باریکه نور بازتاب شده با مرکز خط ضربدر هم تراز است. این یک مرجع برای تنظیم زاویه خواهد بود.

۲- نقش نیم‌آینه در شکل ۱ عبور شار نوری از آینه ۱ به طرف آینه ۲ است، در حالی‌که این شار به طرف آینه ۳ نیز بازتاب می‌کند. برای تنظیم زاویه نیم‌آینه، پایه با ارتفاع مرجع برای تنظیم مجدد باریکه نور، بین آینه ۱ و نیم‌آینه قرار داده می‌شود و سپس نیم‌آینه $^{\circ}$ ۴۵ چرخانده می‌شود. تنظیم سایر آینه‌ها نیز به همین صورت انجام می‌شود.

۳- توصیه می‌شود برای تنظیم و اندازه‌گیری زاویه تابش باریکه نور نسبت به سطح نگه‌دارنده قطعه آزمون، به ترتیب زیر عمل شود.

یک صفحه شیشه‌ای با اندازه‌ای برابر با قطعه آزمون، در برابر نگه‌دارنده قرار داده می‌شود و پایه با ارتفاع مرجع بین نگه‌دارنده قطعه آزمون و آینه ۲ و بین نگه‌دارنده قطعه آزمون و آینه ۳ قرار می‌گیرد. مرکز خط ضربدر با مرکز باریکه نور هم تراز می‌شود.

در ابتدا برای تنظیم موقعیت نگهدارنده، نگهدارنده به جلو و عقب حرکت داده می‌شود، طوری‌که دو دسته باریکه نور در سطح صفحه شیشه‌ای قرار داده شده بر روی نگه‌دارنده هم تراز می‌شود. سپس نگه‌دارنده برای تنظیم زاویه صفر، چرخانده می‌شود تا اجازه دهد باریکه نور از آینه ۲ توسط صفحه شیشه‌ای بازتاب یافته و به موقعیت اصلی بازگردد. علاوه بر این، نگه‌دارنده چرخانده می‌شود به‌طوری‌که این باریکه نور بازتاب شده با خط ضربدر قرار گرفته بین نگه‌دارنده قطعه آزمون و آینه ۳ هم تراز شود. این زاویه چرخش با زاویه θ_1 نشان داده شده در شکل ۱ الف، مطابقت دارد.

ت- تنظیم عدسی‌موازی‌ساز

مهم است که هنگام تنظیم عدسی موازی‌ساز، اجازه دهیم باریکه نور لیزر از میان مرکز (محور اپتیکی) عدسی موازی‌ساز عبور کند، و نیز اطمینان حاصل شود که باریکه نور به صورت عمود به سطح عدسی در مرکز این عدسی موازی‌ساز وارد می‌شود،

۱- بررسی این‌که اگر باریکه نور از میان مرکز عبور می‌کند به ترتیب زیر انجام می‌شود:

پایه با ارتفاع مرجع در نقطه‌ای با فاصله ای معادل با فاصله کانونی از موقعیت عدسی موازی‌ساز جلو آینه ۱ قرار گرفته و مرکز خط ضربدر با مرکز باریکه نور هم تراز می‌شود.

۲- عدسی موازی‌ساز در مکان معین شده قرار گرفته و برحسب ارتفاع و جابجایی عرضی تنظیم می‌شود تا نقطه (لکه) باریکه نور همگرا شده توسط عدسی موازی‌ساز با مرکز خط ضربدر منطبق شود.

۳- بررسی این‌که اگر باریکه نور به طور عمودی به سطح عدسی وارد می‌شود به ترتیب زیر انجام می‌شود.

پایه با ارتفاع مرجع در نقطه فاصله کانونی عدسی موازی‌ساز جلو لیزر قرار گرفته و مرکز عدسی‌ها با مرکز ضربدر تراز می‌شود. سپس اجازه دهیم برای بخش مرکزی باریکه نور بازتاب شده در مرکز عدسی موازی‌ساز با مرکز خط ضربدر هم تراز شود، جهت عدسی موازی‌ساز با تنظیم یا کج کردن آن‌ها تنظیم می‌شود.

ث- تنظیم شیئ و روزنه

توصیه می‌شود یک دستگاه[1] (یک یونیت فیلتر فضایی) برای ترکیب شیئ و روزنه در دسترس بوده و مورد استفاده قرار گیرد. این دستگاه را طوری قرار دهید که موقعیت روزنه در ابتدا جلوی فاصله نقطه کانونی[2] عدسی موازی‌ساز واقع شود. برای هم ترازی باریکه نور با محور اپتیکی شیئ، روزنه را بردارید. در حالی‌که تشکیل موج کروی مطلوب تولید شده مورد تأیید قرار گرفته، تنظیمات طوری انجام می‌شود که مرکز موج کروی با مرکز عدسی موازی‌ساز یکی شود. سپس روزنه را سر جایش قرار داده و با کمی حرکت به جلو /عقب و بالا /پایین آن را طوری تنظیم کنید که نور همگرا شده توسط شیئ به طور کامل از روزنه عبور کند.

ج- تأیید نسبت تابیدگی بین امواج مرجع و امواج شیئ

تابیدگی برای امواج شیئ و امواج مرجع به طور جداگانه با استفاده از آشکارساز اندازه‌گیری می‌شود و برابر بودن این تابیدگی‌های اندازه‌گیری شده تأیید می‌شوند. در غیر این صورت دوباره مراحل الف تا انتهای مرحله ث باید تکرار شوند.

در این زیربند یک رویه برای چیدمان سامانه اپتیکی ثبت تمام‌نگار توسط نصب قطعات اپتیکی معمولی بر روی یک میز اپتیکی بدون ارتعاش، به عنوان یک مثال ارائه شده است. هرچند سامانه اپتیکی دیگر نیز، در صورتی‌که سامانه اپتیکی ثبت تمام‌نگار بتواند تنظیم کامل و درست سامانه ثبت را از طریق تداخل متقابل دو دسته باریکه امواج تخت پایدار تضمین کند، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

چ- تأیید پایداری سامانه اپتیکی

تداخل‌سنج ماخزندر[3] با سامانه اپتیکی ساخته شده است و پایداری سامانه اپتیکی مورد تأیید قرار می‌گیرد. به ویژه یک نیم‌آینه (۲) به جای نگه‌دارنده قطعه آزمون در شکل ۱ ب- قرار گرفته است. نور از آینه ۲ توسط نیم‌آینه ۲ بازتاب یافته و نور از آینه ۳ توسط نیم‌آینه ۳ عبور داده می‌شود و بر روی یک صفحه با هم ادغام می‌شوند و نوارهای تداخلی بر روی صفحه مشاهده می‌شوند. اگر حرکت نوارهای تداخلی در طی دوره زمانی در نظر گرفته شده برای نوردهی بقدر کافی کوچک باشد، سامانه اپتیکی پایدار فرض می‌شود. اگر سامانه اپتیکی پایدار نباشد، تباین نوارهای تداخل ثبت شده در ماده ثبات پایین آمده و در نتیجه بازده پراش تمام‌نگار بدتر می‌شود. این روش برای تأیید پایداری سامانه اپتیکی توصیه می‌شود.

1 - Unit
2- Primary forward focal distance
3 - Mach-zender interfermometer

پیوست ب

(آگاهی دهنده)

رویه ثبت تمام‌نگار

ب-۱ رویه ثبت تمام‌نگار

الف- برای نوردهی، ماده ثبات نسبت به سامانه اپتیکی شکل ۱، که در یک اتاق تاریک نصب شده است، باید به صورت ثابت قرار گیرد.

ب- در طی نوردهی، یا سیستم روشنایی اتاق تاریک باید به طور کامل خاموش شود یا از یک نور با طول موجی استفاده شود که ماده ثبات به آن حساس نباشد.

پ- تابیدگی بر سطح ماده ثبات، زمان نوردهی و غیره، باید ثبت شوند.

ت- با ثبت چندین تمام‌نگار درحالی‌که نوردهی تغییر می‌کند، مشخصه‌های نوردهی مواد ثبات تمام‌نگار می‌توانند طبق زیربندهای ۶-۵ و ۶-۶ اندازه‌گیری شوند.

ث-چون ممکن است قبل از نوردهی، درطی نوردهی و بعد از نوردهی، فرآوری مورد نیاز باشد، بسته به ماده ثبات، این فرآوری باید مطابق با دستورالعمل‌های مرتبط با چنین موادی پیاده‌سازی شود.

بهتر است یادآوری شود که هیچ ارتعاشی در طی نوردهی در سامانه ثبت تمام‌نگار رخ ندهد. به همین دلیل باید مراقبت شود تا چنین ارتعاشی به خاطر عملکرد باز/ بسته شدن دهانه دیافراگم، صدا، جریان هوا، تغییر دما و غیره رخ ندهد.

پیوست پ

(آگاهی دهنده)

ارتباط بین تمام‌نگار و نوارهای تداخلی ناشی از تداخل دو دسته باریکه نور

پ-۱ تمام‌نگار عبوری

همان‌طور که در شکل ۱ الف نشان داده شده است، تمام‌نگار ثبت شده توسط ورود دو دسته باریکه نور در θ_1 و θ_2 نسبت به خط عمود بر سطح ماده ثبات، و از طریق ورود آن‌ها از همان سمت به داخل ماده ثبات، به‌طور کلی یک تمام‌نگار عبوری است. فاصله نوارهای تداخلی "d" بر روی سطح ماده ثبات که ثبت آن‌ها بوسیله این سامانه اپتیکی انجام می‌شود را می‌توان با فرمول (پ-۱) به دست آورد:

$$d = \frac{\lambda}{(\sin\theta_1 - \sin\theta_2)} \qquad (پ-۱)$$

که درآن

d فاصله نوارهای تداخل است. (µm)

در حالت تمام‌نگار حجمی، بهتر است فاصله نوارهای تداخل "a" در تمام‌نگار با در نظر گرفتن ضریب شکست تمام‌نگار، تعیین شود. در این حالت "a" از فرمول(پ-۲) به دست می آید:

$$\mathrm{a} = \frac{\lambda_\mathrm{P}}{2\sin\left(\frac{\theta_1' - \theta_2'}{2}\right)} \qquad (پ-۲)$$

$$\lambda_\mathrm{P} = \frac{\lambda}{\overline{n}}$$

که در آن:

λ_p طول موج درماده است (µm)؛

θ_1' زاویه تابش موج حاصل از شیئ در ماده است (رادیان)؛

θ_2' زاویه تابش موج مرجع در ماده است (رادیان)؛

$\overline{n}$ میانگین ضریب شکست ماده است.

از طرف دیگر رابطه زیر توسط قانون اسنل ارائه می‌شود:

$$\sin\theta_1' = \sin\theta_1 / n$$

$$\sin\theta_2' = \sin\theta_2 / n$$

فرض کنید که دو دسته باریکه نور به صورت متقارن نسبت به خط عمود وارد می‌شود، به این صورت که، فرض می‌شود دو دسته باریکه نور با زاویه $\theta_1 = \theta$ و $\theta_2 = 2\pi - \theta$ وارد می‌شود. در این حالت فرمول(پ-۱) می‌تواند به شکل فرمول (پ-۳) دوباره نویسی شود:

$$d = \lambda / (2 \cdot \sin\theta) \qquad (پ-۳)$$

در این حالت نوارهای تداخلی، نوارهای نازکی در راستای عمود نسبت به سطح ماده هستند. هنگامی‌که فرمول (پ-۳) بر حسب فرکانس فضاییν ارائه می‌شود، فرمول(پ-۴) حاصل می‌شود:

$$\nu = 2 \cdot \sin\theta / \lambda \qquad (پ-۴)$$

برای اندازه‌گیری مشخصه‌های نوردهی تمام‌نگار عبوری، توصیه می‌شود که ثبت را در حالتی انجام دهید که دو دسته باریکه نور نسبت به خط عمود به صورت متقارن وارد شوند، به این صورت که بگذارید زاویه ورود آن‌ها $\theta_1 = \theta$ و $\theta_2 = 2\pi - \theta$ باشد. این کار برای حذف اثرات ایجاد شده توسط انبساط و انقباض مواد ثبات است. با این حال هنگامی‌که قرار است نور در محیط واقعی استفاده شود، یا هنگامی‌که قرار است ارزیابی‌های مرتبط با ویژگی‌های انبساط و انقباض ماده ثبات انجام شود، نیازی نیست زاویه تابش متقارن باشد.

پ-۲ تمام‌نگار بازتابی حجمی

اگر نگه‌دارنده قطعه آزمون شکل ۱ الف- 0° در جهت خلاف عقربه‌های ساعت به اندازه ۹۰ درجه بچرخد، چیدمان اپتیکی شکل ۱ الف- تبدیل به شکل ۱ ب- می‌شود. تمام‌نگار ثبت شده‌ای که اجازه می‌دهد دو دسته باریکه نور از هردو طرف پشت و جلوی ماده ثبات، وارد شود یک تمام‌نگار بازتابی حجمی نامیده می‌شود. نوارهای تداخلی که از این طریق ثبت می‌شوند، نسبت به سطح ماده به صورت تقریباً موازی (یا کاملاً موازی، بسته به شرایط) تشکیل می‌شوند.

فاصله بین نوارهای تداخل که بر روی تمام‌نگار ضریب شکست حجمی ثبت می‌شوند، مطابق با روش اجرایی زیر تعیین می‌شود.

دو دسته باریکه نور همان‌طور که در شکل پ-۱ نشان داده شده است، وارد می‌شود؛ یعنی، موج مرجع با زاویه θ_1 طرف جلو در حالی‌که موج حاصل از شیئ با زاویه θ_2 از پشت وارد می‌شود. این امواج به ترتیب با زاویه های θ_1' و θ_2 به داخل ماده وارد می‌شوند.

مشابه حالت فرمول(پ-۱)، فاصله نوارهای تداخل (d) برابر با کوتاه‌ترین فاصله بین نوارهای همجوار است و می‌تواند به صورت فرمول (پ-۵) ارائه شود:

$$d = \lambda / \left|\sin\theta_1 - \sin\theta_2\right| = \lambda_P / \left|\sin\theta_1' - \sin\theta_2'\right| \qquad \text{(پ-۵)}$$

$$\lambda_P = \frac{\lambda}{\overline{n}}$$

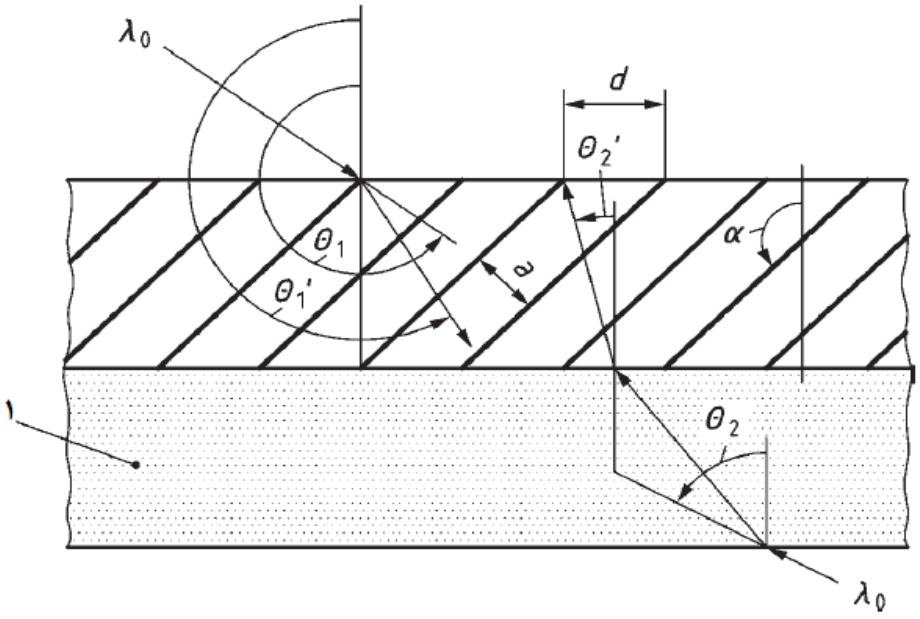
که درآن :

λ_{p_1} طول موج درماده است؛

θ_1' زاویه تابش موج حاصل از شیئ در ماده است (رادیان)؛

θ_2' زاویه تایش موج مرجع در ماده است (رادیان)؛

$\overline{n}$ میانگین ضریب شکست ماده است.



راهنما:

۱ زیرلایه

شکل پ-۱-تشکیل نوارهای تداخل در طی ثبت تمام‌نگار بازتابی حجمی

زاویه شیب نوارهای تداخل که قرار است ثبت شوند توسط رابطه $\alpha = (\theta_1' + \theta_2')/2$ به دست می‌آید، و فاصله نوارهای تداخل (a) را می‌توان توسط فرمول(پ-۶) محاسبه کرد:

$$a = \frac{d}{|\cos\alpha|} = \frac{\lambda_P}{\left|2\sin\left(\frac{\theta_1' - \theta_2'}{2}\right)\right|} \qquad (پ-۶)$$

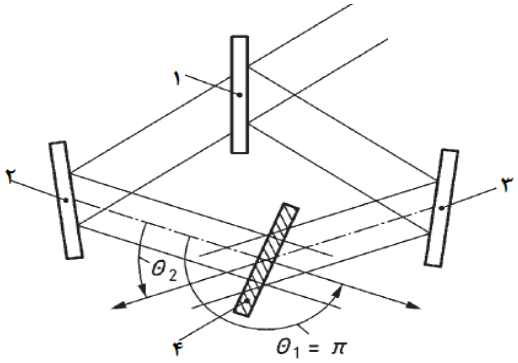
مشابه با فرمول (پ-۴)، این رابطه را می‌توان بر حسب فرکانس فضایی ν به شکل فرمول (پ-۷) ارائه کرد:

$$\nu = \frac{\left|2\sin\left(\frac{\theta_1' - \theta_2'}{2}\right)\right|}{\lambda_P} \qquad (پ-۷)$$

توجه شود که فرکانس فضایی (ν_{air}) در هوا ($n = ۱/۰$) در موقعیت ماده ثبات را می‌توان توسط فرمول (پ-۸) به دست آورد:

$$\nu_{air} = \frac{\left|2\sin\left(\frac{\theta_1' - \theta_2'}{2}\right)\right|}{\lambda} \qquad (پ-۸)$$

برای اندازه گیری مشخصه های تمام‌نگار بازتابی توصیه می‌شود که برای ثبت، یکی از دو دسته باریکه نور به صورت عمود بر سطح ماده ثبات وارد شود تا بتوان نور بازتابی منظم و نور پراشیده بر روی سطح ماده جدا نمود. در این حالت همان‌طور که در شکل پ-۲ نشان داده شده، باریکه نور (موج مرجع) از آینه M_2 به طور عمود ($\theta_1 = \pi$) وارد می‌شود در حالی‌که باریکه نور (موج حاصل از شیئ یا هدف) از M_3 می‌تواند با زاویه دلخواه θ_2 وارد شود.



راهنما:

۱	نیم‌آینه	۳	آینه ۳
۲	آینه ۲	۴	ماده ثبات تمام‌نگار

شکل پ-۲ چیدمان اپتکی ثبت تمام‌نگار بازتابی حجمی

پ-۳ ارتباط بین فرکانس فضایی و زاویه تابش نوارهای تداخلی تمام‌نگار بر پایه تداخل دو دسته باریکه نور

برای طول موج لیزر که به طور معمول برای ثبت تمام‌نگار مورد استفاده قرار می‌گیرد، زاویه تابش، θ، که فرکانس فضایی نوعی در هوا را ارائه می‌دهد، در جدول پ-۱ و پ-۲ نشان داده شده‌اند. ($\theta_1 = \theta$ و $\theta_2 = 2\pi - \theta$ برای نوع عبوری و $\theta_1 = \pi$ و $\theta_2 = \theta$ برای تمام‌نگار بازتابی).

جدول پ-۱ ارتباط بین فرکانس فضایی (ν) نوارهای تداخلی و زاویه تابش (θ) (برای تمام‌نگار عبوری)

	طول موج (µm)	فرکانس فضایی (lines/mm)			
		500	1 000	2 000	3 000
لیزر نیمه هادی	0,405	0,101 (rad) [5,81(deg)]	0,204 (11,68)	0,417 (23,89)	0,653 (37,41)
لیزر He-Cd	0,4416	0,111 (6,34)	0,223 (12,76)	0,457 (26,21)	0,724 (41,48)
لیزر DPSS	0,473	0,119 (6,79)	0,239 (13,68)	0,493 (28,23)	0,789 (45,19)
لیزر یون Ar	0,488	0,122 (7,01)	0,246 (14,12)	0,510 (29,21)	0,821 (47,05)
لیزر یون Ar	0,5145	0,129 (7,39)	0,260 (14,91)	0,540 (30,96)	0,882 (50,51)
لیزر DPSS	0,532	0,133 (7,64)	0,269 (15,43)	0,561 (32,14)	0,924 (52,94)
لیزر He-Ne	0,6328	0,159 (9,10)	0,322 (18,45)	0,685 (39,26)	1,25 (71,66)
لیزر یون Kr	0,6471	0,162 (9,31)	0,329 (18,88)	0,704 (40,32)	1,33 (76,08)

جدول پ-۲ ارتباط بین فرکانس فضایی (ν) نوارهای تداخل، و زاویه تابش (برای تمام‌نگار بازتابی)

	طول موج (µm)	فرکانس فضایی (lines/mm)	
		3 000	4 000
لیزر نیمه هادی	0,405	— —	1,25 (71,62)
لیزر He-Cd	0,4416	— —	0,976 (55,92)
لیزر DPSS	0,473	— —	0,660 (37,82)
لیزر یون Ar	0,488	1,50 (rad) [85,94(deg)]	0,439 (25,15)
لیزر یون Ar	0,5145	1,38 (79,07)	— (—)
لیزر DPSS	0,532	1,29 (73,91)	— (—)
لیزر He-Ne	0,6328	0,640 (36,67)	— (—)
لیزر یون Kr	0,6471	0,486 (27,85)	— (—)