INSO
19388-2
1st. Edition
2015

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

استاندارد ملی ایران
۱۹۳۸۸-۲
چاپ اول
۱۳۹۳

اپتیک و فوتونیک – آرایه‌های ریزعدسی
قسمت۲:
بیراهی‌های جبهه موج-
روش‌های آزمون

Optics and photonics – Microlens arrays -
Part 2:
wavefront aberrations-
Test methods

ICS: 31.260

به‌نام خدا

آشنایی با سازمان استاندارد ملی ایران

مؤسسهٔ استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به موجب بند یک مادهٔ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسهٔ 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.

نام موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به موجب یکصد و پنجاه و دومین جلسه شورای عالی اداری مورخ ۹۰/۶/۲۹ به سازمان ملی استاندارد ایران تغییر و طی نامه ۲۰۶/۳۵۸۳۸ مورخ ۹۰/۷/۲۴ جهت اجرا ابلاغ شده است.

تدوین استاندارد در حوزه های مختلف در کمیسیون های فنی مرکب از کارشناسان سازمان صاحب نظران مراکز و مؤسسات علمی، پژوهشی، تولیدی و اقتصادی آگاه و مرتبط انجام می شود وکوششی 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 وارد کنندگان، مراکز علمی و تخصصی، نهادها، سازمان های دولتی و غیر دولتی حاصل می شود .پیش نویس استانداردهای ملی ایران برای نظرخواهی به مراجع ذی نفع و اعضای کمیسیون های فنی 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 می شود.

پیش نویس استانداردهایی که مؤسسات و سازمان های علاقه مند و ذی صلاح نیز با رعایت ضوابط تعیین شده تهیه می کنند درکمیتهٔ ملی طرح و بررسی و درصورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی ایران چاپ و منتشر می شود .بدین ترتیب، استانداردهایی ملی تلقی می شود که بر اساس مفاد نوشته شده در استاندارد ملی ایران شمارهٔ ۵ تدوین و در کمیتهٔ ملی استاندارد مربوط که مؤسسه استاندارد تشکیل می‌دهد به تصویب رسیده باشد.

مؤسسهٔ استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران از اعضای اصلی سازمان بین المللی استاندارد (ISO)[1] کمیسیون بین المللی الکتروتکنیک (IEC)[2] و سازمان بین المللی اندازه شناسی قانونی (OIML)[3] است و به عنوان تنها رابط[4] کمیسیون کدکس غذایی (CAC)[5] در کشور فعالیت می کند. در تدوین استانداردهای ملی ایران ضمن توجه به شرایط کلی و نیازمندی های خاص کشور، از آخرین پیشرفتهای علمی، فنی و صنعتی جهان و استانداردهای بینالمللی بهره‌گیری می‌شود.

سازمان استاندارد ملی ایران می تواند با رعایت موازین پیش بینی شده در قانون، برای حمایت از مصرف کنندگان، حفظ سلامت و ایمنی فردی و عمومی، حصول اطمینان از کیفیت محصولات و ملاحظات زیست محیطی و اقتصادی، اجرای بعضی از استانداردهای ملی ایران را برای محصولات تولیدی داخل کشو ر و / یا اقلام وارداتی، با تصویب شورای عالی استاندارد، اجباری نماید. سازمان می تواند به منظور حفظ بازارهای بین المللی برای محصولات کشور، اجرای استاندارد کالاهای صادراتی و درجه‌بندی آن را اجباری نماید. همچنین برای اطمینان بخشیدن به استفاده کنندگان از خدمات سا زمانها و مؤسسات فعال در زمینهٔ مشاوره، آموزش، بازرسی، ممیزی و صدورگواهی سامانه های مدیریت کیفیت و مدیریت زیست‌محیطی، آزمایشگاه ها و مراکز کالیبراسیون (واسنجی) وسایل سنجش ، مؤسسهٔ استاندارد این گونه سازمان ها و مؤسسات را بر اساس ضوابط نظام تأیید صلاحیت ایران ارزیابی می کند و در صورت احراز شرایط لازم، گواهینامهٔ تأیید صلاحیت به آن ها اعطا و بر عملکرد آنها نظارت می کند .ترویج دستگاه بین المللی یکاها، کالیبراسیون (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 Electro technical Commission
3- International Organization for Legal Metrology (Organization International de Metrology Legal)
4 - Contact point
5 - Codex Alimentarius Commission

کمیسیون فنی تدوین استاندارد

«اپتیک و فوتونیک – آرایه‌های ریزعدسی
قسمت ۲- روش‌های آزمون بیراهی‌های جبهه موج»

رئیس:	**سمت و/ یا نمایندگی**
رحمنی، سعید (کارشناس ارشد اپتومتری)	هیئت علمی دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی
دبیر:	
توکلی گلپایگانی، علی (دکترای مهندسی پزشکی)	هیئت علمی پژوهشگاه استاندارد
اعضاء: (اسامی به ترتیب حروف الفبا)	
پرند، فرشته آزادی (دکترای مهندسی کامپیوتر)	هیئت علمی دانشگاه علامه طباطبایی
حسنی، کامران (دکترای مهندسی پزشکی)	هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی - واحد علوم و تحقیقات
شرع پسند، مهدی (کارشناس ارشد الکترونیک)	هیئت علمی پژوهشگاه استاندارد
عجمی، عاطفه (کارشناس ارشد فیزیک)	مدیر آزمایشگاه اپتیک جهاد دانشگاهی دانشگاه شریف
قلی پور، مسعود (کارشناس حقوق)	بازرس اتحادیه عینک سازان
مجدآبادی، عباس (دکترای فیزیک لیزر)	هیئت علمی پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای
محمدی لیواری، احد (کارشناس ارشد فیزیک)	معاون مرکز اندازه شناسی، اوزان و مقیاسها

موحدی، محمد مهدی (کارشناس ارشد مهندسی پزشکی)	هیئت علمی دانشگاه علوم پزشکی شیراز
میرزایی کجائی، مریم (دکترای فیزیک)	هیئت علمی پژوهشگاه استاندارد
نخعی، کوروش (دکترای مهندسی پزشکی)	هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی - واحد اسلامشهر
نوری، سعیدرضا (کارشناس مهندسی نرم‌افزار)	شرکت پرشیا آزما سامانه

پیش‌گفتار

استاندارد « اپتیک و فوتونیک – آرایه‌های ریزعدسی - قسمت ۲: بیراهی‌های جبهه موج - روش‌های آزمون » که پیش نویس آن در کمیسیون های مربوط توسط سازمان ملی استاندارد ایران تهیه و تدوین شده و در چهار صد و شصت و هشتمین اجلاسیه کمیته ملی استاندارد مهندسی پزشکی مورخ ۹۳/۱۰/۸ مورد تائید قرار گرفته است، اینک به استناد بند یک مادهٔ ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسهٔ استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱، به عنوان استاندارد ملی ایران منتشر می‌شود.

برای حفظ همگامی و هماهنگی با تحولات و پیشرفتهای ملی و جهانی در زمینه صنایع، علوم و خدمات، استاندارد های ملی ایران در مواقع لزوم تجدید نظر خواهد شد و هرگونه پیشنهادی که برای اصلاح یا تکمیل این استاندارد ها ارائه شود، در هنگام تجدید نظر در کمیسیون فنی مربوط مورد توجه قرار خواهد گرفت. بنابر این برای مراجعه به استاندارد های ملی ایران باید همواره از آخرین تجدید نظر آنها استفاده کرد.

در تهیه و تدوین این استاندارد سعی شده است که ضمن توجه به شرایط موجود و نیازهای جامعه، در حد امکان بین این استاندارد و استاندارد های بین المللی و استاندارد های ملی کشورهای صنعتی و پیشرفته هماهنگی ایجاد شود.

منبع و مأخذی که برای تهیه این استاندارد به کار رفته به شرح زیر است:

ISO 14880-2:2006; Optics and photonics -- Microlens arrays -- Part 2: Test methods for wavefront aberrations

فهرست مندرجات

عنوان **صفحه**

آشنایی با سازمان ملی استاندارد ب
کمیسیون فنی تدوین استاندارد ج
پیش گفتار و
مقدمه ز
۱ هدف و دامنه کاربرد ۱
۲ مراجع الزامی ۱
۳ اصطلاحات و تعاریف ۲
۴ نشانه‌ها و علائم اختصاری ۴
۵ وسایل ۵
۵-۱ کلیات ۵
۵-۲ منبع انتشار نور استاندارد ۵
۵-۳ عدسی‌های استاندارد ۶
۵-۴ موازی‌ساز ۶
۵ – ۵ سامانه کاهش‌دهنده پرتو ۶
۵-۶ مسدودکننده دریچه ۶
۶ اصول آزمون ۷
۷ چیدمان اندازه‌گیری ۷
۷-۱چیدمان اندازه‌گیری برای ریزعدسی‌های تکی ۷
۷-۲ چیدمان اندازه‌گیری برای آرایه‌های ریزعدسی ۸
۷-۳ تنظیم هندسی نمونه ۸
۷-۴ آماده‌سازی ۸
۸ روش های اجرایی ۹
۹ ارزیابی ۹
۱۰ درستی ۹
۱۱ گزارش آزمون ۹
پیوست الف الزامات اندازه‌گیری برای آزمون ریزعدسی‌ها
پیوست ب روش‌های آزمون ۱ و ۲ با استفاده از سامانه های تداخل‌سنج ماخ - زندر
پیوست پ روش‌های آزمون ۳ و ۴ ریزعدسی با استفاده از یک سامانه تداخل‌سنجی برشی عرضی

پیوست ت روش آزمون ۵ ریزعدسی با استفاده از سامانه حسگر شاک - هارتمن
پیوست ث روش آزمون یک آرایه ریزعدسی با استفاده از سامانه تداخل‌سنجی تایمن - گرین
پیوست ج اندازه‌گیری یکنواختی آرایه ریزعدسی که با روش آزمون ۲ تعیین شده‌اند.

مقدمه

این استاندارد روش‌های آزمون بیراهی‌های جبهه موج برای آرایه‌های ریزعدسی را بیان می‌کند. مثال‌های مربوط به کاربردهای آرایه‌های ریزعدسی شامل نمایشگرهای سه‌بعدی، جفت‌کننده‌های اپتیکی آرایه‌ای واسط بین منبع نور و دریافت‌کننده‌های نوری، نمایشگرهای نوری از نوع کریستال‌های مایع و اجزاء پردازشگر موازی نور می‌باشند.

از جمله نیازهای بازار اقتصادی آرایه‌های ریزعدسی ایجاد و تدوین روش‌های آزمون و یک استاندارد واژگان فنی جامع و کامل در این حوزه می‌باشد. لزوم ارائه این استاندارد جامع نه تنها باعث ارتقاء عملکردی در این حوزه تخصصی می‌گردد بلکه بستری برای تبادل اطلاعات فنی بین دانشمندان و مهندسان فعال در این حوزه و ایجاد نوآوری‌های دیگر بر پایه یک فهم مشترک را بوجود می‌آورد.

ریزعدسی‌ها به صورت تکی و یا در آرایه‌هایی مشتمل بر حداقل دو عدسی استفاده می‌شوند. ویژگی و خصوصیت عدسی‌ها اصولا براساس ویژگی تک تک عدسی‌ها بیان می‌شود. لذا، این مطلب مهم است که ابتدا خصوصیات پایه‌ای هر یک از عدسی‌ها ارزیابی گردد. امّا اگر تعدادی از عدسی‌ها بریک زیرلایه مشترک قرار گرفته باشند، اندازه‌گیری تمام آرایه‌ها مستلزم صرف زمان و هزینه زیاد است. علاوه بر آن روش‌های اندازه‌گیری شکل عدسی‌ها یک پارامتر ضروری در فرآیند تولید است.

این استاندارد روش‌های اندازه‌گیری کیفیت جبهه موج را مشخص می‌کند. کیفیت جبهه موج از مشخصات اصلی عملکردی یک ریزعدسی است. مشخصات دیگر به غیر از بیراهی‌های جبهه موج در استانداردهای ملی ایران شماره ۳-۱۹۳۸۸ و ۴-۱۹۳۸۸ ارائه شده است.

اپتیک و فوتونیک – آرایه‌های ریزعدسی-

قسمت ۲: بیراهی‌های جبهه موج - روش‌های آزمون

۱ هدف و دامنه کاربرد

هدف از تدوین این استاندارد، تعیین روش‌های آزمون بیراهی‌های جبهه موج برای ریزعدسی‌ها در آرایه‌های ریزعدسی است.

این استاندارد در مورد آرایه‌های ریزعدسی با عدسی‌های خیلی کوچک که درون یا روی یک یا چند سطح از یک زیرلایه مشترک قرار گرفته‌اند کاربرد دارد.

۲ مراجع الزامی

مدارک الزامی زیر حاوی مقرراتی است که در متن این استاندارد ملی ایران به آنها ارجاع داده شده است. بدین ترتیب آن مقررات، جزئی از این استاندارد ملی محسوب می شود.

در صورتی که به مدرکی با ذکر تاریخ انتشار ارجاع داده شده باشد، اصلاحیه ها و تجدیدنظرهای بعدی آن موردنظر این استاندارد ملی نیست. در مورد مدارکی که بدون ذکر تاریخ انتشار به آنها ارجاع داده شده است، همواره آخرین تجدیدنظر و اصلاحیه‌های بعدی آنها موردنظر است.

استفاده از مرجع زیر برای این استاندارد الزامی است:

2-1 ISO 14880-1:2001, Optics and photonics -- Microlens arrays -- Part 1: Vocabulary

۳ اصطلاحات و تعاریف

در این استاندارد، اصطلاحات و تعاریف تعیین شده در استاندارد ISO 14880-1 بکار می‌رود.

۴ نمادها و علائم اختصاری

جدول ۱- نمادها، علائم اختصاری و یکاهای اندازه‌گیری

علامت	واحد	تعریف
φ	λ	انحراف جبهه موج
φ_{p-v}	λ	میزان قله تا دره[1] بیراهی جبهه موج
φ_{rms}	λ	جذر میانگین مربع[2] میزان بیراهی جبهه موج
λ	μm	طول موج
θ	درجه	زاویه پذیرش
NA	-	اندازه روزنه

۵ دستگاه

۵ -۱ کلیات

سامانه آزمون شامل یک منبع انتشار نور، یک عدسی موازی‌ساز، روشی برای محدودسازی روزنه اندازه‌گیری، یک وسیله ساده نگه‌دارنده، تصویربردار نوری، یک حسگر تصویر و یک سامانه تحلیل‌گر الگوی تداخل است.

۵-۲ منبع تابش نور استاندارد

لازم است تا منبع تابش نور به صورتی که برای آزمون بیراهی‌های جبهه موج ریزعدسی‌ها مناسب باشد به کار گرفته شود. بیراهی‌های جبهه موج در طول موج کاربردی دستگاه آزمون باید دارای بیراهی جذر میانگین مربع کوچکتر یا مساوی $\lambda/10$ اندازه روزنه موثر ریزعدسی‌های تحت آزمون داشته باشد.

خواصی از منبع که باید مشخص بوده و مدنظر قرار گیرند شامل: طول موج مرکزی، نیم پهنای طیف، نوع منبع تابش نور، وضعیت قطبش (تابش نور قطبش شده به صورت تصادفی، تابش نور قطبش شده به صورت خطی، تابش نور قطبش شده به صورت دایروی و غیره)، زاویه تابندگی (برحسب میلی‌رادیان)، اندازه روزنه یا

1 - Peak- to- Valley
2- Root-mean-square

پارامترهای مربوط به پهنای باریکه هستند. مشخصات منبع تابش باید در مستندات مربوط به نتایج آزمون بیان شوند.

یادآوری۱- معمولا لیزرهای گازی هلیوم - نئون[1] استفاده می‌شوند. سایر لیزرهای گازی، لیزرهای حالت جامد، لیزرهای نیمه رسانا[2] و دیودهای انتشار نور[3] نیز به کار می‌روند.

یادآوری۲- لیزرهای نیمه رسانا و دیودهای انتشار نور به همراه یکدیگر به همراه یک جبهه موج مناسب نوری به شکل یک سامانه جبرانی به کار می‌روند.

۵-۳ عدسی استاندارد

جایی که عدسی استاندارد به عنوان یک مرجع یا برای تولید یک موج کروی به کار می‌رود، بیراهی‌های جبهه موجی مربوط به عدسی استاندارد باید حداقل یک دهم مقدار عدسی‌های تحت آزمون بوده و یا این که متوسط میانگین بیراهی، کوچکتر یا مساوی $\lambda/_{10}$ داشته باشد.

عدسی شیئی یک میکروسکوپ نوری که به عنوان عدسی استاندارد استفاده می‌شود باید با اندازه روزنه موثر[4] مشخص شود. موارد زیر باید معلوم باشند:

- روزنه مؤثر
- فاصله کانونی مؤثر در طول موج کاربردی

هندسه آزمون برای اندازه‌گیری بیراهی‌های جبهه موج محدود به حالت $\infty/_{f}$ برای درهم آمیختگی توام عدسی‌ها می‌باشد.

۵-۴ موازی‌ساز

موازی‌ساز اپتیکی باید اندازه روزنه‌ای بزرگتر از بیشینه اندازه نمونه آزمون داشته باشد تا بتواند از اثرات مربوط به پراش نور جلوگیری کند. بیراهی‌های جبهه موج باید از مقدار $\lambda/_{20}$ جذر میانگین مربع انحراف در طول موج کاربردی کمتر باشد.

درغیر اینصورت ویژگی‌های استفاده شده باید در گزارش آزمون آورده شود.

۵-۵ سامانه اپتیکی کاهش‌دهنده باریکه

یک سامانه تلسکوپی شامل دو عدسی مثبت در چیدمان بدون‌کانونی به کار گرفته می‌شود تا بتواند سطح مقطع باریکه را با حدود آرایه آشکارساز تنظیم نماید. نسبت فواصل کانونی بیانگر فاکتور کاهش است.

یادآوری- جهت اجتناب از پدیده انکسار، توسط نرم‌افزار این امکان وجود دارد که قطر عدسی مورد ارزیابی برابر اندازه روزنه موثر تنظیم شود.

1- He – Ne
1- LD
3- LED
4 - Effective numerical aperture

۶-۵ مسدودکننده روزنه[1]

یک مسدودکننده فیزیکی در راستای باریکه تابش اپتیکی بوسیله دستگاه آزمون قرار می‌گیرد تا قطر باریکه تابیده شده بر عدسی تحت آزمون را محدود نماید. به طورجایگزین این فرایند می‌تواند توسط یک نرم‌افزار برش‌دهنده و مسدودکننده در طول ارزیابی انجام پذیرد.

۶ اصول آزمون

بیراهی‌های جبهه موج ریزعدسی تحت آزمون باید توسط تداخل‌سنج یا وسایل دیگر مربوط به آزمون جبهه موج که در پیوست‌ها به آنها اشاره شده است، تعیین شود. زمانی که از پرتوهای گوسی با قطر کوچک[2] استفاده می‌شود، باید به این مطلب توجه داشت که ویژگی‌های اپتیک هندسی بر انتشار چنین پرتوهایی کاربرد ندارد. سطح آشکارساز باید با مردمک ورودی یا خروجی ریزعدسی تحت آزمون متناظر باشد. یک روزنه برای تحلیل امواج و میزان بیراهی‌ها بکار گرفته می‌شود.

روش آزمون باید متناسب با کاربرد در نظر گرفته شود. کاربردهای تک عبوری نیاز به آزمون برپایه تداخل-سنج‌های تک عبوری[3] دارند.

یادآوری- تداخل‌سنج‌های پیشرفته از منابع لیزری برای آزمون تداخل‌سنجی استفاده می‌کنند ولی باید دقت داشت که این موضوع درصورتیکه از یک چیدمان دوطرفه عبوری[4] در تابش نور انعکاسی با بکارگیری تداخل‌سنج‌های فیزیو[5] و تایمن- گرین[6] گرین[6] استفاده شده باشد، می‌تواند مشکلات جدی را به همراه داشته باشد. در این شرایط تمامی مرزهای دی‌الکتریک بین عدسی‌ها سبب بروز الگوهای حاشیه‌ای و کاذب خواهند شد.

چیدمانهایی که از تابش اپتیکی انتقالی استفاده می‌کنند نسبت به تداخل‌سنجهای نوع بازتابشی از فرانژهای حاشیه‌ای[7] تاثیر کمتری می‌پذیرند. ترجیح بر این است که از چیدمان تداخل‌سنج‌های ماخ – زندر[8] یا تداخل‌سنجهای نوع برشی عرضی[9] و یا شاک – هارتمن[10] براساس تابشهای انتقالی استفاده شود. جهت اندازه‌گیری بیراهی‌های موج، یک هندسه یکبار عبور با تابش انتقالی به عنوان اولین انتخاب در این زمینه مدنظر خواهد بود.

1 - Aperture stop
2 - Small-diameter Gaussian beam
3- Single- pass
4 - Double-pass
5 - Fizeau
6 - Twyman-Green
7 - Spuriou fringes
8 - Mach-Zehnder
9- Lateral Shearing
10- Shack-Hartmann

۷ چیدمان اندازه‌گیری

۷–۱ چیدمان اندازه‌گیری برای ریزعدسی‌های تکی

آشکارسازهای جبهه موج و یا تداخل‌سنج‌ها برای اندازه‌گیری جبهه موج انتقالی از ریزعدسی تحت آزمون، مورد استفاده قرار می‌گیرند. تداخل‌سنج‌های تک عبوری مانند ماخ - زندر، تداخل‌سنج‌های از نوع برشی عرضی، تداخل‌سنج‌های دوطرفه عبوری مثل فیزیو، تایمن–گرین و آشکارسازهای تشخیصی شاک-هارتمن می‌توانند مطابق پیوست‌های ب تا ت جهت آزمون به کار گرفته شوند. الزامات اندازه‌گیری باید مشخص و تعیین شده باشند. به عنوان نمونه معیارهای نوعی برای انتخاب یک روش خاص عبارتند از:

- درستی مورد نیاز
- خواص و ویژگی‌هایی که لازم است اندازه‌گیری شوند
- انعطاف و آزادی عمل لازم در اندازه‌گیری
- هزینه‌های مربوطه
- آزمون نقطه‌ای برای یک عدسی یا اندازه‌گیری کامل برای آرایه

برای اطلاعات بیشتر به استاندارد ISO/TR 14999 –2 مراجعه شود.

۷–۲ چیدمان اندازه‌گیری برای آرایه های ریزعدسی

تداخل‌سنج‌ها یا تشخیص‌دهنده‌های جبهه موج برای اندازه‌گیری هم زمان تمام آرایه‌ها یا قسمتی از آنها در تابش‌های انتقالی به کار می‌روند. نمونه چیدمان موردنظر در پیوست ث و پیوست ج شرح داده شده است.

یادآوری- درحالیکه آزمون مربوطه برای یک عدسی منفرد، می‌تواند توسط تابش موج کروی تابشی روی آن صورت پذیرد، روش مذکور نمی‌تواند به طور عام برای آزمون آرایه‌ها استفاده شود. در این مورد، استفاده از یک تابش موج تخت یا جبهه موج آرایه پراشی پیشنهادی برای انجام آزمون مناسبتر است.

۷–۳ همراستایی هندسی نمونه[1]

ریزعدسی تحت آزمون و اجزاء اپتیکی مربوطه باید در شرایط هم‌محوری با سامانه و ابزار اندازه‌گیری جبهه موج قرار گیرند. برای انجام این هدف ابزار و یا وسایل تنظیم‌کننده خاصی به عنوان ترازکننده و هم راستاکننده اپتیکی، بصورت تجاری در بازار وجود دارد.

یادآوری- نمونه باید بر روی یک ابزار مناسب به عنوان مثال یک نگهدارنده خاص[2] قرار گیرد، به صورتیکه دو دو یا سه درجه آزادی جهت تنظیم نمونه برروی وسیله مذکور فراهم باشد.

۷–۴ آماده‌سازی

برای داشتن نتایج معنادار و قابل اطمینان، تجهیزات آزمون باید در محیط کنترل شده دمایی نگه داری شود و سامانه اندازه گیری نباید در معرض ارتعاش قرار گیرد.

1- Geometrical alignment of sample
2- Air – Chuck

سطوح اپتیکی تحت آزمون باید تمیز باشند. سطوح شیشه‌ای بدون پوشش مجاز هستند تا با استفاده از پارچهء پشمی و الکل تمیز شوند. پارچه کتانی پشمی در مقدار خیلی کم از حلال، قبل از تماس با سطح قرار گرفته و تنها یک بار بر روی سطح نوری کشیده شود و سپس دور انداخته شود. این عمل کمک می کند تا خطر خراش سطح حداقل شود. با استفاده از یک برس از جنس موی شتر یا از هوای فشرده تصفیه شده نیز می توان گرد و غبار را پاک کرد.

درخصوص سطوح اپتیکی پوشش‌دار[1] مانند سطوح ضدتابش[2] باید دقت زیادی مدنظر قرار گیرد و نباید تا زمانی که واقعاً لازم است آنها را تمیز کرد. برای برطرف نمودن گردوغبار، استفاده از هوای تصفیه شده فشرده توصیه می‌گردد. اطلاعات لازم در خصوص استفاده صحیح از حلال‌ها و مواد پاک‌کننده باید لحاظ شده و مدنظر قرار گیرند.

۸ روش اجرایی

الزامات اندازه‌گیری و نیز روش‌های معمول برای اندازه‌گیری بیراهی‌های جبهه موج عدسی‌های مجزا در پیوست‌های (الف) تا (ت) آورده شده است. مثال‌هایی برای اندازه‌گیری بیراهی‌های جبهه موج آرایه ریزعدسی در پیوست‌های (ث) و (ج) ارائه شده است.

۹ ارزیابی

بیراهی جبهه موج می‌تواند با استفاده از نمودارهای تداخل‌سنجی یا بکارگیری سایر سامانه‌های اندازه‌گیری جبهه موج که در پیوست‌های (الف) تا (ج) آورده شده است، مورد محاسبه قرار گیرد. از طریق بیراهی‌های جبهه موج عدسی‌های کروی با روزنه دایروی می‌توان ضرائب اولیه زرنیخ[3] را توسط یک نرم‌افزار بدست آورد.

یادآوری۱- به عنوان نمونه ضرائب نمونه زرنیخ عبارتنداز:

- بیراهی کروی[4]
- آستیگماتیسم[5]
- کما[6]

یادآوری۲- برای اشکال دیگر روزنه عدسی‌ها (مثل مستطیلی) به استاندارد ISO/TR 14999-2 مراجعه گردد.

بیراهی‌های جبهه موج اندازه‌گیری شده توسط پارامترهایی از قبیل روش قله تا دره[7] یا جذر میانگین مربع[8] مورد ارزیابی و بررسی قرار می‌گیرند.

1- Coated optical surfaces
2- Antireflection surfaces
3- Zernike
4- Spherical aberration
5- Astigmatism
6- Coma
7- Peak to valley
8- Root – mean – square

در بررسی و تفسیر مقادیر بدست آمده از روش قله تا دره باید دقت لازم صورت پذیرد زیرا این مقادیر ممکن است تحت تاثیر مقادیرکاذب قرار گیرند. توصیه می‌شود به جای این از شش برابر جذر میانگین مربع استفاده شود.

۱۰ درستی

در اندازه‌گیری و ثبت نتایج بیراهی‌های جبهه موج نمونه تحت آزمون توسط یک سامانه اندازه‌گیری، ممکن است برخی بیراهی‌ها توسط خود سامانه اندازه‌گیری ایجاد شده باشد. در این شرایط درستی اندازه‌گیری از طریق تفاضل بیراهی‌های ناشی از خود سامانه اندازه‌گیری، قابل اصلاح است.

۱۱ گزارش آزمون

نتایج آزمون باید ثبت شده و شامل اطلاعات کاربردی زیر باشد:

الف اطلاعات عمومی:

الف-۱ آزمون مطابق استاندارد ملی ایران شماره ....

الف-۲ تاریخ آزمون

الف-۳ نام و آدرس انجام دهنده آزمون

الف-۴ نام شخص آزمون کننده

ب اطلاعات مربوط به عدسی مورد آزمون:

ب-۱ نوع عدسی

ب-۲ سازنده

ب-۳ مدل سازنده

ب-۴ شماره سریال

پ شرایط آزمون (شرایط محیطی):

۱ دما

۲ رطوبت نسبی

ت اطلاعات در مورد نحوه انجام آزمون و ارزیابی:

ت-۱ روش آزمون به کار رفته

ت-۲ سامانه اپتیکی به کار گرفته شده

ت-۳ تابش:

ت-۳-۱ نوع منبع

ت-۳-۲ طول موج

ت-۳-۳ نیم پهنای طیف تابش اپتیکی

ت-۳-۴ وضعیت قطبش

ت-۳-۵ زاویه پرتوافکنی

ت-۳-۶ اندازه نقطه نورانی[1]

ت-۴ آشکارساز

ت-۵ روزنه

ث نتایج آزمون:

ث-۱ مقادیر قله تا دره بیراهی جبهه موج (φ_{p-v})

ث-۲ مقادیر جذر میانگین مربع بیراهی جبهه موج (φ_{rms})

ث-۳ ضرائب چند جمله‌ای زرنیخ یا ضرائب چند جمله‌ای دیگر

1- Spot Size

پیوست الف

(الزامی)

الزامات اندازه‌گیری برای روش‌های آزمون ریزعدسی‌ها

آزمون بیراهی‌های موج برای ریزعدسی‌ها باید برپایه تابش اپتیکی عبوری، با چیدمان یک بار عبور، توسط یک تداخل‌سنج مانند ماخ - زندر، تداخل‌سنج نوع برشی عرضی و یا یک حسگر جبهه موج شاک - هارتمن انجام گیرد. یک وسیله آزمون یک بار عبور برای ایجاد تصویر واضح روزنه عدسی روی آرایه حسگر و یا آشکارساز لازم است. ضمناً این وسیله جهت کنترل اغتشاشات شدید[1] انعکاسی در چیدمان دوبار عبور که توسط تداخل‌سنج فیزیو یا تایمن– گرین حادث می‌شود هم لازم است. در یک هندسه دوبار عبور، عدسی-های تحت آزمون دو تصویر ایجاد می‌کنند که غیرکانونی بودن یکی از آنها سبب ایجاد اثرات پراش در نواحی لبه عدسی در حال آزمون می‌شود. با استفاده از یک چیدمان یک‌بار عبور می‌توان از چنین اثراتی جلوگیری کرد. تمام انعکاس‌ها از سطوح عدسی در سامانه نوری کمکی در جهت رو به جلو قابل صرف‌نظر است، چرا که انعکاسات در سطوح پوشش‌دار ضدانعکاس حذف می‌شوند. به‌علاوه، بواسطه تصویر تیز و مشخص اندازه روزنه عدسی، هیچ شبهه و ابهامی در مورد مشخص نمودن بیراهی‌های موج وجود ندارد.

تجهیزات آزمون نباید خود تولیدکننده بیراهی باشند. در یک هندسه ماخ – زندر جایی که نمونه آزمون درون بازوی یک تداخل‌سنج قرار می‌گیرد و بازوی مرجع یک موج تخت ارسال می‌کند، عوامل ترکیب یا جداکننده پرتو تنها امواج تخت متقاطع را عبور می‌دهند. موج‌های کروی سبب ایجاد بیراهی‌های کروی یا بدتر از آن برای جداسازهای باریکه غیرمتقارن می‌شوند. الزامات مشابهی نیز در مورد حسگر شاک - هارتمن صادق است گرچه در این حالت از هیچگونه جداساز پرتویی استفاده نمی‌شود.

در تداخل‌سنج‌های از نوع برشی عرضی لازم است که در طراحی ابزار عرضی، نهایت سادگی و تقارن سامانه در نظر گرفته شود تا در حد ممکن از خطاهای بیشتر پرهیز شود. (به عنوان مثال یک تداخل‌سنج عرضی بر اساس توری‌های دو فازی در شرایط چیدمان سری)

از آنجاییکه قطر ریزعدسی‌ها در حدود بین ۱۰ میکرومتر و چند میلی‌متر می‌باشد، لازم است تا وسیله‌ای جهت تغییر بزرگنمایی، حداقل درحد صد برابر فراهم شود تا دهانه آرایه آشکارساز، تصویر را پوشش دهد. به طور نمونه یک ماتریس تصویربردار[2] با یک وضوح جانبی مناسب می‌تواند جبهه‌های موجی که به طور شدیدی تغییر شکل یافته‌اند را بدون نقض اصول جمع‌آوری داده و روشهای تئوری، تحت آزمون قرار دهند. بواسطه اندازه زیاد بزرگنمایی و نیز نیاز به یک تداخل‌سنج با موج تخت، یک میکروسکوپ تصویربردار باید در بازوی آزمون قرار گیرد تا حد بالای بزرگنمایی با توجه به فاصله کاری کم موجود برای میکروسکوپ موردنظر، حاصل شود. اگر قرار است که تصویر مورد نظر در بیرون بدنه تداخل‌سنج استفاده شود، طراحی‌های خاص لازم است تا نسبت‌های بزرگنمایی بالا را با توجه به فواصل کاری طولانی بدست دهد. دو راه‌حل

1- Stronge disturbances
2- CCD- Charge-Coupled Device

انتخابی با در نظرگرفتن جزئیات جهت نمایش تداخل‌سنج‌های ماخ - زندر، برای آزمون بیراهی‌های موج مورد بحث قرار خواهد گرفت. میکروسکوپ تصویربردار ترجیحا باید از نوع تلسکوپی باشد تا موج‌های تخت موجود در بازوی آزمون را درون ترکیب‌کننده پرتوها[1] نگه دارد.

تغییر بزرگنمایی نیازمند اندازه‌گیری‌های خاصی است تا نسبت شکاف بین دو بازوی تداخل‌سنج را تطبیق داده و کنتراست کافی در حاشیه‌های تداخل بدست آید. برای چنین هدفی، استفاده از یک واحد جداساز قطبش‌گر بهترین انتخاب است. واحد مذکور شامل یک جداساز قطبش‌گر به همراه دو صفحه ربع موج [2] که هر یک در یک بازوی تداخل‌سنج قرار دارند و یک صفحه نیم موج[3] در جلوی واحد جداساز جهت چرخش بردار قطبش می‌باشد.

همچنین لازم است تا وسایلی برای تغییر شدت متوسط درنظر گرفته شود. البته این تغییرات باید از نسبت جداکنندگی مستقل باشد، زیرا آشکارساز تصویر ممکن است به وضعیت اشباع رسیده و منجر به تولید نتایج اندازه‌گیری نادرست گردد که خود بواسطه اعوجاج سیگنال های غیرخطی است.

اندازه گیری بیراهی‌های موج نیازمند تابش از پشت بر عدسی‌های آزمون می‌باشد به صورتی که جبهه موج کروی تولید شده توسط شیئی میکروسکوپ، با کیفیت بالا و دارای اندازه روزنه[4] بزرگتر از عدسی تحت آزمون باشد. شیئی میکروسکوپ مذکور باید نسبت استرل[5] بالای ۹۵٪ داشته باشد تا براساس یک فلسفه آزمون ساده، در اکثر مواقع انجام کالیبراسیون غیرمعمول در بیشتر موقعیت‌های آزمون را میسر سازد.

برای عدسی‌هایی با اندازه روزنه کوچک، توصیه می‌شود که نمونه، مورد تابش امواج تخت قرار گیرد. تابش باریکه موج ، اندازه‌گیری فاصله کانونی عدسی‌ها را امکان‌پذیر می‌سازد. تابش موج تخت می‌تواند جهت تعیین فاصله کانونی عدسی‌هایی با دهانه بزرگ هم به‌کار رود. برای این مقصود، نرم‌افزار باید انتخاب داده‌های اصلی را به صورتی که اندازه‌های جانبی معلوم را هم دربرداشته باشد، انجام دهد. تعیین فاصله کانونی مؤثر با استفاده از گردش فاز φ در میدان مورد نظر قابل محاسبه است.

$$\frac{1}{f} = \frac{\phi\lambda}{\pi\rho_{\text{mask}}^2}$$

یک کالیبراسیون ساده مربوط به فاکتور مقیاس با کمک یک میکرومتر تجاری، مقدار قطر کامل ($2\rho_{\text{mask}}$) را در واحد میکرومتر می‌دهد.

در پیوست‌ها، دو راه حل جهت ارائه خط مشی روش تداخل‌سنجی داده شده است که قسمت های اصلی یا تمام نیازمندی‌های اندازه‌گیری تعریف شده را در بر می‌گیرند.

1- Beamcombiner
2- QWP – Quarter-wave plate
3- HWP – Half-wave plate
4- Numerical aperture
5- Strehl

پیوست ب

(الزامی)

روش‌های آزمون ۱ و ۲ ریزعدسی‌ها با استفاده از سامانه‌های تداخل‌سنج ماخ – زندر

ب – ۱ چیدمان اندازه‌گیری و وسایل آزمون

روش‌های یک و دو، بیانگر سامانه تداخل‌سنجی ماخ - زندر می‌باشند که موج‌های تخت را در بیشتر قسمت ها به کار برده و انحراف از موج‌های تخت فقط برای اندازه‌گیری و تصویربرداری بیراهی‌های جبهه موج ریزعدسی برروی آرایه آشکارساز صورت می‌پذیرد. این بیراهی بوسیله یک شیئی ریز خارج از ساختار تداخل-سنج با فاصله کارکرد خیلی بلند بوجود می آید.

ب – ۲ اندازه‌گیری

ب – ۲ – ۱ روش ۱

لازم است اجزاء شامل منبع تابش، بسط‌دهنده پرتو، مسدودکننده روزنه، میکروسکوپ نورپرداز، عدسی شیئی، یک عدسی استاندارد یا ریزعدسی تحت آزمون، آینه‌های ۱ تا ۴، یک عدسی تصویربردار و یک حسگر تصویر، همگی بطور هم‌محور تنظیم شوند. عدسی استاندارد و ریزعدسی باید به شکلی تطابق داشته باشد که حداقل بیراهی روی دهد.

شکل (ب–۱) نشان‌دهنده یک تداخل‌سنج تغییر دهنده فاز مبتنی بر هندسه ماخ – زندر است که از آینه‌های ۱ الی ۴ استفاده می کند. یک باریکه موازی از منبع تابش لیزر خارج شده که سپس توسط یک بسط‌دهنده پرتو باز شده و توسط یک مسدودکننده روزنه جلوی تداخل‌سنج متوقف می‌گردد. سپس باریکه به کمک یک آینه نیمه شفاف (آینه۱) به دو باریکه تقسیم می‌گردد. باریکه مربوط به بازوی آزمون تداخل‌سنج بر روی یک شیئی شکل‌دهنده پرتو انداخته می‌شود که سبب ایجاد یک جبهه موج کروی برای تابش بر ریزعدسی تحت آزمون یا عدسی استاندارد بدون بیراهی ولی با همان اندازه خواهد شد. ریزعدسی یا عدسی استاندارد به صورت هم‌کانون قرار داده شده و سبب ایجاد تقریباً یک موج تخت در مردمک خروجی عدسی تحت آزمون خواهد شد. این جبهه موج به موج تخت مرجع اضافه شده و سبب ایجاد یک الگوی تداخل می‌شود. یک شیئی تصویر بردار در خروجی تداخل‌سنج، تصویر روزنه عدسی را به صورت تیز بر روی آشکارساز با فاکتور مقیاس مناسب می‌اندازد تا قسمت اعظم مناطق حساس به نور در آرایه آشکارساز استخراج گردد و نمونه‌های داده کافی برای مشخص کردن خطا یا بیراهی‌های عدسی‌ها بدست آید. مسدودکننده روزنه در جلوی تداخل‌سنج باید به نحوی روی محور اپتیکی و در فاصله‌ای از شیئی نورپرداز مربوط به بازوی آزمون قرار داشته باشد که تصویر تیز و کاملا واضح از این مسدودکننده با تصویر روزنه عدسی تحت آزمون روی هم منطبق گردند.

ارزیابی بیراهی‌های موج توسط خواندن چندین الگوی تداخلی تغییر فازی صورت می‌گیرد که این الگوها به صورت همزمان بر روی حافظه کامپیوتر انتقال یافته و ثبت می‌گردند و یک روش بررسی به نام ارزیابی استقرایی[1] شکل می‌گیرد.

در اولین قدم، بیراهی‌های جبهه موج عدسی استاندارد همراه با بیراهی‌های ایجاد شده توسط تداخل‌سنج اندازه‌گیری شده و به نام φ_0 نامگذاری می‌شود.

در قدم دوّم، ریزعدسی تحت آزمون درون تداخل‌سنج قرار می‌گیرد. بیراهی‌های جبهه موج مربوط به ریزعدسی تحت آزمون به نام φ نامگذاری می‌شود. این بیراهی‌ها از تفاضل بین داده φ_1 و بیراهی‌های موج φ_0 اندازه‌گیری شده که مربوط به عدسی استاندارد می‌باشد، محاسبه می‌گردد.

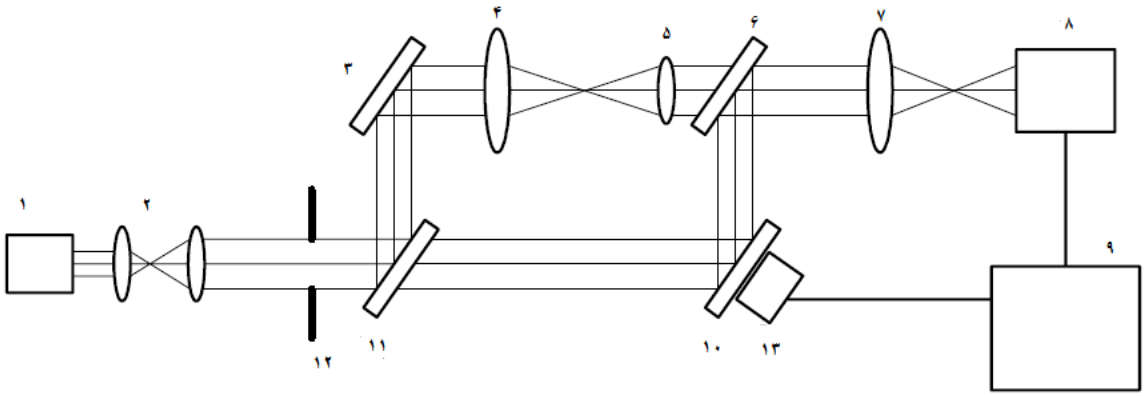
$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_0$$

مهم است که یک میکروسکوپ دارای شیئی روشن با اندازه روزنه موثر بزرگتر از ریزعدسی تحت آزمون مورد استفاده قرار گیرد.

یادآوری۱- در آرایش نشان داده شده در شکل ب – ۱ این امکان وجود دارد که یک روزنه در محل مردمک عدسی استاندارد دوم یا ریزعدسی تحت آزمون و یا نزدیک دهانه آنها قرار گیرد.

یادآوری۲- روزنه، قطر سطح آزمون مربوط به عدسی استاندارد دوّم یا ریزعدسی تحت آزمون را مشخص می‌کند. این امکان نیز وجود دارد که سطح آزمون موارد اشاره شده شامل عدسی استاندارد دوّم یا ریزعدسی، با قرار دادن روزنه در موقعیت حسگر تصویر و یا با ایجاد روزنه به کمک نرم‌افزار انجام پذیرد.

1- Posteriori Evaluation



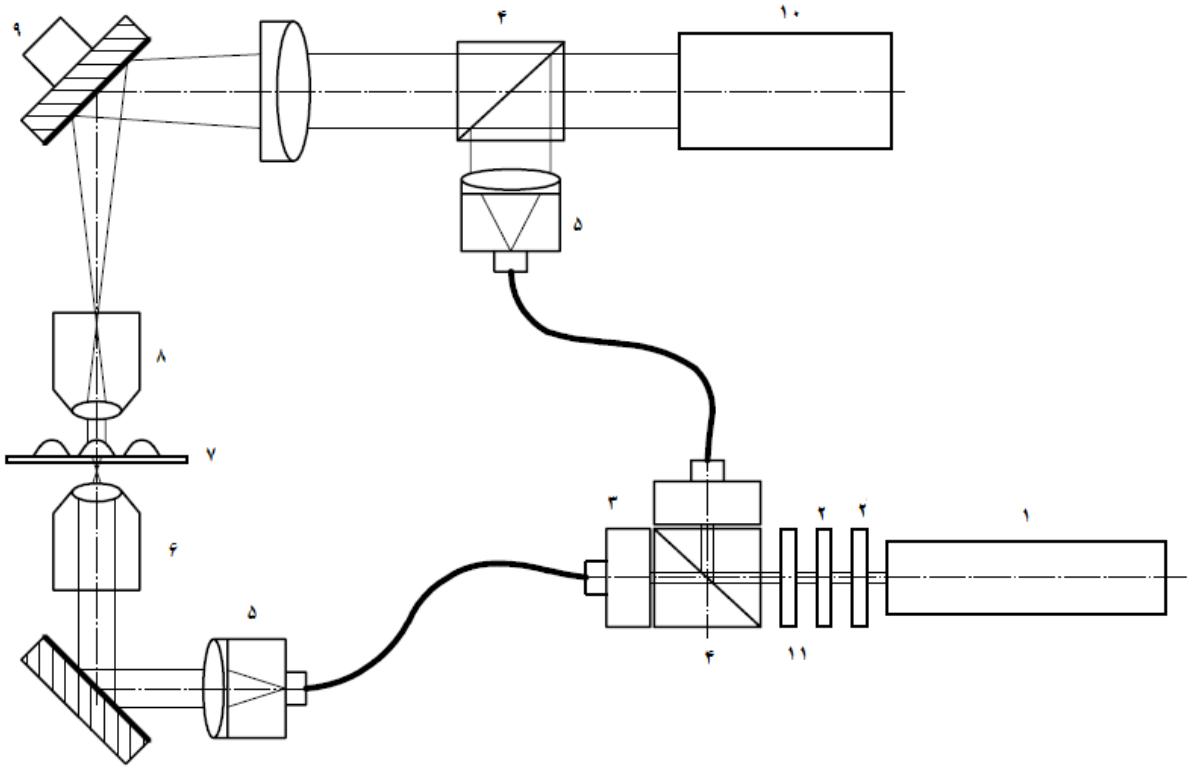
راهنما:

۱ منبع نوری
۲ بسط دهنده پرتو
۳ آینه ۲
۴ اولین عدسی استاندارد
۵ دومین عدسی استاندارد
یا ریزعدسی تحت آزمون
۶ آینه ۴
۷ عدسیهای تصویربردار
۸ حسگر تصویر
۹ پردازشگر تصویر
۱۰ آینه ۳
۱۱ آینه ۱
۱۲ مسدودکننده روزنه
۱۳ مبدل پیزو الکتریک

شکل ب – ۱- تداخل سنج تغییر فاز بر اساس روش تداخل سنجی ماخ - زندر

ب – ۲ – ۲ روش ۲

روش دوّم، روشی جایگزین و به مراتب انعطاف‌پذیرتر از روش اول بوده واصلاحات جدی در ساختار هندسی آن صورت پذیرفته است و از فیبرهای تک حالته منعطف در هر دو بازوی تداخل‌سنج بهره گرفته است.



راهنما:

۱ لیزر ۶۳۳ نانومتر قطبیده
۲ قطبش‌گر
۳ اتصال‌دهنده فیبری
۴ جداساز پرتو
۵ بسط‌دهنده پرتو
۶ میکروعدسی شیء X20
۷ ریزعدسی تحت آزمون
۸ میکروعدسی شیء تصویر بردار 5X, 10X, 20X, 50X
۹ آینه نصب شده بر روی مبدل پیزوالکتریک
۱۰ حسگر تصویربرداری (CCD)
۱۱ صفحه نیم موج

شکل ب-۲- تداخل‌سنج ماخ – زندر بر پایه واحد جداساز پرتو که از قطبش تک مود در فیبرها استفاده کرده و یک میکروسکوپ تصویربردار که در بازوی آزمون تداخل‌سنج قرار گرفته است.

برای تابش تداخل‌سنج معمولاً از لیزر هلیوم–نئون مطابق شکل (ب-۲) استفاده می‌شود. این واحد جداکننده باریکه مبتنی بر قطبش، تنظیم مستقل شدت متوسط را از طریق چرخش یک قطبشگر، ممکن و همچنین تنظیم نسبت جدایی باریکه میان شیء و باریکه مرجع از طریق چرخش یک صفحه نیم موج در جلوی مکعب جداکننده و قطبشگر باریکه را میسر می‌سازد. باریکه‌های قطبیده به فیبرهای تک مود فرستاده شده و خروجی هرکدام به یک موج تخت گسترش می‌یابد. موج مرجع به کمک یک جداساز غیرقطبش‌گر باریکه، با موج شیئی ترکیب می‌شود. قطبش باریکه مرجع با باریکه موج شیئی از طریق چرخش انتهای فیبر منطبق می‌گردد. برای تابش عدسی تحت آزمون دو گزینه وجود دارد:

الف- تابش موج کروی برای تعیین بیراهی‌های موج

ب- دریافت تابش موج تخت با برداشتن شیئی ریز[1] مورد نظر از جلوی عدسی تحت آزمون

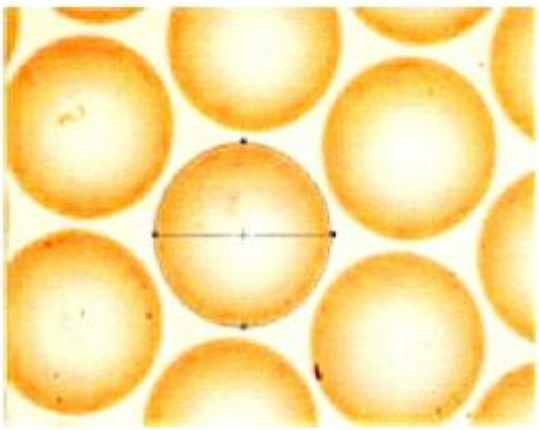
1- Micro-objective

در مورد اول یک شیئی میکروسکوپ با کیفیت بالا با فاصله‌کاری کافی به کار می‌رود تا موج ورودی را به یک موج ایده‌آل کروی تبدیل کند تا اندازه‌گیری بیراهی‌های موج برای حالت ترکیبی ∞/f امکانپذیر گردد. دومین نوع تابش برای اندازه‌گیری عدسی‌های ضعیف انتخاب می‌شود و به طور کلی برای اشیایی که بواسطه نمونه آزمون، تمام فاز آنها دچار تاخیر است کاربرد دارد. همین طور در مورد تابش موج تخت، این امکان وجود دارد که تعیین فاصله کانونی موثر از توزیع فاز اندازه‌گیری شده در حوزه میدانی کاهش یافته حول راس عدسی تحت آزمون صورت پذیرد.

آرایه عدسی در صفحه xy قرار می گیرد. تصویر ریزعدسی تحت آزمون به کمک یک میکروسکوپ بر آرایه آشکارساز انداخته می‌شود، میکروسکوپ شامل میکروسکوپ شیئی و یک عدسی لوله‌ای[1] در یک چیدمان غیرکانونی است. از آنجاییکه مجموعه عدسی‌های شیئی میکروسکوپ داده شده از شکل ب-۲ برای فاصله-کاری یکسان طراحی شده‌اند، لازم است اندازه‌گیری‌های خاصی انجام شود تا از خطاهای سیستماتیک درهنگام تغییر بزرگنمایی جلوگیری شود. برای آنکه تصویربرداری فاقد کانون حفظ شود، اگر شیئی میکروسکوپ تغییر یابد، آنگاه عدسی لوله‌ای همراه با ترکیب‌کننده پرتو و آشکارساز به طور محوری جابجا می‌شوند تا سبب نگه‌داری حالت تابش موج تخت برای ترکیب‌کننده پرتو مکعبی شود. در این حالت خطر بیراهی‌های ایجاد شده توسط تنظیمات غیرصحیح به حداقل می‌رسد.

تداخل‌سنج نمایش داده شده در شکل (ب-۲) با یک واحد جداساز پرتو قطبیده مجهزشده تا اجازه تغییرات غیروابسته نسبت به جدایی و شدت و حساسیت متوسط را مطابق نیازمندی بالا بدهد. بواسطه اتصال فیبری بین جداساز پرتو و بقیه تداخل‌سنج، می‌توان تداخل‌سنج را درون یک میکروسکوپ تجاری ساخت و از تمام مزایای تنظیم ابزاری سود برد.

شکل‌های (ب-۳) تا (ب-۵) میدان دید برای تنظیمات مختلف را در حالت تداخل‌سنجی نمایش داده شده در شکل (ب-۲) نشان می دهد. یک نتیجه اندازه‌گیری شده برای بیراهی‌های موج یک ریزعدسی کروی در شکل (ب-۶) نشان داده شده است.

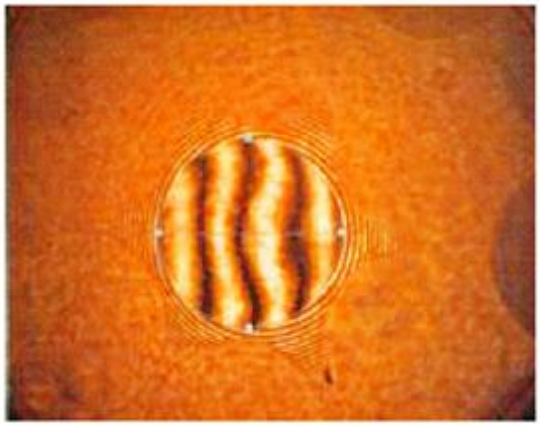


[1] *Tubus*

شکل ب – ۳- تابش نور سفید برای مکانیابی پوشش (شکل رنگی است)

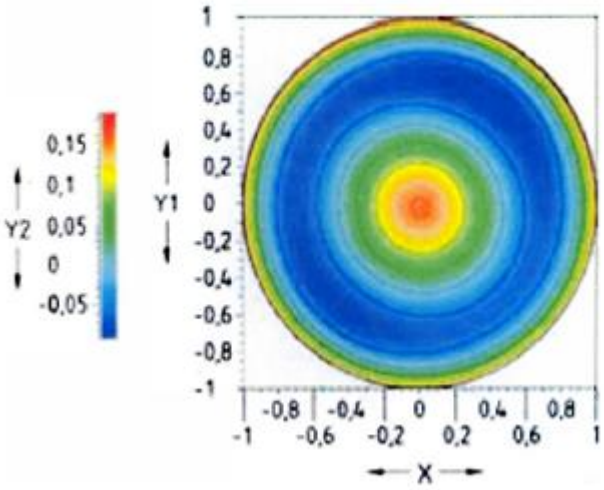
عدسی مشخص شده بوسیله یک پوشش برای منطقه مورد آزمون

شکل ب – ۴- پرتودهی موج تخت بر صفحه آرایه عدسی (شکل رنگی است)



حلقه‌های تداخلی بیانگر بیراهی کروی هستند.

شکل ب – ۵ - میدان دید توسط تابش موج کروی (شکل رنگی است)



راهنما:

۱ شعاع نرمالیزه شده (در جهت x)

۲ شعاع نرمالیزه شده (در جهت y)

۳ فاز/ لامبدا

شکل ب – ۶ - بیراهی‌های موج توسط روش زرنیخ (شکل رنگی است)

پیوست پ

(الزامی)

روش‌های آزمون ۳ و ۴ ریزعدسی‌ها با استفاده از یک سامانه تداخل‌سنج برشی عرضی

پ – ۱ چیدمان اندازه گیری و وسایل آزمون

روش ۳ از یک سامانه تداخل‌سنج برشی عرضی استفاده می‌کند که بیراهی‌های موج ریزعدسی را از طریق اندازه‌گیری مشتقات جزئی جبهه موج در دو جهت متعامد و نیز یک انتگرال استقرایی مربوط به دو میدان داده که سبب ایجاد انحراف موج می شوند، اندازه می‌گیرد.

پ – ۲ اندازه‌گیری

پ – ۲ – ۱ روش ۳

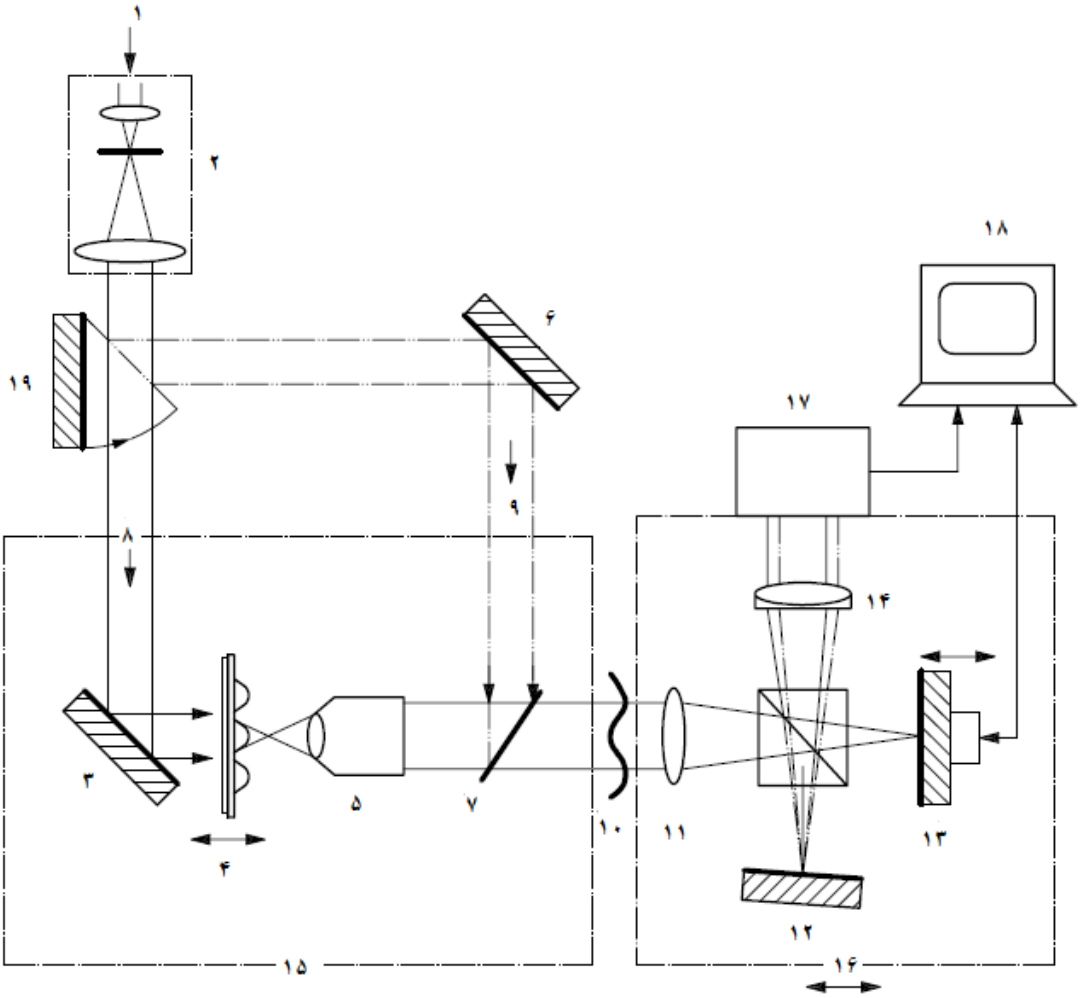
شکل پ-۱ یک تداخل‌سنج برشی عرضی را نشان می‌دهد. در این ساختار، یک بسطدهنده پرتو یک باریکه موازی تابیده شده از منبع تابش نور را باز می‌کند. باریکه موازی سپس به ریزعدسی تحت آزمون انتقال داده

شده که در عین حال جبهه موج کروی را منتقل می‌کند که این جبهه موج کروی توسط یک شیئی میکروسکوپ با کیفیت بالا دارای اندازه روزنه کافی ایجاد شده است. این جبهه موج صادرشونده که تقریبا حالت تخت دارد دارای بیراهی‌های موجی مربوط به عدسی تحت آزمون می‌باشد. یک عدسی کمکی، جبهه موج را بر روی آینه‌های انتهایی یک تداخل‌سنج مایکلسون[1] متمرکز می‌کند. با تغییر اندک زاویه یک یا هر دو آینه در جهت مخالف، جبهه‌های حاصل از عدسی شیئی کمکی مشابه عدسی تحت آزمون، همدیگر را به‌طور عرضی قطع می‌کنند.

اگر فواصل محوری اجزاء کل مجموعه به طور مناسب انتخاب شده باشد، تصویر مربوط به روزنه عدسی که بر روی آرایه آشکارساز می‌افتد، تصویری تیز و واضح خواهد بود که مثلاً در جهت x یک الگوی تداخلی[2] را می‌دهد. کج‌کردن آینه مایکلسون حول محور متعامد، سبب ایجاد یک الگوی تداخلی در جهت y می‌شود. توزیع فازی توسط تکنیک‌ها و روش‌های تغییر فاز اندازه‌گیری می‌شود.

تغییرات فاز مورد نیاز از طریق حرکت یکی از آینه‌ها در جهت محور با کمک یک مبدل پیزوالکتریک ایجاد خواهد شد. تجمیع دو تصویر برشی امکان تعیین خطاهای موج را بدست می‌دهد. یک چیدمان مشابه می‌تواند فرصت یک اشعه منعکس شده را بدست دهد تا بتوان موقعیت راس ریزعدسی را بدست آورد، این امر می‌تواند به تعیین فاصله کانونی مؤثر از طریق حرکت دادن ریزعدسی شیئی[3] موجود بین انعکاس‌دهنده چشم گربه‌ای[4] و موقعیت تمرکز[5] در شرایطی که دارای امکان اندازه‌گیری طولی است، منجر شود.

1- Michelson
2- Interferogram
3- Micro – Objective
4- The cat’s eye configuration
5- Focus postition



راهنما

۱ لیزر
۲ بسطدهنده پرتو
۳ آینه
۴ ریزعدسی تحت آزمون
۵ شیئی میکروسکپ 20×0.65
۶ آینه
۷ جداساز پرتو
۸ تابش نوری منتقل شده
۹ تابش نوری منعکس شده
۱۰ موج تخت منحرف شده
۱۱ عدسی کمکی
۱۲ آینه ۱، قابل چرخش
۱۳ آینه ۲، برروی مبدل پیزوالکتریک
۱۴ روزنه‌های برشی
۱۵ تنظیمات نوری
۱۶ تنظیمات برشی
۱۷ حسگر تصویربرداری (CCD)
۱۸ یارانه
۱۹ آینه قابل چرخش

شکل پ – ۱- تداخل‌سنج برش وجهی براساس تنظیمات مایکلسون در جایی که برش وجهی توسط کج‌کردن یکی از آینه‌ها بدست می‌آید.

یادآوری- جبهه موج ورودی به کمک شیئی مناسب با اندازه روزنه مناسب بر روی آینه متمرکز می‌شود. در طراحی شیئی کمکی، اثر مکعب جداساز پرتو بر روی بیراهی‌های جبهه موج محاسبه می‌گردد.

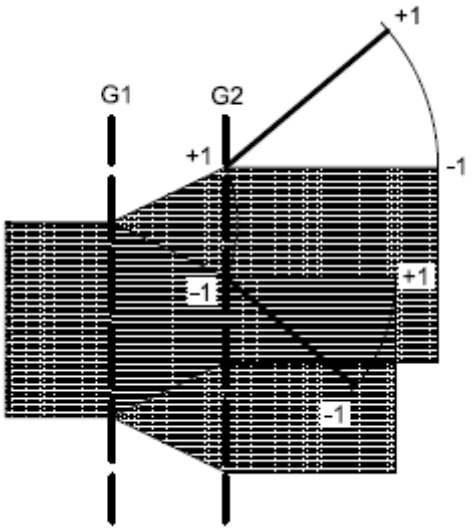
پ – ۲ – ۲ روش ۴

یادآوری- برای اطلاعات بیشتر به مرجع [۲۰] از کتابنامه مراجعه شود.

روش ۴ برپایه استفاده از دو جداساز پراشی پرتو[1] برای تولید برش می‌باشد (به شکل پ–۲ جهت اصل فیزیکی پراش براساس ابزار برشی مراجعه کنید.)

در این حالت، برش به طور مستقیم به موج‌های تخت که از ترکیب آن ریزعدسی به همراه یک شیئی میکروسکوپ بکار برده می‌شوند.

(به شکل پ–۳ برای یک مجموعه جهت تواناسازی اندازه‌گیری خطاهای موجی یک ریزعدسی مراجعه شود).



راهنما:

توری۱ G_1

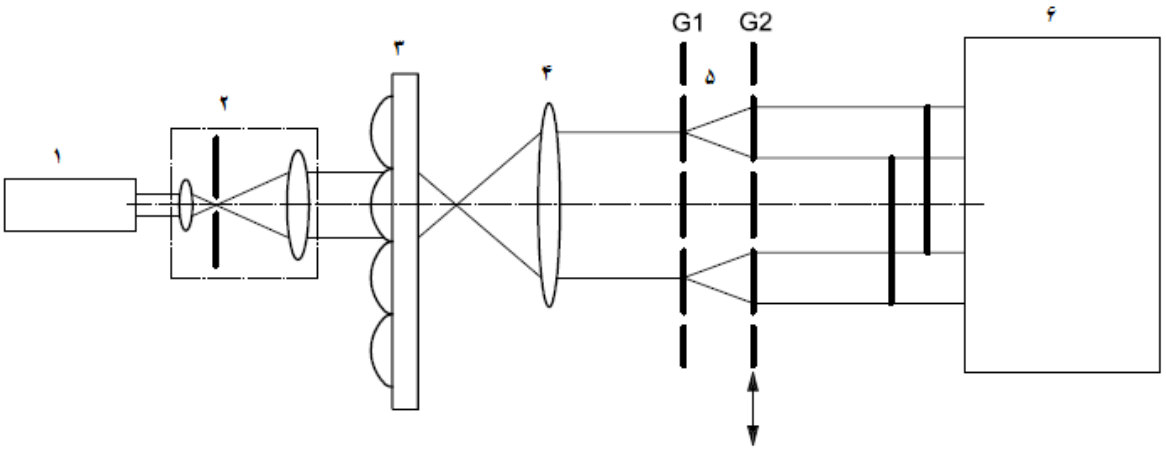
توری۲ G_2

رده پرتوی پراشی ۱ – و ۱ +

یادآوری- شیارات فازی دوتایی[2] یک تغییر فاز **TT** را ایجاد می‌کند که سبب حذف پراش درجه صفر می‌شود.

شکل پ – ۲- تداخل‌سنج برشی بر پایه یک سری چیدمان مربوط به توری‌های فاز رونچی[3]

1- Diffractive beam splitter
2 - Binary phase
3 - Ronchi-Phase



راهنما:

۱ لیزر

۲ بسط دهنده پرتو

۳ آرایه ریزعدسی تحت آزمون

۴ شیئی میکروسکوپ

۵ تداخل سنج برشی

۶ حسگر تصویربرداری (CCD)

توری ۱ G_1

توری ۲ G_2

شکل پ – ۳- چیدمان تداخل سنج برشی برای آزمون ریزعدسیها با توجه به خطاها یا بیراهی‌های موجی بر پایه واحد پراشی که متقارن بوده و از عوامل ایجاد کننده خطا آزاد می باشد.

تداخل‌سنج‌های برشی مشتقات جزئی را بوجود می‌آورند(یا به طور دقیق‌تر، تفاوت بیراهی‌های موجی بین امواج برش وجهی مربوط به جبهه موج تحت آزمون). لذا، لازم است که این بیراهی‌ها در دو بعد اندازه‌گیری شوند (شکل پ–۴) تا بتوان بیراهی‌های موج را از طریق استقرایی با چند جمله‌ای‌های مناسب از داده‌ها بدست آورد. برای رسیدن به این انتگرال، لازم است تا مقدار برش وجهی و نیز مقدار اندازه استاندارد وجهی نیز را جهت بدست آوردن داده‌های قابل اعتماد مربوط به بیراهی‌های موج بدانیم. تنظیمات برش پراشی دارای چندین مزیت اساسی است:

الف- سبب تولید برش متقارن حول محور اپتیکی می‌شود

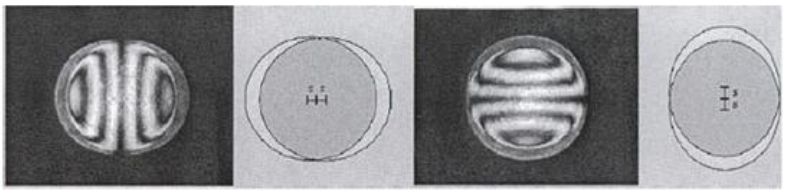
ب- کاملاً پایدار بوده و به طور ساده به یک مجموعه اپتیکی وارد می‌شود

پ- به اندازه ۹۰ درجه قابل چرخش جهت بدست آوردن دو مشتق.

ت- این برش به سادگی با تغییر فاصله توری ها قابل تنظیم است

ث- فاز مذکور می‌تواند خیلی ساده با انتقال یکی از توری‌ها نسبت به توری دیگر عمود بر شیارهای توری‌ها تغییر نماید.

و- بخاطر سادگی طراحی انجام شده که شامل دو صفحه شیشه ای موازی مسطح دارای ساختارهای برجسته دوتایی برروی یک طرف، سهم اجزاء تداخل‌سنج در بیراهی‌ها می‌تواند با استفاده از روش‌های ساخت استاندارد برای توری‌های فاز زیر $\frac{1}{20}$ یک طول موج حفظ شود.



راهنما:

۱ برش جانبی

شکل پ -۴- الگوی تداخلی برشی به کمک یک تداخل‌سنج پراشی در طول موج ۱۳۲۰ نانومتر در راستای محور x و y

پیوست (ت)

(الزامی)

روش ۵ جهت آزمون ریزعدسی با استفاده از سامانه حسگر شاک - هارتمن

ت – ۱ چیدمان اندازه‌گیری و وسایل آزمون

بیراهی‌های جبهه موج یک ریزعدسی همچنین بااستفاده از سامانه حسگر جبهه موجی موسوم به شاک – هارتمن قابل اندازه‌گیری است.

اساس این روش برپایه تبدیل یک باریکه به چند مجموعه باریکه کوچکتر است. این عمل یا توسط یک پرده مات همراه با سوراخ های کوچک یا سوزنی که برروی یک توری منظم قرار گرفته (حسگر هارتمن) نصب می‌شود یا توسط مجموعه عدسی کوچک یا آرایه ریزعدسی (حسگر شاک - هارتمن) انجام می‌شود که منجر به یک نمونه‌گیری تدریجی جبهه موجی متوسط[1] و بازده بهتر جهت جمع آوری تابش می‌شود.

توزیع چگالی توان (انرژی) در پشت آرایه توسط یک آشکارساز حساس به موقعیت که اغلب یک حسگر یا یک آرایه از حسگرهای چهارگانه (سلولهای چهارگانه[2]) می‌باشد، ثبت می‌گردد. امکان جمع‌آوری و تحلیل سیگنال‌های آشکارساز به شکل کامپیوتری قابل دستیابی است. (به استاندارد ملی ایران شماره ۲-۹۵۱۴ مراجعه شود)

ت – ۲ اندازه‌گیری

شکل (ت–۱) طرح استفاده شده جهت اندازه‌گیری بیراهی‌های موجی را با یک حسگر جبهه موج شاک - هارتمن نشان می‌دهد. کلیه اجزاء به طور هم‌محور تنظیم شده‌اند. این اجزاء شامل یک منبع تابش نور، فیبر، عدسی‌های تنظیم‌کننده، عدسی‌های تحت آزمون، بسط‌دهنده پرتو و یک حسگر جبهه موج به همراه یک پردازشگر تصویر مناسب (نشان داده نشده است) می باشد.

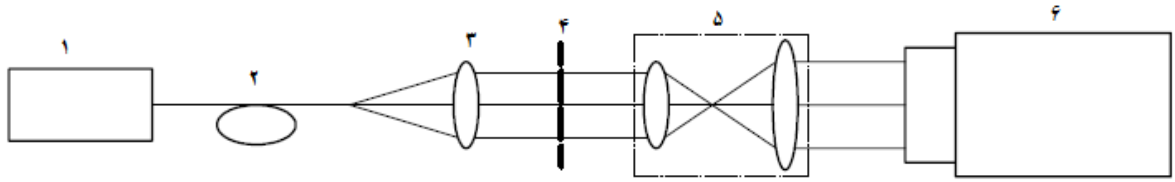
ابتدا یک فایل مرجع با استفاده از طرح موجود در شکل (ت-۱) توسط حسگر جبهه موج ایجاد می شود. خروجی تابش نوری از یک فیبر تنظیم شده و از طریق یک میکروسکوپ ارسال می شود و این خروجی سپس برروی یک حسگر جبهه موج انداخته می شود. این فایل مرجع شامل اطلاعاتی در مورد اثر ترکیبی نورهایی است که برای گسترش‌دهنده و افزاینده پرتو به کار رفته است. بیراهی‌های جبهه موج مرجع از اندازه‌گیری‌های مربوط به بیراهی‌های بعدی ریزعدسی کسر خواهد شد.

سپس دو احتمال یا امکان جهت اندازه‌گیری ریزعدسی واقعی باتوجه به توان عدسی وجود دارد.

برای ریزعدسی کندتر (که اندازه روزنه آن از اندازه روزنه فیبر کمتر است)، طرح موجود در شکل (ت–۲) می‌تواند جهت اندازه‌گیری استفاده شود. در این حالت، یک ریزعدسی در صفحه تصویر درست جلوی بسط-دهنده پرتو قرار گرفته و موقعیت فیبر به صورتی که بتواند باریکه را از میان ریزعدسی تنظیم کند، میزان

1- Average wavefront gradient sampling
2- Quadcells

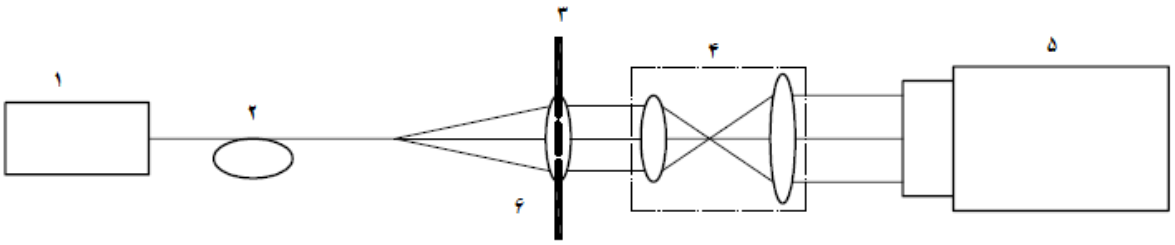
می‌شود. بیراهی‌های ریزعدسی به طور خودکار با توجه به اندازه گیری مرجع انجام شده با آرایش مندرج در شکل(ت–۲) اندازه‌گیری می‌شود. (بیراهی‌های بسط‌دهنده پرتوهای نوری از فایل مرجع کسر می‌شوند.)
برای ریزعدسی تندتر (که اندازه روزنه آن از اندازه روزنه فیبر بزرگتر است) طرح موجود در شکل (ت–۳) به کار می‌رود. در این حالت یک عدسی کندتر برای موازی کردن تابش اپتیکی حاصل از فیبر استفاده می‌شود. باریکه نور موازی‌شده دوباره بوسیله یک عدسی تند (حداقل به تندی ریزعدسی تحت آزمون) کانونی شده و در نهایت بر ریزعدسی تحت آزمون فرود می‌آید. مجدداً، بیراهی‌های ریزعدسی با توجه به فایل مرجع اندازه-گیری می‌شود.



راهنما:

۱ منبع تابش نوری
۲ فیبر
۳ عدسی تنظیم کننده
۴ صفحه تصویر بردار
۵ بسط‌دهنده پرتو
۶ حسگر شاک – هارتمن

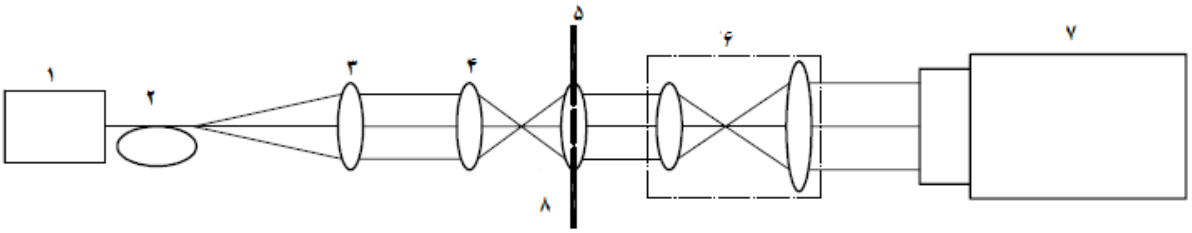
شکل ت – ۱- طرح اندازه‌گیری مرجع



راهنما

۱ منبع تابش نوری
۲ فیبر
۳ روزنه
۴ بسط‌دهنده پرتو
۵ حسگر شاک – هارتمن
۶ عدسی کندتر مورد آزمون

شکل ت – ۲- طرح اندازه‌گیری یک ریزعدسی کند



راهنما:

۱ منبع تابش نوری
۲ فیبر
۳ عدسی موازی‌کننده
۴ عدسی مجددا کانونی‌کننده
۵ روزنه
۶ بسط‌دهنده پرتو
۷ حسگر شاک – هارتمن
۸ ریزعدسی جهت آزمون

شکل ت – ۳- طرح اندازه‌گیری یک ریزعدسی تند

پیوست ث

(الزامی)

روش آزمون ۱ آرایه ریزعدسی با استفاده از سامانه تداخل‌سنجی تایمن - گرین

ث –۱ چیدمان اندازه گیری و وسایل آزمون

روش ۱ جهت آزمون آرایه از سامانه تداخل‌سنجی تایمن - گرین استفاده می‌کند تا بیراهی‌های جبهه موج آرایه ریزعدسی را اندازه‌گیری کند.

ث – ۲ اندازه‌گیری

شکل (ث–۱) یک تداخل‌سنج تایمن - گرین را برای اندازه‌گیری جبهه موج آرایه ریزعدسی نشان می‌دهد. یک باریکه موازی از منبع تابش نوری توسط بسط‌دهنده پرتو، باز می‌شود و توسط یک صفحه نیم موج به یک جداساز پرتو انتقال می‌یابد. این باریکه در جداساز پرتو قطبشگر به دو باریکه تقسیم می‌شود. باریکه قطبیده P در اولین صفحه مرجع منعکس می‌شود و پس از عبور از یک صفحه ربع موج با یک مبدل پیزوالکتریک ترکیب می‌شود. این باریکه سپس به باریکه قطبیده S تبدیل خواهد شد، که این امر پس از عبور از صفحه ربع موج و همینطور پس از انعکاس از جداساز قطبش‌گر تحقق می‌پذیرد.

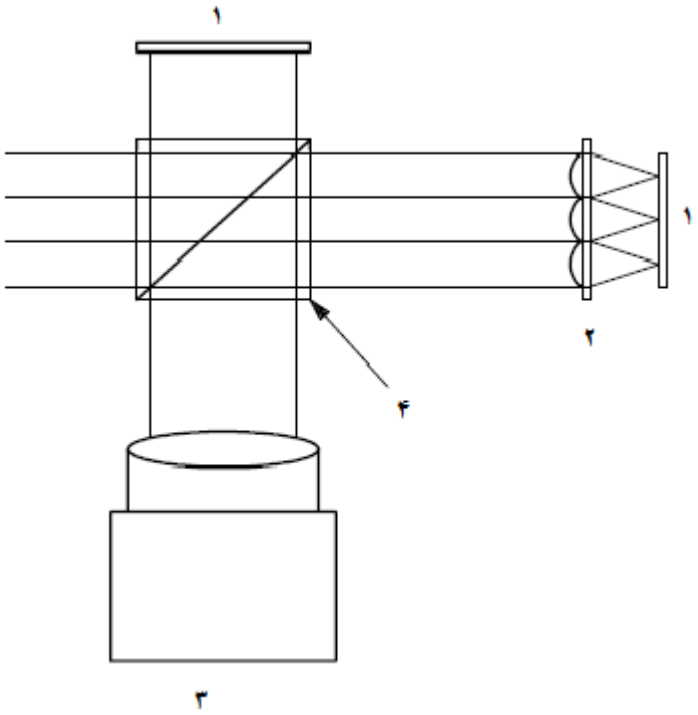
باریکه قطبیده S پس از عبور از یک صفحه ربع موج دیگر برروی جداساز قطبیش‌گر باریکه منعکس شده و روی آرایه ریزعدسی تحت آزمون انداخته می‌شود. باریکه انتقالی از آرایه ریزعدسی تحت آزمون برروی یک آینه تخت انعکاس می‌یابد، و مجدداً روی همان آرایه ریزعدسی برگشت داده شده و به پرتو قطبیده P تبدیل می‌شود که این امر از طریق یک صفحه ربع موج انجام می‌شود. این باریکه پس از عبور از جداساز قطبش‌گر باریکه به جبهه موج مرجع اضافه می‌شود.

تصویر الگوی حاشیه‌ای تداخلی مربوط به دو جبهه موج ترکیب شده، توسط یک عدسی تصویربردار برروی یک حسگر تصویر شکل می‌گیرد. جابجایی‌های فازی توسط بکارگیری یک ولتاژ به مبدل پیزوالکتریک متصل به یک آینه مرجع، تحقق می‌یابد.

به عنوان نتیجه، بیراهی‌های جبهه موج هر ریزعدسی تحت آزمون در ترکیب با بیراهی‌های تداخل‌سنج شامل خطاهای صفحه مرجع، بدست می‌آید.

کلیه اجزاء به صورت هم‌محور تنظیم خواهند شد. این اجزاء شامل منبع تابش نوری، بسط‌دهنده پرتو، مسدودکننده روزنه، عدسی‌های استاندارد اول و دوم، آرایه ریزعدسی تحت آزمون، آینه‌ها، عدسی تصویربردار و یک حسگر تصویر است.

براساس چیدمان شکل (ث–۱)، فقط قسمت‌های بیراهی‌های جبهه موج قابل اندازه‌گیری است و این بدان معنی است که بیراهی کروی بطور صحیح اندازه‌گیری شده، ولی بیراهی قسمت کما اندازه‌گیری درستی نخواهد داشت. دلیل این محدودیت وارونگی مسیر تابش نوری پس از انعکاس پرتوهای متمرکز شده در آینه تخت است.



راهنما:

۱ آینه

۲ ریزعدسی تحت آزمون

۳ آشکارساز

۴ جداساز پرتو

شکل ث–۱- تداخل‌سنج تایمن - گرین برای اندازه‌گیری جبهه موج آرایه ریزعدسی

پیوست ج

(الزامی)

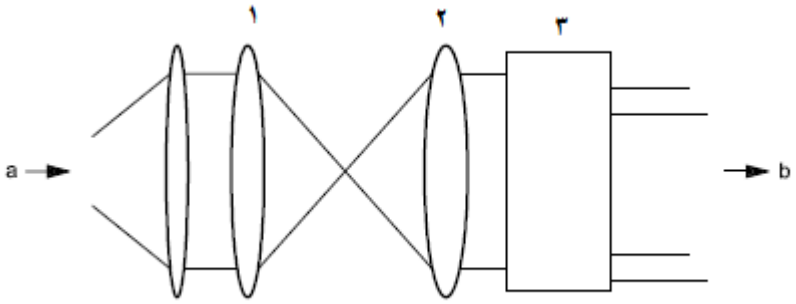
اندازه‌گیری یکنواختی آرایه ریزعدسی با روش آزمون ۲ تعیین شده

ج – ۱ چیدمان اندازه‌گیری و وسایل آزمون

آرایه‌های عدسی می‌توانند از لحاظ یکنواختی آرایه با کمک هولوگرام تولید شده توسط رایانه[1] و یا اجزاء اپتیکی پراشی[2] که نمایشگر یک تابع موج کروی ایده‌آل (باتوجه به اندازه‌گیری موازی بیراهی‌های موجی)، اندازه‌گیری شوند. تداخل‌سنج‌های برشی به همان اندازه تداخل‌سنج‌های تک‌عبوری از نوع ماخ – زندر برای انجام آزمون مناسب هستند.

ج – ۲ اندازه‌گیری یکنواختی

تداخل‌سنج‌های برشی عرضی جهت بازیابی اطلاعات درخصوص بیراهی‌های موجی یک آرایه عدسی قابل استفاده می‌باشند. (به شکل ج-۱ مراجعه شود) به شرطی که قطر عدسی‌ها از قطر آرایه[3] نصب شده کمتر باشد. لزوم این امر در این است که این اجازه به هر عدسی آرایه داده شود تا نمودار تداخل برشی منحصر به خود را داشته باشد. در مورد آرایه‌های بسیار بهم فشرده، این امکان وجود دارد که برش از طریق یک آرایه مستقر شده انجام پذیرد و نتیجه بدست آمده از این راه با عدسیهای مجاور در همان آرایه مقایسه گردد تا این امر با اندازه‌گیری اختلاف بیراهی موج عدسی‌های مجاور بعدی امکان‌پذیر شود. بنابراین چنین آزمونی فقط جنبه یکنواختی دارد (به شکل ج-۲ مراجعه کنید)



راهنما:

۱ بخش‌های اپتیکی کمکی

۲ آرایه عدسی تحت آزمون

۳ تداخل‌سنج برشی عرضی

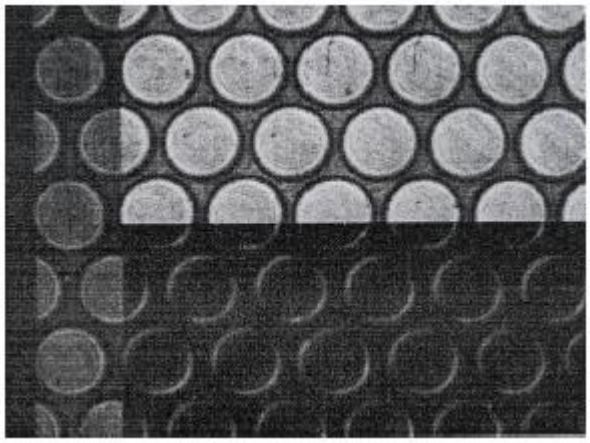
الف لیزر

ب آشکارساز

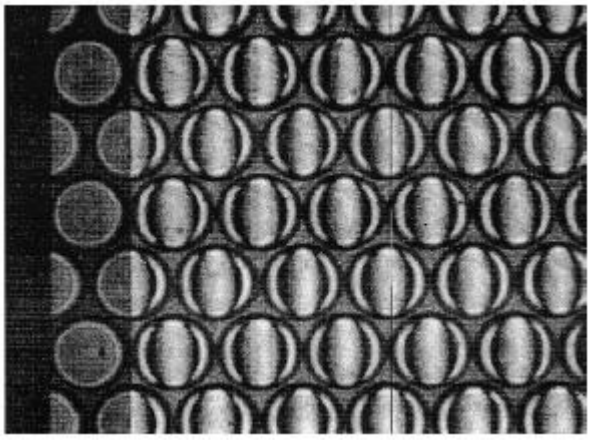
1- CGH-Computer – Generated Hologram
2- Difractive optical Element
3- The pitch of the array

شکل ج -۱- چیدمان آزمون بااستفاده از تداخل‌سنج برشی عرضی

در انتخاب تداخل‌سنج برشی مناسب باید دقت لازم صورت پذیرد چون در غیر اینصورت آزمون تحت تاثیر بیراهی‌های جبهه موج ناشی از عیوب تداخل‌سنج قرار می‌گیرد. در شکل ج-۳، یک راه‌حل به شکل تداخل-سنج برشی نشان داده شده است که بر پایه دو توری فازی به طور سری متکی است و توری های فازی از نوع رونچی هستند. این بدان معنی است که مرتبه های زوج جا مانده و مرتبه صفر با انتخاب یک عمق کنده‌کاری مناسب مربوط به موج سطحی دوتایی نادیده گرفته می‌شود. مقدار برش بسته به فاصله توری‌ها متغیر است ضمن این که یک تغییر موقعیت عرضی عمود بر شیار توری سبب یک تغییر فاز در نمودارهای تداخل‌شده که جهت ارزیابی‌های مربوط به تغییر فاز لازم و ضروری است. از آنجائیکه تداخل‌سنج شامل فقط دو سطح برجسته مربوط به توری‌ها است، لذا این امکان وجود دارد که ابزاری دقیق با بیراهی‌های کمتر از سطح $\lambda/20$ بدست آید.

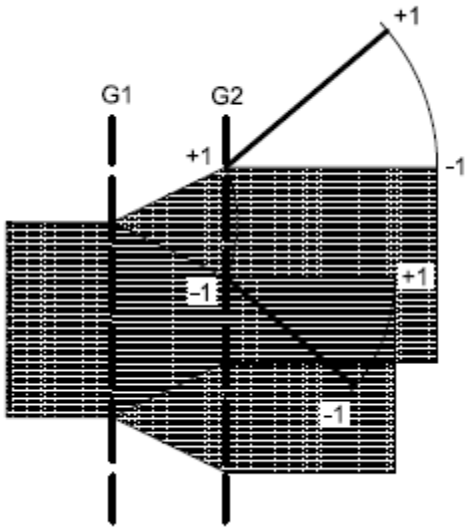


الف- تطابق دقیق



ب- برشی کوچکی از شکل الف سهم کوچکی از بیراهی کروی را نشان می‌دهد.

شکل ج - ۲- مثال‌های یک آزمون یکنواختی توسط برش بوسیله یک عدسی نصب شده



راهنما:

توری۱ G_1

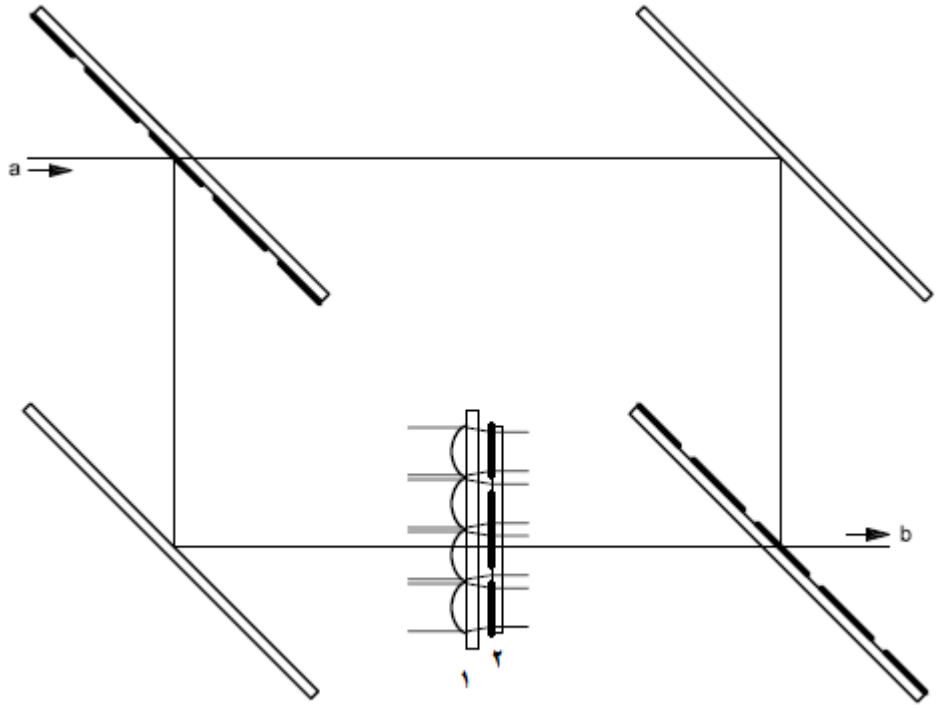
توری۲ G_2

درجه پراش پرتو باریکه ۱ – و ۱ +

شکل ج-۳- تداخل‌سنج برشی عرضی بر پایه دو توری فازی از نوع رونچی که به صورت چیدمان سری بوده و به‌دلیل مسیر تابش اپتیکی بسیار متقارن، درجه آزادی از خطاهای وسیله را فراهم می‌کند.

ج – ۳ اندازه‌گیری هم‌زمان بیراهی‌های موج یک آرایه ریزعدسی

اندازه‌گیری بیراهی موج با این فرض است که تابش عدسی تحت آزمون توسط یک موج کروی ایده‌آل یا انحنای جبهه موج کروی توسط عدسی‌های خنثی یا مجموعه‌ای خنثی مانند هولوگرام تولید شده توسط رایانه، صورت پذیرد. از آنجائیکه آرایه به صورت کامل باید آزمون شود، لذا حالت استقرار آرایه عدسی و آرایه هولوگرام ایجاد شده توسط رایانه خنثی باید مطابق باشد. شکل (ج–۴) یک چیدمان برای آزمون عبور منفرد در حالت تابش نوری انتقال یافته توسط روش ماخ – زندر را نشان می‌دهد. در اینجا، موج خنثی سبب خنثی سازی انحنا جبهه موج کروی می‌شود و سبب بروز بیراهی‌های موج عدسی‌ها در آرایه می‌گردد. برای ارزیابی نمودارهای تداخل آرایه، یک نرم‌افزار مخصوص باید نوشته شود تا اجازه دهد ارزیابی‌های هم زمان مربوط به بیراهی‌های موجی عدسی‌های درون یک آرایه صورت پذیرد.



راهنما:

۱ آرایه عدسی تحت آزمون

۲ آرایه (CGH)

گام دو آرایه یکسان می‌باشد.

الف لیزر

ب آشکارساز

شکل ج – ۴– اندازه‌گیری انحراف جبهه موج یک آرایه عدسی بااستفاده از آرایه هولوگرام ایجادشده توسط رایانه که حکم جبران‌کننده برای قسمت کروی جبهه موج را دارد.

کتابنامه

[1] ISO 10110-14, Optics and optical instruments — Preparation of drawings for optical elements and
systems — Part 14: Wavefront deformation tolerance
[2] ISO 15529, Optics and optical instruments — Optical transfer function — Principles of measurement of
modulation transfer function (MTF) of sampled imaging systems
[3] ISO 15367-2, Lasers and laser-related equipment — Test methods for determination of the shape of a
laser beam wavefront — Part 2: Shack-Hartmann sensors
[4] ISO/TR 14999-1, Optics and photonics — Interferometric measurement of optical elements and optical
systems — Part 1: Terms, definitions and fundamental relationships
[5] ISO/TR 14999-2, Optics and photonics — Interferometric measurement of optical elements and optical
systems — Part 2: Measurement and evaluation techniques
[6] ISO/TR 14999-3, Optics and photonics — Interferometric measurement of optical elements and optical
systems — Part 3: Calibration and validation of interferometric test equipment and measurements
[7] ISO/TR 14999-4, Optics and photonics — Interferometric measurement of optical elements and optical
systems — Part 4: Interpretation and evaluation of tolerances specified in ISO 10110
[8] HERZIG, H.P., (ed), Micro-Optics: Elements, systems and applications. Taylor & Francis Ltd, London,
1997
[9] SCHWIDER, J., and SICKINGER, H., Array tests for microlenses. Optik **107**(1), 1997, pp. 26-34
[10] HUTLEY, M.C., DALY, D., and STEVENS, R.F., The testing of microlens arrays, IOP Short meeting series
No. 30 Microlens Arrays, Teddington UK, 1991, pp. 67-81
[11] BÜTTNER, A., and ZEITNER, U.D., Calculation of the average lenslet shape and aberrations of microlens
arrays from their far-field intensity distribution. Applied Optics, **41**(32), 2002, pp. 6841-6848
[12] MALACARA, D., Optical shop testing, Wiley & sons, 1992
[13] KOHLER, D.R., and GAMIZ, V.L., Interferogram reduction for radial-shear and local-reference
holographic interferograms. Applied Optics, **25** (10),1986, p. 1650
[14] DALY, D., Microlens Arrays. Taylor and Francis, 2001
[15] MIYASHITA, T., et al. Wavefront aberration measuring method for microlens using the Mach-Zehnder
interferometer combining with an effective aperture (I), Institute of Physics, London, Micro Optics and
Lens Arrays, Friday 14 September, 2001
[16] MIYASHITA, T., et al. Wavefront aberration measurement technology for microlens using the Mach-
Zehnder interferometer provided with a projected aperture. Proc. SPIE, **Vol. 5532**, 2004, pp. 117-127

[17] KATO, M., et al. Equivalence between the software-determined and the hardware-determined effective
numerical aperture in the interferometrical measuring of microlens. Proc. SPIE, **Vol. 5532**, 2004,
pp. 136-146
[18] SICKINGER, H., SCHWIDER, J., and MANZKE, B., Fiber based Mach-Zehnder interferometer for
measuring wave aberrations of microlenses. Optik, **110**, 1999, pp. 239-243
[19] SICKINGER, H., FALKENSTÖRFER, O., LINDLEIN, N., and SCHWIDER, J., Characterisation of microlenses
using a phase-shifting shearing interferometer. Opt. Eng. **33**, 1994, pp. 2680-2686
[20] SCHREIBER, H., and SCHWIDER, J., A lateral shearing interferometer based on two Ronchi-phase
gratings in series. Appl. Opt., **36**, 1997, pp. 5321-5324