بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

اندازه‌گیری لیزری قطر تارنوری با استفاده از الگوی پراش

محسن کاظمی[۱]، لاله رحیمی‌نژاد[۱]، سید علی‌اصغر عسکری[۱] و محمد عابدی[۱]

[۱]پژوهشکده علوم و فناوری اپتیک و لیزر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران

چکیده- تعیین دقیق قطرتارهای نوری از موارد حائز اهمیت در بسیاری از کاربردهای این قطعات می‌باشد. بااین‌وجود روش‌های مکانیکی، هم به دلیل کوچکی اندازه و هم ازنظر امکان آسیب به تارهای نوری، انتخاب‌های چندان مناسبی برای این منظور نمی‌باشند. در مقابل روش‌های نوری مبتنی بر اثرات تداخل و پراش راهکارهای بسیار سریع، دقیق و ایمنی برای اندازه‌گیری قطر تارهای نوری محسوب می‌شوند. در این کار به تعیین نوری قطر یک تار نوری استاندارد باوجود غلاف و بدون غلاف، با استفاده از پردازش تصویرِ مربوط به نقش پراشِ حاصل از تابش مستقیم نور لیزر هلیوم-نئون به آن، می‌پردازیم. نتایج حاصل از اندازه‌گیری نزدیکی بسیار زیادی را با اندازه‌های واقعی نشان می‌دهند.

کلید واژه- اندازه گیری لیزری، پردازش تصویر، تارنوری، طرح پراش

Laser measurement of fiber diameter by diffraction pattern

M. Kazemi[1], L. Rahiminejad[1], A. A. Askari[1] and M. Abedi[1]

[1] Optics & Laser Science and Technology Research Center, Malek-Ashtar University of Technology, Isfahan

Abstract- A safe and highly accurate method is essential for determining the diameter of an optical fiber. Mechanical methods are not applicable for this work, because of the optical fiber surface damage that can result during a mechanical measurement process. On the other hand, optical measurement methods, based on the interference and diffraction effects, are known as very accurate, rapid and safe techniques for measuring the diameter of optical fibers. In this work, we analyze the diffraction pattern, resulting from illuminating an optical fiber by a He-Ne laser, to measure the diameters of a standard optical fiber with and without the buffer layer. The laser measurement results show a very good agreement with the absolute sizes.

Keywords: Diffraction Pattern, Fiber Optic, Image Processing, Laser Measurement

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-11-12]

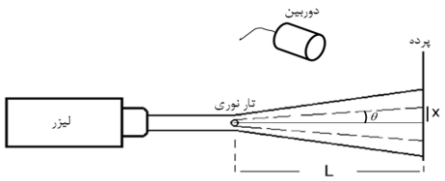
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

۱- مقدمه

قطر مغزی، رویه و حتی غلاف بیرونی از مهم‌ترین مشخصه‌های یک تار نوری می‌باشند. قطر یک استوانه‌ی میکرومتری مانند یک سیم نازک و یا تار نوری را می‌توان با استفاده از ابزار و یا روش‌های متنوعی اندازه‌گیری کرد. درهرحال بسیار مهم است که روش اندازه‌گیری به حد کافی دقیق و به‌راحتی قابل تکرار بوده و بدون وارد شدن هرگونه آسیبی به جسم موردانداز‌ه‌گیری باشد. روش‌های نوری ازجمله بهترین انتخاب‌ها برای این منظور می‌باشند. در اغلب روش‌های نوری اندازه‌گیری قطر بر پایه‌ی دو پدیده‌ی تداخل و پراش انجام می‌شود که هریک مزایا، معایب و نیز دقت خاص خود رادارند [۱و۲]. هرچند که روش تداخل از دقت بسیار بالایی برخوردار است، اما به ابزارهای مکانیکی بسیار حساس و دقیقی احتیاج دارد که حساسیت آن به عوامل خارجی را بسیار افزایش می‌دهد. اما در سوی دیگر استفاده از الگوی پراش، به‌منظور اندازه‌گیری قطر، روشی بسیار ساده‌تر، با حساسیت پایین‌تر به شرایط محیطی و البته با دقت کافی است. در این کار به شرح و اجرای نمونه‌ای از اندازه‌گیری قطر یک تار نوری، باوجود غلاف و پس از برداشتن غلاف، با استفاده از پردازش تصویرِ نقش پراشِ حاصل از برخورد باریکه‌ی لیزر به تار نوری پرداخته خواهد شد. نتایج به‌دست‌آمده با قطر اندازه‌گیری شده توسط میکروسکوپ نوری نیز مقایسه شده و نزدیکی بسیار مطلوبی را نشان می‌دهند.

۲- چیدمان تجربی و اصول نظری

شکل ۱ چیدمان تجربی مربوط به اندازه‌گیری قطر تار نوری را نشان می‌دهد [۱].



شکل ۱: چیدمان تجربی اندازه‌گیری قطر تار نوری [۱].

همان‌طور که از شکل ۱ مشخص است، وجود تار نوری بر سر راه باریکه‌ی موازی نور لیزر باعث ایجاد دو شکاف در دو سوی تار می‌گردد. بدین ترتیب ایجاد طرح تداخلی یانگ بر روی پرده دور از انتظار نیست. از سویی خود تار نوری نیز مانعی بر سر راه نور لیزر محسوب شده و منجر به ایجاد اثرات پراش می‌گردد. بنابراین طرح مشاهده‌شده بر روی پرده نتیجه‌ی ترکیبی از اثرات تداخل و پراش است. بنابر اصل بابینه می‌دانیم که طرح پراش فرانهوفری مربوط به یک مانع با طرح پراش روزنه‌ی هم‌شکل و هم‌اندازه‌ی آن یکسان است. بنابراین توزیع شدت کل در نقطه‌ای بر روی پرده با زاویه‌ی θ نسبت به محور گذرنده از مرکز تار نوری و عمود بر پرده به‌صورت [۳]:

$$I = I_0 \left(\sin\beta/\beta\right)^2 \cos^2\left(\delta/2\right) \qquad (۱)$$

است. در رابطه‌ی (۱) I_0 بیشینه‌ی شدت، $\cos^2(\delta/2)$ جمله‌ی مربوط به تداخل و $(\sin\beta/\beta)^2$ جمله‌ی مربوط به اثر پراش است که در آن برای طول‌موج کاری λ و تار نوری با قطر d، $\beta = \pi d \operatorname{Sin}\theta/\lambda$ است. شکل ۲ طرح تداخلی دو شکاف و نیز نقش پراش یک مانع استوانه‌ای را به‌صورت جداگانه نشان می‌دهد.

شکل ۲: (الف) نقش پراش یک میله‌ی استوانه‌ای (ب) طرح تداخلی یانگ.

در شکل ۲ (الف)، برای زوایای کوچک θ (نقاط اطراف مرکز نقش) داریم $\operatorname{Sin}\theta \cong X/L$ که در X فاصله‌ی نقطه‌ی موردنظر تا مرکز نقش پراش است. بنابراین با توجه به رابطه‌ی (۱) و با استفاده از تعریف β نقطات کمینه‌ی نقش پراش در فواصل

$$Y = \pm\lambda L/d, \pm 2\lambda L/d, \pm 3\lambda L/d, \cdots \qquad (۲)$$

از مرکز نقش قرار می‌گیرند. عرض هر فریز در طرح تداخلی نمایش داده‌شده در شکل ۲ (ب) نیز از عبارت

$$\Delta y = \lambda L/D \qquad (۳)$$

حاصل می‌شود که در آن D فاصله‌ی بین مرکز دو روزنه‌ی تشکیل‌شده در دوسوی تار نوری است. با توجه به‌اندازه‌ی بسیار کوچک قطر تار نوری در مقایسه با قطر لکه‌ی لیزر از رابطه‌ی (۲) و (۳) مشخص است که فاصله‌ی دو کمینه‌ی متوالی در نقش پراش بسیار بزرگ‌تر از عرض فریزهای

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-11-12]

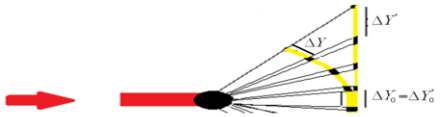
تداخلی بوده و تاریک و روشن‌های متوالی و خیلی نزدیک به یکدیگرِ مربوط به طرح تداخلی در داخل نقش پراش که بسیار واضح‌تر است قرار می‌گیرند. بدین ترتیب طرح قابل‌مشاهده بر روی پرده و مناسب مطالعه همان نقش پراش از تار نوری است. از عبارت (۲) نتیجه می‌گیریم که با در اختیار داشتن نقش پراش امکان محاسبه‌ی قطر تار نوری با استفاده از رابطه‌ی

$$d = a\lambda L / \Delta Y \qquad (۴)$$

وجود خواهد داشت که در آن ΔY فاصله‌ی دو کمینه‌ی متوالی در نقش پراش مربوط به تار نوری موردنظر است. در رابطه‌ی (۴) a ضریب ثابتی است که در صورت اندازه‌گیری فاصله‌ی بین دو کمینه‌ی مرکزی مقدار دو و در صورت استفاده از فاصله‌ی دو کمینه‌ی متوالی دیگر مقدار یک را به خود می‌گیرد.

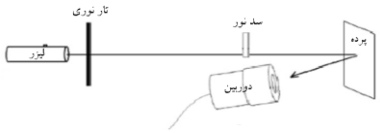
۳- ثبت و مناسب‌سازی نقش پراش

الگوی پراش ایجادشده روی پرده، تنها مرجع اندازه‌گیری قطر در این روش است. بنابراین دقت نهایی اندازه‌گیری به‌شدت به کیفیت و وضوح الگوی موردبررسی وابسته است. از تقریب به‌کاررفته برای $\mathrm{Sin}\,\theta$ مشخص است که درواقع نقش پراش، با مشخصات مربوط به عبارت (۲)، بر روی سطح یک کره به مرکز نقطه‌ی برخورد باریکه‌ی نور به تار نوری و شعاع L تشکیل می‌شود. بنابراین برای استفاده از رابطه‌ی (۴) یا باید پرده‌ای کروی با مرکز قرارگرفته بر روی تار نوری داشته باشیم و یا مقدار اندازه‌گیری شده بر روی پرده‌ی تخت، $\Delta Y'$، را به مقدار مناسب ΔY تبدیل کنیم. شکل ۳ نحوه‌ی این تغییر را نشان می‌دهد. همان‌طور که شکل ۳ نشان می‌دهد، در صورت استفاده از پرده‌ی تخت، تنها اندازه‌گیری عرض فریز مرکزی به‌قدر کافی دقیق خواهد بود. اما مشکل اصلی کار با این فریز این است که با استفاده از لیزر، شدت فریز مرکزی به حدی بالا خواهد بود که صفحه‌ی حساس به نور دوربین مورداستفاده را به اشباع رسانده و تشخیص نقاط کمینه در این بخش از تصویر را غیرممکن می‌سازد. بنابراین لازم است که پیش از ثبت تصویر تباین نقاط مرکزی طرح پراش با استفاده از روش مناسبی افزایش یابد. ازجمله روش‌های مناسب برای انجام این کار



شکل ۳: تغییر فاصله‌ی نقاط کمینه با استفاده از پرده‌ی تخت.

استفاده از ابزارهایی مانند سد کننده‌ی نور، ادوات کاهنده‌ی نور و حتی افزایش فاصله‌ی پرده از تار نوری می‌باشند. هرچند که از این میان ساده‌ترین راه‌کار قرار دادن پرده در فاصله‌ی دورتری است، اما این روش، به دلیل نیاز به فضای زیاد چینش، ازلحاظ صنعتی‌سازی اصلاً توصیه نمی‌شود. در این کار از روش انسداد نور استفاده‌شده است. ازآنجایی‌که نقش پراش یک الگوی کاملاً متقارن است، می‌توان فقط با داشتن یک‌نیمه از آن نیز محاسبات را انجام داد. با قرار دادن یک مانع بر سر راه نور پراشیده شده از تار نوری یک‌نیمه از نقش پراش حذف و تباین تصویر در مرکز نیمه‌ی باقی‌مانده‌ی نقش بسیار بالاتر خواهد رفت [۴]. شکل ۴ چیدمان مربوط به این آزمایش را به‌صورت طرح‌واره نمایش می‌دهد. در شکل ۵ نمونه‌ای از نحوه‌ی افزایش وضوح نقاط مرکزی نقش پراش با استفاده از مانع مناسب را می‌بینیم.



شکل ۴: نحوه‌ی قرارگیری سد نور در سر راه نور پراشیده‌شده از تارنوری.

(ب) (الف)

شکل ۵: تأثیر قرار دادن مانع بر سر راه یک‌نیمه‌ی الگوی پراش: تصویر ثبت‌شده‌ی طرح پراش (الف) در حالت عادی (ب) با استفاده از سد نور [۴].

۴- نتایج آزمایشگاهی و استخراج اطلاعات

برای انجام محاسبات تعیین قطر به‌صورت خودکار، به سراغ بینایی ماشین می‌رویم که مبنای آن تحلیل تصاویر اجسام تحت کنترل است. برای مورد بخصوص تعیین قطر، باید عرض فریز تشکیل‌شده را به‌شکل دقیق اندازه‌گیری کنیم و با واردکردن مقادیر مشخص فاصله‌ی پرده تا تار نوری و نیز طول‌موج منبع نور تابیده‌شده، نرم‌افزار قادر به محاسبه‌ی یک عدد به‌عنوان قطر تار نوری با استفاده از رابطه‌ی (۴) خواهد بود. بنابراین کیفیت تصویر ثبت‌شده از

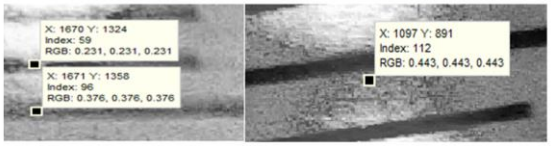
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-11-12]

الگوی پراش، به‌عنوان مرجع محاسبات یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در دقت اندازه‌گیری است. در این‌کار از مسدودنمودن بخشی از نور پراشیده‌شده برای افزایش تباین تصویر استفاده‌شد. نکته‌ی مهم بعدی در دقت قطر به‌دست‌آمده، انتخاب کمینه‌های مناسب جهت اندازه‌گیری فاصله و استفاده در محاسبات رابطه‌ی (۴) می‌باشد. به دلیل استفاده از پرده‌ی تخت مطلوب است که از اندازه‌گیری فریز مرکزی استفاده کنیم. اما از طرفی فریز مرکزی ازلحاظ وضوح و اندازه، به‌ویژه در صورت استفاده از روش سد نور، قابل‌اطمینان نیست. بنابراین باید فریز دیگری را انتخاب و تغییر ایجادشده در عرض آن، به دلیل استفاده از پرده‌ی تخت، را در محاسبات لحاظ کنیم. در این کار از اندازه‌ی فریز اول در محاسبات استفاده‌شده است. شکل ۶ بخش مطلوب تصویر، شامل فریز اول به‌علاوه‌ی نیمی از فریز مرکزی و نیمی از فریز دوم، ثبت‌شده از نقش پراش تار نوری موردبررسی در آزمایشگاه با استفاده از لیزر He-Ne و با مسدود کردن نیمی از نور پراشیده شده را نشان می‌دهد. - همان‌گونه که می‌دانیم، از روی تصویر تنها می‌توان به فاصله-ی پیکسلی دونقطه دست‌یافت. برای تبدیل فاصله‌ی دو پیکسل به فاصله‌ی متری دو نقطه دو روش وجود دارد. درروش اول یک خط‌کش نیز در کنار طرح پراش قرارگرفته و فاصله‌ی پیکسلی نقاط موردنظر بافاصله‌ی پیکسلی شاخص‌های خط‌کش مقایسه می‌شود. درروش دوم ابتدا دوربین را در مکان مناسب قرار داده و بدون تشکیل الگوی پراش تنها از خط‌کش یک تصویر می‌گیریم و فاصله‌ی پیکسلی دو خط

شکل ۶: نحوه‌ی انتخاب بخش مناسب تصویر برای تعیین فاصله‌ی نقاط کمینه.

شاخص را در تصویر مربوط به خط‌کش تعیین می‌کنیم. حال معیار را از صحنه حذف کرده و تنها با حضور طرح پراش تصویر را ثبت می‌کنیم. پردازش تصاویر حاصل را با استفاده از نرم‌افزار متلب انجام داده‌ایم. برای این کار ابتدا تصویر را به مقیاس خاکستری برده و محل دقیق دو پیکسل متوالی با کمینه‌ی روشنایی را در تصویر پیدا می‌کنیم. با تکرار همین عمل برای تصویر خط‌کش ضریب تناسب لازم برای تبدیل فاصله‌ی پیکسلی به فاصله‌ی طولی به‌راحتی حاصل خواهد شد. درنهایت از قرار دادن این مقدار در رابطه‌ی (۴) (با مقدار a=1) به‌سادگی قطر تار نوری محاسبه می‌گردد. شکل ۷ نمونه‌ای از تصویر ثبت‌شده از طرح پراش در مقیاس خاکستری را نشان می‌دهد. با این روش قطر تار نوری دارای غلاف با مقدار اسمی ۲۵۰ میکرومتر را ۲۴۸/۲ میکرومتر و قطر همان تار نوری پس از برداشتن غلاف با مقدار واقعی ۱۲۵ میکرومتر (اندازه‌گیری شده با میکروسکوپ) را ۱۲۳/۲۴ میکرومتر تعیین کردیم. لازم به ذکر است که، مقادیر ارائه‌شده به‌عنوان قطر درواقع حاصل میانگین‌گیری بر روی نتایج حاصل از پردازش پنج تصویر ثبت‌شده از هر تار نوری می‌باشند. بازه‌ی تغییرات مقادیر حاصل از پردازش تصاویر مختلف برای تار نوری دارای غلاف و بدون غلاف به‌ترتیب برابر با ۲/۳ و ۴/۲ میکرومتر می‌باشند.



(ب) (الف)

شکل ۷: (الف) پیدا کردن دو کمینه‌ی متوالی در تصویر (ب) محاسبه‌ی ابعاد نسبی هر پیکسل نسبت به معیار.

۵- نتیجه‌گیری

در این کار از پردازش نقش پراش حاصل از برخورد نور لیزر به یک تار نوری برای اندازه‌گیری قطر آن باوجود غلاف و پس از برداشتن غلاف استفاده‌شده است. دقت اندازه‌گیری بستگی به مواردی همچون دقت کالیبره کردن تصویر، انتخاب بخش مناسب تصویر برای پردازش و نیز وضوح تصویر دارد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری لیزری نزدیکی بسیار خوبی را به مقادیر واقعی نشان می‌دهند.

مراجع

[1] S. A. Khodier, "Measurement of wire diameter by optical diffraction", Optics & Laser Technology, Vol. 36, No.1, pp. 63 – 67, 2004.
[2] D. Butler and G. Forbes, "Fiber-diameter measurement by occlusion of a Gaussian beam", Appl. Opt. , Vol. 37, No.13, pp. 2598-25606, 1998.
[3] Eu. Hecht, *Optics*, Addison-Wesley, 2002.
[4] Y. Wu, J. Ma and Y. Yang, "Improvements of measuring the width of Fraunhofer diffraction fringes using Fourier transform", Optik, Vol. 126, No.23, pp. 4142–4145, 2015.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-11-12]