بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۲-۱۴ بهمن ۱۴۰۰

اندازه گیری پروفایل ضریب شکست فیبر نوری نازک شده حسگر گاز هیدروژن

نفیسه حدیدی، محمدرضا جعفرفرد و محمد واحدی

دانشکده فیزیک دانشگاه علم و صنعت ایران

hadidi.n.۲۸۱۰۷@gmail.com; mr_jafarfard@yahoo.com ⁕; mvahedi@iust.ac.ir

چکیده – در این مقاله از یک نمونه فیبر نوری تک مد نازک شده با روش گرما-کششی، که در ساخت حسگر گاز هیدروژن به کار می رود، با به کارگیری روش میکروسکوپ فازی هیلبرت تصویربرداری شده است. با پردازش تصاویر حاصل در محیط نرم افزار MATLAB، پس از تعیین فاز به دست آمده برای فیبر، یک ماتریس سه بعدی با استفاده از تصویر فاز فیبر ساخته میشود. با اعمال معکوس تبدیل رادون بر این ماتریس، پروفایل ضریب شکست فیبر قابل دسترس خواهد بود.

کلید واژه- تبدیل رادون، حسگر گاز هیدروژن، فیبر نوری نازک شده، قضیه برش فوریه، میکروسکوپ فازی هیلبرت.

Refractive index profile characterization for tapered optical fiber Hydrogen gas sensor

N. Hadidi، MR. Jafarfard ،and M. Vahedi

School of Physics، Iran University of Science and Technology (IUST)، Narmak، Tehran

hadidi.n.۲۸۱۰۷@gmail.com; mr_jafarfard@yahoo.com ; mvahedi@iust.ac.ir

Abstract- In this paper، a single-mode tapered optical fiber sample، which is used for hydrogen gas sensing، is imaged using the Hilbert phase microscope method. By processing the resulting images in MATLAB software environment، after determining the phase obtained for the fiber، a three-dimensional matrix is created using the fiber phase image. By using the inverse radon transformation on the obtained matrix، the fiber refractive index profile will be accessible.

Keywords: Radon transformation، Tapered Optical fiber، Fourier slice theorem، Hilbert phase microscopy، Hydrogen Sensor.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-31]

مقدمه

امروزه استفاده از گاز هیدروژن به عنوان یک منبع سوخت پاک و سازگار با محیط زیست مورد توجه است. از طرفی تنها با انتشار حدود ۴٪ آن در محیط، انفجار مهیبی رخ میدهد. بنابراین ذخیره سازی و حمل و نقل گاز هیدروژن یکی از عمده مسائل و مشکلات آن است. همچنین این گاز بدون رنگ و بو است و امکان شناسایی آن بدون حسگر امکان پذیر نمی باشد. اخیراً حسگر گاز هیدروژن مبتنی بر فیبر نوری در صنعت هوا-فضا و همچنین برای کاربردهای انرژی پاک به کار گرفته شده است [۱].

فیبرهای نوری به جهت حساسیت بالا، زمان پاسخ کم و ایمن بودن گزینه مناسبی برای ساخت حسگرها هستند [۲]. با نازک کردن فیبر، فیبر نسبت به محیط اطراف حساسیت پیدا خواهد کرد [۳]. همین ویژگی در ساخت حسگر گاز هیدروژن مبتنی بر فیبر نوری نازک شده مورد استفاده قرار گرفته است.

روش‌های متفاوتی اعم از شیمیایی و گرما-کششی برای نازک‌سازی فیبر استفاده می‌شود. در روش گرما-کششی، بخشی از فیبر تا نزدیک نقطه ذوب گرم می‌شود و همزمان فیبر از طرفین کشیده می‌شود که این کار پیچیدگی‌های خاص خود را دارد. اما نکته مهم این است که پروفایل فیبر نازک شده تاثیر زیادی بر حساسیت حسگر ساخته شده بر مبنای این فیبر را دارد.

تاکنون تکنیک‌های مختلف زیادی برای اندازه گیری پروفایل ضریب شکست موجبرها و فیبرهای نوری گزارش شده است [۸-۴]. روش میکروسکوپ فازی هیلبرت به دلیل دقت بالا، سرعت زیاد و عدم تخریب فیبر حین اندازه گیری و همچنین امکان استخراج فاز نمونه تنها با ثبت یک تصویر، مزیت بیشتری نسبت به سایر تکنیک‌ها دارد [۹].

بر همین اساس در این مقاله با به کارگیری روش میکروسکوپ فازی هیلبرت از یک نمونه فیبرنوری تک مد نازک شده با روش گرما-کششی، که در ساخت حسگر گاز هیدروژن به کار می‌رود، تصویربرداری شده است که با پردازش تصاویر حاصل در محیط نرم افزار MATLAB، پروفایل ضریب شکست مربوط به قسمت غیر نازک آن به دست آمده است.

کارهای محاسباتی

در سیستم های تصویربرداری فازی کمی، فاز اندازه گیری شده میتواند با رابطه (۱) بیان شود:

$$\varphi(x,y)=\frac{2\pi}{\lambda}\int \delta n(x,y,z)\, dx \qquad (1)$$

که در آن λ طول موج منبع نور و $\delta n(x,y,z)$ اختلاف توزیع فضایی ضریب شکست سه بعدی بین نمونه و محیط اطراف آن است.

در یک بازسازی توموگرافیک استاندارد باید توزیع سطحی فاز دو بعدی را برای جهت گیری های مختلف نمونه ثبت کرد به گونه ای که ۱۸۰° را پوشش دهد.

بر اساس قضیه برش فوریه، جمع تبدیل فوریه فاز در همه جهات معادل ضریب شکست سه بعدی در صفحه فوریه است. بنابراین با استفاده از معکوس تبدیل فوریه، ضریب شکست سه بعدی نمونه به دست می‌آید:

$$n(x,y,z)=\frac{\lambda}{2\pi}\, FT^{-1}\sum_{\theta=0}^{180} FT\left(\varphi_\theta(x,y)\right) \qquad (2)$$

که در آن FT تبدیل فوریه و $\varphi_\theta(x)$ فاز اندازه گیری شده در زاویه θ می‌باشد.

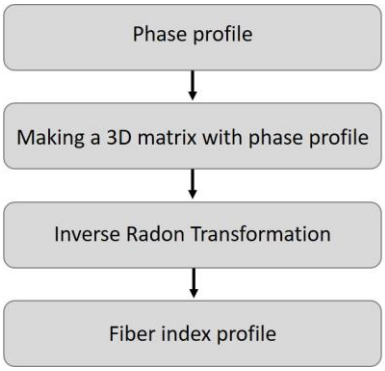
این‌تکنیک، تکنیک شناخته شده‌ای در تصویربرداری توموگرافیک می‌باشد [۱۰].

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-31]

کارهای تجربی

محاسبات توضیح داده شده برای به دست آوردن پروفایل ضریب شکست می‌تواند با استفاده از معکوس تبدیل رادون در محیط نرم افزار متلب انجام شود.

شکل (۱)، روند به دست آوردن پروفایل ضریب شکست از تصویر فاز فیبرنوری در محیط نرم افزار MATLAB را نشان می‌دهد.



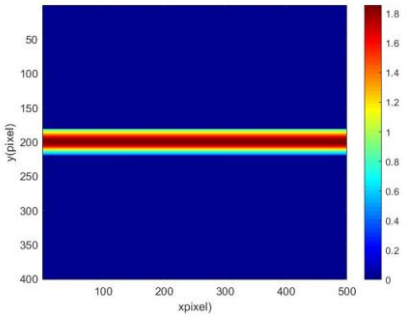
شکل (۱) روند به دست آوردن پروفایل ضریب شکست از تصویر فاز فیبر نوری در محیط نرم افزار MATLAB.

پس از تعیین فاز به دست آمده برای فیبر، یک ماتریس سه بعدی با استفاده از آن ساخته می‌شود. با اعمال معکوس تبدیل رادون بر این ماتریس، پروفایل ضریب شکست فیبر قابل دسترس خواهد بود.

روش مورد استفاده ما برای اندازه گیری پروفایل فازی نمونه در این پژوهش روش میکروسکوپ فازی هیلبرت می‌باشد. در این روش، بر اساس رابطه هیلبرت بین قسمت حقیقی و موهومی یک سیگنال تحلیلی مختلط، اطلاعات فازی اجسام به صورت عددی استخراج می‌شوند.

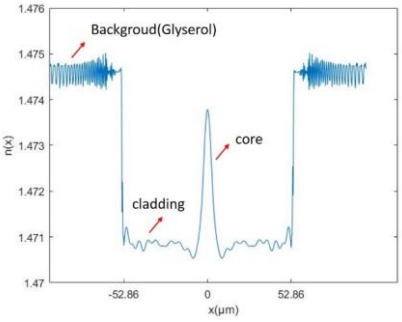
در این مقاله از یک نمونه فیبر نوری تک مد (مدل SMF۲۸) نازک شده با روش گرما-کششی، جهت تصویربرداری استفاده شده است. فیبر در گلیسرول غوطه ور شده است تا جسم فازی بهتری باشد.

تصاویر طرح تداخلی ثبت شده، دربردارنده فاز نمونه می‌باشند. بنابراین با پردازش این تصاویر در محیط نرم افزار متلب، فاز نمونه قابل دسترسی است. شکل (۲) فاز کمی استخراج شده قسمت نازک شده نمونه را نشان می‌دهد.



شکل (۲) فاز کمی استخراج شده قسمت نازک شده نمونه.

در ادامه به تحلیل نتایج حاصل پروفایل ضریب شکست فیبر نمونه در محیط نرم افزار متلب می‌پردازیم.

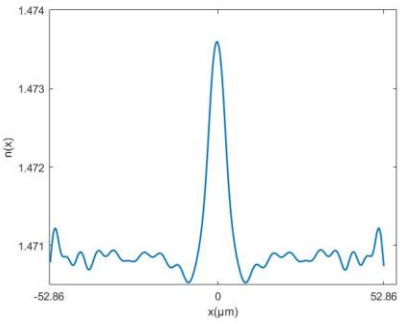


شکل (۳) پروفایل ضریب شکست به دست آمده از پروفایل فاز قسمت غیر نازک یک فیبر نوری تک مد نازک شده

شکل (۳) پروفایل ضریب شکست به دست آمده از پروفایل فاز قسمت غیرنازک را نشان می‌دهد. همانطور که انتظار

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-31]

داشتیم ضریب شکست محیط غوطه وری که در اینجا گلیسرول (n=۱,٤٧٤) است، بیشتر از ضریب شکست فیبر می‌باشد.



شکل (۴) پروفایل ضریب شکست قسمت غیر نازک یک فیبر نوری تک مد نازک شده

غلاف فیبر ترکیبی از جنس سیلیکا با ضریب شکست ثابت و شناخته شده است اما ضریب شکست هسته فیبر متغیر می‌باشد، همانطور که ملاحظه میکنیم شکل (۴) موید همین مطلب است. علت تغییرات تدریجی در هسته فیبر، عملیات حرارتی در حین نازک سازی می باشد که باعث در هم رفتن قسمت های با ضریب شکست زیاد (هسته) و ضریب شکست کم (پوسته) می شود.

لازم به ذکر است دستگاه مورد استفاده در اینجا قبلا با اندازه گیری نمونه های مشخص کالیبره شده است [۴].

نتیجه گیری

در این مقاله از یک نمونه فیبرنوری تک مد (مدل SMF۲۸) نازک شده جهت تصویربرداری با روش میکروسکوپ فازی هیلبرت استفاده شده است. با پردازش تصاویر حاصل در محیط نرم افزار MATLAB، پروفایل ضریب شکست فیبر به دست آمد. غلاف فیبر ترکیبی از سیلیکا با ضریب شکست ثابت و شناخته شده است اما ضریب شکست هسته فیبر متغیر می‌باشد، نتایج به دست آمده در اینجا موید همین مطلب است.

مرجع‌ها

[۱] علی ریاحی، مهدی حیدری داینی، محمد واحدی، جواد خلیل زاده، یدالله شهامت، " شبیه سازی و ساخت حسگر فیبر نوری نازک شده جهت آشکارسازی هیدروژن"، نشریه علمی-پژوهشی «الکترومغناطیس کاربردی »سال پنجم، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۹۶؛ ص ۲۱- ۱۵.

[۲] M. Pospíšilová, G. Kuncová, J. Trögl, Fiber-Optic Chemical Sensors and Fiber-Optic Bio-Sensors, Sensors, ۱۵, ۲۵۲۰۸-۲۵۲۵۹ (۲۰۱۵).

[۳] K. Mullaney, The fabrication of micro-tapered optical fibres for sensing application, PhD Thesis, Centre for Engineering Photonics, School of Aerospace, Transport and Manufacturing, Cranfield University,۲۰۱٦

[٤] M. R. Jafarfard and M. H. Mahdieh, Characterization of Optical Fiber Profile Using Dual-Wavelength Diffraction Phase Microscopy and Filtered Back Projection Algorithm, Optik ۱٦۸, ٦۱۹ (۲۰۱۸).

[٥] Corle T R and Kino G S, Confocal Scanning Optical Microscopy and Related Imaging Systems (San Diego: Academic), (۱۹۹٦).

[٦] A. Roberts, E. Ampem-Lassen, A. Barty, K. A. Nugent, G. W. Baxter, N. M. Dragomir, and S. T. Huntington, Refractive-Index Profiling of Optical Fibers with Axial Symmetry by Use of Quantitative Phase Microscopy, Opt. Lett. ۲۷, ۲۰٦۱ (۲۰۰۲).

[۷] D. J. Butler, K. A. Nugent, and A. Roberts, Characterization of Optical Fibers Using Near-field Scanning Optical Microscopy, Journal of Applied Physics ۷٥, ۲۷٥۳ (۱۹۹٤).

[۸] Y. Park, N. H. Seong, Y. Youk, and D. Y. Kim, Simple Scanning Fibre-Optic Confocal Microscopy for the Refractive Index Profile Measurement of an Optical Fibre, Meas. Sci. Technol. ۱۳, ٦۹٥ (۲۰۰۲).

[۹] T. Ikeda, G. Popescu, R. R. Dasari, and M. S. Feld, Hilbert Phase Microscopy for Investigating Fast Dynamics in Transparent Systems, Opt. Lett. ۳۰, ۱۱٦٥ (۲۰۰٥).

[۱۰] A.C. Kak, M. Slaney, Chap. ۳, in: Principles of Computerized Tomographic Imaging (Society for Industrial and Applied Mathematics, ۲۰۰۱.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-31]

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-31]