بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۴-۱۲ 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

حسگرفیبرنوری فابری-پرو برای اندازه‌گیری تخلیه جزئی

علی اوجاقلو[1*]، رحمان نوروزی[1]

[1]دانشکده فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان کد پستی ۴۵۱۹۵-۶۶۷۳۱

چکیده – دراین مقاله، یک آشکارساز تخلیه جزئی با استفاده ازحسگر فیبر نوری غیرذاتی بر پایه‌ی تداخل‌سنجی فابری- پرو گزارش می‌شود. دیافراگم این حسگر با استفاده از پلی تترافلئوروواتیلن ساخته شده است. بر این اساس دیافراگم ساخته شده از این ماده بدلیل دارا بودن مدول یانگ کمتر در مقایسه با سیلیکا دارای حساسیت بالاتری برای آشکارسازی موج‌های فراصوتی ناشی از تخلیه جزئی است. سر حسگر فیبر نوری یک کاواک فابری- پرو متشکل از یک دیافراگم با لایه نشانی نانوذرات نقره می‌باشد که در یک انتهای فیبرنوری تک مد قرار می‌گیرد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهدکه حسگر مبتنی بر دیافراگم پلی تترافلئوروواتیلن داری حساسیت [µm/kPa] ۵/۴ می‌باشد، که یکصد مرتبه بهتر از حسگرهای مبتنی بر دیافراگم سیلیکایی است.

کلید واژه- تخلیه‌ی جزئی، پلی تترافلئوروواتیلن ، تداخل‌سنج فابری_پرو، ، فیبرنوری تک مد.

Fiber Fabry– Perot sensors for detection of partial discharge

Ali Ojaghloo[1*], Rahman Nouroozi[1]

[1]Department of Physics, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, PO Box 45195-1159, Zanjan, Iran

Abstract – In this paper an extrinsic Fabry-Perot based optical fiber sensor for partial discharge detection is reported. The diaphragm of sensor is fabricated using polytetrafluoroethylene. Due to the lower Young's modulus of the polytetrafluoroethylene in comparison with the silica, polytetrafluoroethylene-based diaphragm has high sensitivity for ultrasound detection caused by partial discharge. The sensor head is a Fabry-Perot cavity including polytetrafluoroethylene-based diaphragm coated with nano silver particles and is placed in one end facet of a single fiber. The results show that the polytetrafluoroethylene based sensor has a sensitivity of ~ 5.4 [µm/kPa] which is ~100 times higher than the silica-based sensor.

Keywords: Partial discharge, polytetrafluoroethylene, Fabry-perot (FP) interferometry, Single mode fiber.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]

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

۱- مقدمه

ترانسفورماتورهای قدرت از اساسی‌ترین وگران‌قیمت‌ترین تجهیزات صنعت برق قدرت می‌باشند. وجود تخلیه جزئی نشانگر احتمال وقوع شکست عایقی است که به نوبه خود باعث بروز خسارات جبران‌ناپذیری به شبکه برق می‌شود. بواسطه ایجاد هر تخلیه‌ی جزئی طیف گسترده‌ای از امواج الکترومغناطیسی و صوتی تولید می‌شود. همچنین تخلیه‌ی جزئی باعث تولید گازهای شیمیایی در اثر اندرکنش (اکسایش) با محیط اطراف خود می‌شود. برای اندازه‌گیری این پدیده مطالعات گسترده‌ای انجام گرفته‌است و استفاده از روش‌های اندازه‌گیری شیمیایی، الکتریکی وآکوستیکی مرسوم‌اند، که هرکدام از آنها دارای معایبی هستند[۱]. حسگرهای الکتریکی ممکن است که در شرایط آزمایشگاهی نسبت به اندازه‌گیری‌های شیمیائی و آکوستیکی دقیق‌تر باشند اما به‌دلیل وجود تداخل‌های الکترومغناطیسی شدید در ترانسفورماتورها و تجهیزات مرتبط، کالیبراسیون دقیق و قابل اعتماد برای اینگونه حسگرها دشوار است[۲].

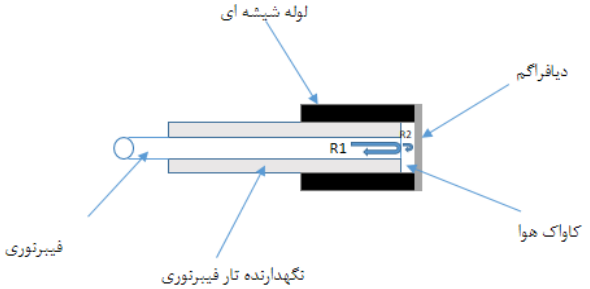
حسگرهای پیزوالکتریک با وجود حساسیت بالا توانایی دریافت کامل طیف صوتی ناشی از پدیده تخلیه جزئی را دارا نمی باشند. همچنین روش‌های شیمیائی موجود که برای اندازه‌گیری این پدیده مورد استفاده قرار می‌گیرند به‌دلیل زمان بر بودن برای اندازه‌گیری گازهای آزاد شده از تخلیه جزئی تا زمانی که قابل آشکارسازی در آنالیز روغن باشند کارای چندانی را نخواهند داشت. برای حل تمام این عیب‌ها و حل مشکل تعیین محل دقیق وقوع تخلیه جزئی در این مقاله حسگر فیبرنوری بر پایه تداخل‌سنجی فابری-پرو پیشنهاد شده است. این حسگر علاوه برمصونیت از تداخل‌های الکترومغناطیسی، دارای مزایایی شامل برخط بودن و تشخیص سریع محل وقوع تخلیه را دارا می‌باشد.

حسگر فیبرنوری برپایه‌ی میکرو کاواک تداخل‌سنجی فابری–پرو استفاده گسترده‌ای در اندازه‌گیری فشار و امواج فرا صوت دارد. در مقایسه با حسگرهای الکتریکی و شیمیایی مرسوم، حسگرهای فیبرنوری دارای مزیت‌هایی مانند اندازه کوچک، عدم بروز تداخل ناشی از امواج الکترومغناطیسی، حساسیت بالا، پاسخ بسامدی مناسب در گستره وسیعی از طیف تخلیه جزئی هستند [۳و۵].

حسگر گزارش شده در این مقاله از نوع حسگرهای غیرذاتی فیبری است. دیافراگم ساخته شده بر اساس تشدیدگر فابری-پرو قابلیت اندازه‌گیری فشار ناشی از صوت ایجاد شده در محیط را دارا می‌باشد. با وجود اینکه روش‌های مختلفی با استفاده از پلیمر، سیلیکا، سلیکون، گرافین و... در ساختن دیافراگم این نوع حسگرها استفاده شده است [۶و۷]، دیافراگم ساخته شده برای حسگر گزارش شده در این مقاله حساسیت و پاسخ بسامدی به‌مراتب مناسب‌تری نسبت به سایر حسگرهای مشابه داراست.

۲- مبانی نظری

سر حسگر فیبرنوری مبتنی بر تداخل سنجی فابری-پرو، شامل فیبرنوری تک مد، کاواک هوا و دیافراگم می‌باشد. شکل ۱ شمایی از سر حسگر ساخته شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱: طرح کلی سر حسگر تداخل‌سنجی فابری-پرو مبتنی بر دیافراگم پلی تترافلورواتیلن (ورقه نازک تفلون).

نور خارج شده از فیبر نوری بعد از بازتابش از دیافراگم میتواند دوباره به فیبر نوری برگردد. حاصل جمع میدان الکتریکی این نور و مد برگشتی بواسطه بازتاب از انتهای فیبر تشکیل تداخل بین نور برگشتی از دیافراگم و مد انتشاری برگشتی در فیبر را می‌دهد. حال اگر دیافراگم بواسطه عوامل محیطی دچار تغییر شود میزان نور برگشتی از آن به فیبر و در نتیجه تداخل شکل گرفته دچار اختلال خواهد شد. بدین وسیله می‌توان عوامل محیطی مؤثر بر دیافراگم را با استفاده از تغییرات شدت ثبت شده اندازه‌گیری نمود. شدت بازتاب شده و قابل ثبت درآشکارساز با معادله زیر بیان می‌شود[۳]:

$$I_r(\lambda)=\frac{R_1+R_2-2\sqrt{R_1R_2}\cos\varphi}{1+R_1R_2-2\sqrt{R_1R_2}\cos\varphi}I_i(\lambda) \qquad (۱)$$

که در آن I_i و I_r به‌ترتیب شدت نور فرودی و بازتابی، R_1 بازتاب از انتهای فیبرنوری، R_2 بازتاب از دیافراگم لایه نشانی شده با نانوذرات نقره و λ طول موج مرکزی نور فرودی هستند. φ فاز نسبی مابین نور بازتابی از دیافراگم و مد بازتابی از انتهای فیبر نوری می‌باشد. این فاز در کاواکی از هوا به طول l به صورت زیر بیان شود.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]

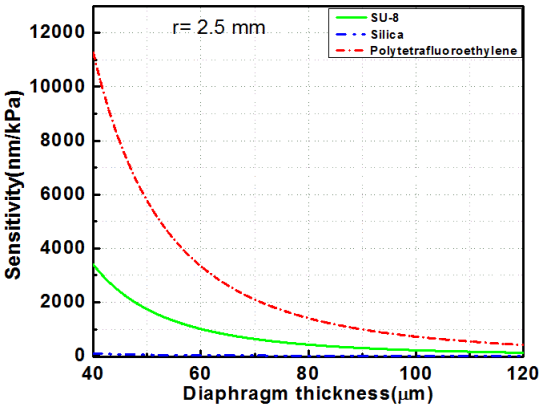
$$\varphi = \frac{4\pi l}{\lambda} \qquad (۲)$$

فشار ناشی از موج صوتی روی دیافراگم باعث تعدیل طول کاواک فابری- پرو می‌شود. بنابراین فاز نسبی معرفی شده در رابطه (۲) تغییر کرده و در نهایت شدت ثبت شده دچار تغییر می‌شود. با اعمال تبدیل فوریه از شدت ثبت شده در واحد زمان اطلاعاتی از بسامد صوت برخوردی به دیافراگم بدست می‌آید.

برای حسگرهای فیبر نوری غیرذاتی با استفاده از تداخل سنجی فابری-پرو حساسیت دیافراگم بر واحد فشار از رابطه زیر بدست می‌آید[۴].

$$\eta = \frac{dl}{dp} = \frac{3\left(1-\upsilon^2\right)r^4}{16Et^3} \qquad (۳)$$

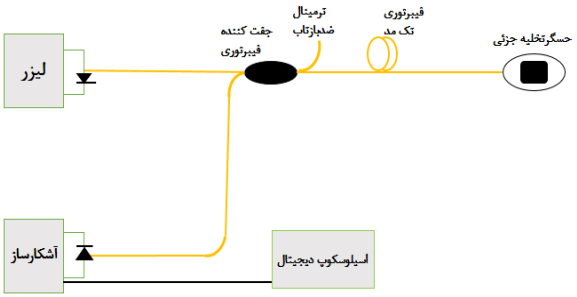
در این رابطه p فشار، υ آهنگ پواسون، E مدول یانگ، r شعاع موثر دیافراگم، t ضخامت دیافراگم می‌باشند. با جاگذاری مقادیرمربوط به دیافراگم مورد استفاده در این پژوهش $\eta = 273\times10^6 \frac{r^4}{t^3}(nm/kPa)$ بدست می‌آید. این مقدار برای فوتورزیست SU-8 و سیلیکا در مقالات قبلی به ترتیب $2.5\times10^6 \frac{r^4}{t^3}(nm/kPa)$ و $89.2\times10^6 \frac{r^4}{t^3}(nm/kPa)$ گزارش شده است[۱و۲]. درشکل۳، حساسیت سه دیافراگم ذکر شده برحسب ضخامت آنها رسم شده است.



شکل ۲: نمودار حساسیت محاسبه شده دیافراگم به شعاع ۲/۵ میلیمتر بر حسب ضخامت آن برای سه دیافراگم ساخته شده از سیلیکا (نمودار آبی)، فوتورزیست SU-8 (نمودار سبز) و پلی‌تترافلئوروواتیلن (نمودار قرمز).

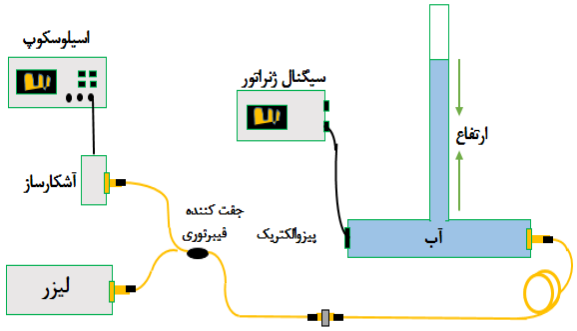
۳- شرح آزمایش و نتایج

شکل ۳، شمای کلی از چیدمان آزمایش را نمایش می‌دهد. نور لیزر نامرئی با طول موج ۱۵۵۰ نانومتر پس از گذر از جفت کننده فیبرنوری، از طریق فیبرنوری تک مد وارد قسمت حس‌کننده می‌شود. نور از انتهای فیبرنوری و دیافراگم ساخته شده با لایه نشانی نانو ذرات نقره بازتاب می‌شود. نورهای بازتابی از تداخل سنج فابری-پرو درمسیر برگشت از طریق جفت کننده فیبرنوری به آشکارساز رسیده و در آنجا شدت بازتابی بر حسب زمان توسط اسیلوسکوپ ۱۰۰ مگاهرتزی ثبت می‌شود. سیگنال‌های ثبت شده برای آنالیز وارد رایانه می‌شود.



شکل ۳: شمای کلی چیدمان حسگر غیرذاتی فیبر نوری با استفاده از تداخل سنجی فابری-پرو: لیزر، آشکارسازنوری، اسیلوسکوپ، جفت کننده فیبرنوری، فیبرنوری تک مد وسرحسگر که دیافراگم در آن قراردارد.

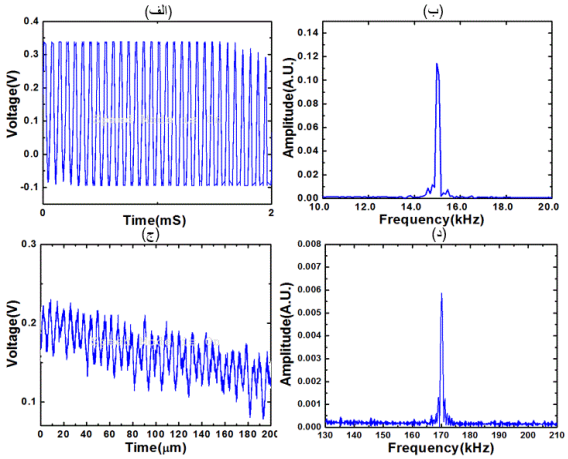
قبل از آزمایش اندازه‌گیری تخلیه جزئی، حسگر ساخته شده در چیدمانی که شمایی از آن در شکل ۴ آمده است مورد آزمایش قرار می‌گیرد تا بدین وسیله از عملکرد دقیق آن در بسامدهای مختلف اطمینان حاصل گردد. در این آزمایش بسامدهای مختلف موج صوتی با استفاده از یک تولید کننده سیگنال و یک ارتعاش‌گر پیزو تولید می‌شوند. به منظور شبیه سازی شرایط ترانسفورماتور حسگر و منبع صوتی در داخل مخزن آب غوطه‌ور هستند. نتایج حاصل از این آزمایش برای بسامدهای گوناگون در شکل ۵ آمده است.



شکل ۴: نمایی از چیدمان آزمایشگاهی حسگر برای تست عملکرد آن. شامل: لیزر، آشکارسازنوری، اسیلوسکوپ، جفت کننده فیبرنوری، فیبرنوری تک مد، تولید کننده سیگنال، ارتعاش‌گر پیزو و مخزن آب.

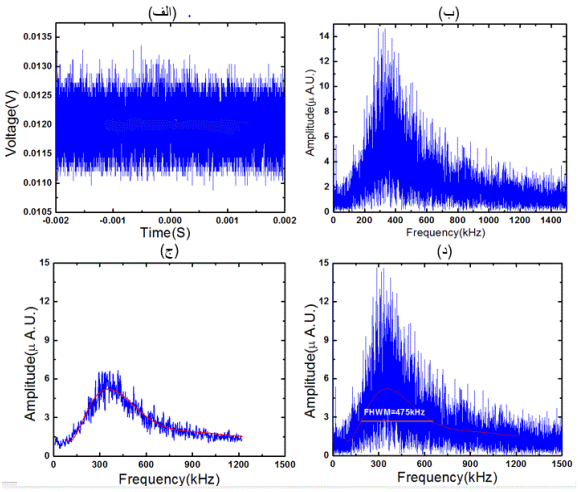
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]



شکل ۵: (الف)، سیگنال ثبت شده توسط اسیلوسکوپ با فرکانس kHz ۱۵ (ب)، طیف فوریه‌ی مربوط به سیگنال دریافتی حسگر از فرکانسkHz ۱۵(ج)، سیگنال ثبت شده توسط اسیلوسکوپ با فرکانس مشخصkHz ۱۷۰ (د)، طیف فوریه‌ی مربوط به سیگنال دریافتی حسگر از فرکانس kHz ۱۷۰.

سپس حسگر ساخته شده به منظور اندازه‌گیری موج صوتی ناشی از تخلیه جزئی استفاده شد که نتایج آن در شکل ۶ نشان داده شده است. شکل ۶- الف، سیگنال موج صوتی تخلیه جزئی ثبت شده توسط حسگر فیبر نوری را نشان می‌دهد. شکل ۶- ب طیف بسامد ناشی از تبدیل فوریه‌ی مربوط به سیگنال صوتی تخلیه جزئی، ۶- ج میانگین داده ها جهت برازش و ۶- د پهنای باند موجود در تخلیه جزئی ثبت شده توسط حسگر را نشان می‌دهند.



شکل ۶: الف: موج صوتی ناشی از تخلیه جزئی ثبت شده توسط حسگر فیبر نوری فابری- پرو، ب: طیف بسامد بدست آمده از تبدیل فوریه‌ی مربوط به الف، ج: میانگین‌گیری روی داده‌ها بمنظور برازش محنی، د: پهنای باند موجود در تخلیه جزئی.

۴- نتیجه‌گیری

گزارشی از ساخت و آزمایش یک حسگر غیرذاتی فیبر نوری با استفاده از روش تداخل‌سنجی فابری- پرو ارائه شده است. ساخت دیافراگم حسگر فیبر نوری با استفاده از فیلم نازک پلی‌ترافلئورواتیلن و لایه‌نشانی نانو ذرات نقره صورت گرفته است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد حساسیت حسگر ساخته شده تقریبا ۳/۵ برابر بهتر از نمونه‌های گزارش شده‌ی قبلی است [۲]. همچنین این حسگر توانایی کارکرد در پهنای بسامدی تا kHz ۴۷۵ را داراست. نتایج اندازه‌گیری موج صوتی ناشی از تخلیه جزئی با استفاده از حسگر ساخته شده در این مقاله آمده است.

مراجع

[1] Bing Yu et al. App. Opt., 3241–3250,2003.
[2] Shang Ya-na, et al. Opt,, Vol.11 No.1, 1 January 2015.
[3] Heavens O. S., Optical Properties of Thin Solid Films,Courier Dover Publications, 1991.
[4] Giovanni D., Flat and Corrugated Diaphragm Design , Handbook, CRC Press, 1982.
[5] H. Bae and M. Yu, Optics Express 20, 14573, (2012).
[6] Qiaoyun Wang, et al , Sensors and Actuators B: Chemical 153 , 214(2011).
[7] WANG Wei, WANG Zan, WU Yankun, DU Jiazhen and,LI Fuping, High Voltage Engineering 40, 814(2014).

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]