



بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک  
ایران و دوازدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری  
فوتونیک ایران،  
دانشگاه خوارزمی،  
کرج، ایران.  
۱۶-۱۵ بهمن ۱۳۹۸



## طراحی و تحلیل سنسور نوری مبتنی بر فیبر کریستال فوتونی جهت کنترل دمای روغن ترانسفورماتور

میر وحید کاظمپور، حمید واحد

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده - روغن ترانسفورماتور یکی از بخشهای مهم ترانسفورماتورها در صنعت برق است که وظیفه عایق سازی چنبره ترانسفورماتور و خنک کنندگی دمای ترانسفورماتورها از طریق هدایت گرما را برعهده دارد. بدیهی است جهت عملکرد صحیح این روغن نیاز است که کیفیت آن از طریق اندازه گیری مشخصات فیزیکی اش همچون ضریب شکست، بطور منظم کنترل گردد. یکی از روش های کنترل در این زمینه، استفاده از سنسورهای نوری است. در این مقاله، یک سنسور نوری مبتنی بر فیبر کریستال فوتونی طراحی شده است که میتواند براساس تغییرات ضریب شکست روغن، دمای روغن را در بازه ۲۵ تا ۵۰ درجه سلسیوس تعیین کند. همچنین نتایج ما نشان می دهد که در ساختار متشکل از لایه های طلا، تیتانیوم و تک لایه گرافن بیشترین حساسیت نسبی سنسور پیشنهادی،  $6095 \text{ nm} / \text{RIU}$  است.

کلید واژه- سنسور، تلفات، حساسیت، روغن، فیبر کریستال فوتونی

## Design and Analysis of Photonic Crystal Fiber Based Optical Sensor to Control the Temperature of the Transformer Oil

Mir Vahid Kazempour, Hamid Vahed

Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract- Transformer oil is one of the most important parts of transformers in the power industry, which is responsible for insulating the transformer Coils and cooling the transformer temperature through heat conduction. Of course, for this oil to function properly, its quality needs to be regularly monitored by measuring its physical properties such as refractive index. One of the control methods in this field is the use of optical sensors. In this paper, an optical sensor based on a photonic crystal fiber is designed that can determine the oil temperature in the range of 25 to 50 °C based on changes in the oil refractive index. Our results also show that in the structure consisting of gold, titanium and graphene monolayer the most relative sensitivity of the proposed sensor is 6095 nm/RIU.

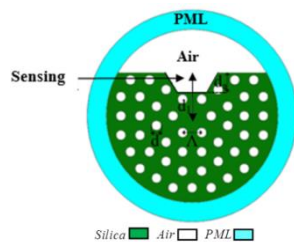
Keywords: Sensor, Losses, Sensitivity, Oil, Photonic Crystal Fiber.

## ۱. مقدمه

خصوصیاتی مانند حساسیت، دقت و تلفات را فراهم می نماید. لذا در این مقاله یک سنسور D-PCF شکل مبتنی بر PCF پیشنهاد شده است که با کمک تشدید پلاسمونهای سطحی، تلاش می شود حساسیت سنسور در تعیین دمای روغن داخل ترانسفورماتور که از طریق سنجش ضریب شکست روغن انجام می شود، افزایش یابد. محاسبات و شبیه سازیهای مربوطه به روش FDTD با استفاده از نرم افزار لومریکال صورت گرفته است.

## ۲. ساختار سنسور پیشنهادی

ساختار پیشنهادی برای سنسور نوری مبتنی بر PCF در شکل (۱) بصورت شماتیک نشان داده شده است. فیبر کریستال فوتونی از جنس سیلیکا شامل حفره های هوا با قطر  $d=1\mu\text{m}$  و فاصله بین دو حفره  $\Lambda=1.9\mu\text{m}$ ، شعاع کل سنسور  $9\mu\text{m}$  و  $d_1=4.5\mu\text{m}$  است.



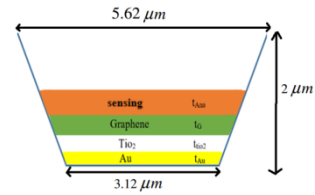
شکل ۱: تصویر شماتیک از سطح مقطع سنسور پیشنهادی

یک کانال دوزنقه ای شکل در نیمه بالایی سطح مقطع سنسور طراحی شده است که شامل لایه های طلا، دی اکسید تیتانیوم، تک لایه گرافن و نهایتاً لایه حسگری شامل روغن است (شکل ۲). گرافن آرایش شش ضلعی از اتم های کربن، می تواند  $\frac{2}{3}$  از میزان کل نور را جذب کند، بنابراین حضور لایه گرافنی می تواند سبب افزایش اندرکنش نور شده و به بهبود حساسیت سنسور کمک کند.

در ترانسفورماتورها، روغن ترانسفورماتور یک عنصر کلیدی است که هم چنبره ترانسفورماتور را عایق سازی کرده و هم از طریق هدایت گرما، دمای ترانسفورماتور را تنظیم می کند [۱]. همچنین، با جلوگیری از تماس مستقیم اکسیژن با قطعات ترانسفورماتور از اکسیداسیون آن جلوگیری می کند. بنابراین، جهت عملکرد صحیح این روغن نیاز است که کیفیت آن از طریق اندازه گیری مشخصات فیزیکی اش بطور منظم کنترل گردد. از تغییر ضریب شکست و تغییر غلظت روغن و همچنین تغییر ترکیبات گازی موجود در روغن میتوان برای سنجش کیفیت آن استفاده کرد [۲]. پلاسمون های سطحی چگالی نوسانات الکترون های آزاد در یک فلز هستند که در طول سطح مشترک فلز-دی الکتریک انتشار پیدا می کنند و توسط باریکه ی نور پلاریزه P برانگیخته می شوند. وقتی فرکانس و بردار موج نور فرودی پلاریزه P و موج پلاسمون سطحی با هم برابر شوند، این نور به طور تشدیدی موج پلاسمون سطحی را تحریک می کند. سنسورهای فیبر نوری مبتنی بر تشدید پلاسمونهای سطحی (SPR)، به خاطر سادگی ساختار، حساسیت بالا، قیمت پایین و پاسخ دهی سریع بشدت مورد توجه قرار گرفته اند [۳]. اخیراً، با توسعه فیبرهای کریستال فوتونی (PCF)، بیوسنسورهای نوری مبتنی بر PCF بخاطر کنترل پذیری از طریق تغییر مشخصات ساختاری فیبر کریستال فوتونی کاربردهای متنوع و وسیعی پیدا کرده اند [۲]. در این فیبرها تغییر ویژگی های ساختاری مانند تغییر قطر، فاصله و جنس حفره ها و تغییر ضخامت لایه فلز مورد استفاده در بیوسنسور به منظور ایجاد تشدید پلاسمون های سطحی در فصل مشترک عایق و دی الکتریک امکان کنترل بهتر

جدول ۱: تغییرات ضریب شکست روغن ترانسفورماتور به ازای تغییرات دما در بازه دمایی ۲۵ تا ۵۰ درجه سلسیوس

دما (°C)	ضریب شکست روغن ترانسفورماتور
۲۵	۱,۴۹۳۶۷
۳۰	۱,۴۹۱۷۱۵
۴۰	۱,۴۸۷۸۰۵
۵۰	۱,۴۸۳۸۹۵



شکل ۲: تصویر شماتیک از کانال دوزنقه‌ای شکل تعبیه شده در ساختار سنسور پیشنهادی

دیگر پارامتر مورد استفاده در طراحی فیبرهای کریستال فوتونی، تلفات حبس شدگی (Confinement Loss) است که میزان این تلفات بر واحد دسی بل بر سانتی متر، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\alpha_{loss} = 8.686 \times \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{eff}) \times 10^4 \quad (3)$$

که در این رابطه  $n_{eff}$  ضریب شکست موثر مد اصلی است. مهمترین پارامتر برای سنجش یک سنسور، میزان حساسیت آن است. میزان حساسیت را می‌توان به صورت نسبت تغییرات زاویه تشدید پلاسمون‌های سطحی به ازای تغییرات طول موج تشدید به صورت

$$SS = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n} (nm / RIU) \quad \text{تعریف کرد.}$$

#### ۴. نتایج و بحث‌ها

تلفات حبس شدگی سنسور پیشنهادی بر حسب طول موج به ازای ضرایب شکست متفاوت روغن در شکل (۳) رسم شده است که شیفت بیشینه تلفات به سمت طول موجهای کوتاهتر با افزایش ضریب شکست روغن کاملاً مشهود است. افزایش دمای روغن، باعث کاهش ضریب شکست روغن می‌گردد بنابراین چگالی روغن بطور جزئی کاهش می‌یابد. در نتیجه میزان اتلافات ناشی از اندرکنش نور با روغن کاهش یافته که با کاهش بیشینه و افزایش پهنای منحنی اتلافات نمایان می‌شود. همچنین، در این حالت بیشترین حساسیت نسبی سنسور مقدار 6095nm/RIU محاسبه شد.

در ساختار پیشنهادی، به منظور رسیدن به حساسیت نسبی بالا، ضخامت لایه طلا ۵۰ نانومتر، ضخامت لایه دی اکسید تیتانیوم ۱۰ نانومتر، ضخامت لایه گرافن ۰/۳۴ نانومتر و پارامترهای شبکه فیبر کریستال فوتونی  $d=1\mu\text{m}$  و  $\Lambda=2\mu\text{m}$  انتخاب شده است. همچنین ارتفاع کانال دوزنقه‌ای سنسور ۲ میکرومتر بوده که لایه روغن ترانسفورماتور در لایه آخر قرار خواهد گرفت. ابعاد کانال دوزنقه‌ای، در شکل ۲ بصورت شماتیک نشان داده شده است.

#### ۳. مدل بندی ریاضی و روابط حاکم

ضریب شکست نوعی از روغن ترانسفورماتور که بصورت متداول در ترانسفورماتورها مورد استفاده قرار می‌گیرد بر حسب دما بصورت زیرین تغییر می‌کند [۱]:

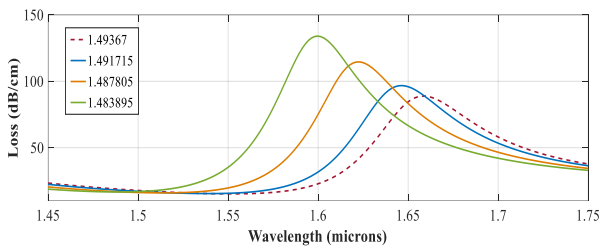
$$n_1(T) = 1.49367 - (3.91 \times 10^{-4})(T - 25^\circ\text{C}) \quad (1)$$

که به ازای بازه دمایی ۲۵ تا ۵۰ درجه سلسیوس مقادیر ضرایب شکست روغن ترانسفورماتور مطابق جدول ۱ خواهد بود. لازم به ذکر است که هسته فیبر کریستال فوتونی از جنس سیلیکا بوده که وابستگی ضریب شکست آن به طول موج عبارت است از [۴]:

$$n(\lambda)_{silica} = \sqrt{1 + \frac{0.691663^2}{\lambda^2 - 0.004679} + \frac{0.407943^2}{\lambda^2 - 0.013512} + \frac{0.897479^2}{\lambda^2 - 97.934003}} \quad (2)$$

همچنین ضریب شکست دی‌اکسید تیتانیوم ( $TiO_2$ ) از  $n_{TiO_2} = \sqrt{5.913 + \frac{0.2441}{\lambda^2 - 0.0843}}$  و ثابت دی‌الکتریک طلا

از مدل درود قابل محاسبه است.



شکل ۵: نمودار تلفات حبس شدگی به ازای ضرایب شکست مختلف روغن با  
 $t_{AU} = 50nm, d = 1.1\mu m, \Lambda = 2\mu m$

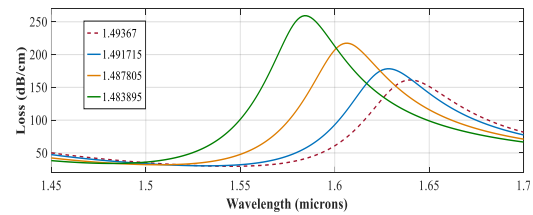
میزان حساسیت سنسور برای ساختار بدون لایه گرافن حدود 4400nm/RIU محاسبه شده است که حسن حضور لایه گرافن در افزایش میزان اندرکنش نور و افزایش حساسیت سنسور مشهود است.

### نتیجه گیری

در این مقاله سنسور مبتنی بر فیبر کریستال فوتونی به منظور تشخیص دمای روغن ترانسفورماتور از طریق سنجش ضریب شکست روغن ترانسفورماتور طراحی شد. سنسور پیشنهادی مبتنی بر لایه طلا به ضخامت ۵۰ نانومتر، لایه دی اکسید تیتانیوم با ضخامت ۱۰ نانومتر و تک لایه گرافن بیشینه میزان حساسیت 6095 nm/RIU را نشان داد.

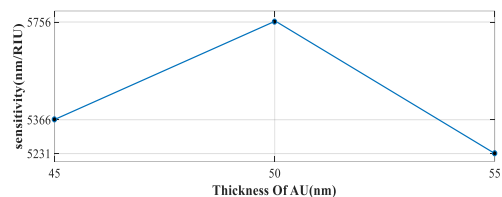
### مرجع ها

- [1] Kisch, Ryan John. "Using refractive index to monitor oil quality in high voltage transformers." PhD diss., University of British Columbia, 2008.
- [2] Chu, Suoda, K. Nakkeeran, Abdosllam M. Abobaker, Sumeet S. Aphale, P. Ramesh Babu, and K. Senthilnathan. "Design and analysis of surface-plasmon-resonance-based photonic quasi-crystal fiber biosensor for high-refractive-index liquid analytes." *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 25, no. 2 (2018): 1-9.
- [3] Yuan, Yinquan, Liyun Ding, and Zhenqiang Guo. "Numerical investigation for SPR-based optical fiber sensor." *Sensors and Actuators B: Chemical* 157, no. 1 (2011): 240-245.
- [4] Rani, Mahima, Sarika Shukla, Navneet K. Sharma, and Vivek Sajal. "Theoretical study of nanocomposites based fiber optic SPR sensor." *Optics Communications* 313 (2014): 303-314.



شکل ۳: نمودار تلفات حبس شدگی برحسب طول موج به ازای ضرایب شکست مختلف روغن با  
 $t_{AU} = 50nm, d = 1\mu m, \Lambda = 2\mu m$

همچنین، نمودار تلفات حبس شدگی به ازای مقادیر مختلف  $\Lambda$  بررسی شده که بیشترین حساسیت سنسور پیشنهادی به ازای  $\Lambda = 2\mu m$  محاسبه گردید. در شکل (۴) تغییرات میزان حساسیت نسبی سنسور پیشنهادی به ازای سه مقدار مختلف از ضخامت لایه طلا رسم شده است که مطابق نمودار، بیشترین حساسیت نسبی به ازای ضخامت ۵۰ نانومتر حاصل شده است.



شکل ۴: تغییرات میزان حساسیت سنسور نسبت به تغییر ضخامت لایه طلا از ۴۵ نانومتر به ۵۵ نانومتر با  
 $d = 1\mu m, \Lambda = 2\mu m$

در شکل (۵)، تلفات حبس شدگی سنسور پیشنهادی برحسب طول موج به ازای ضرایب شکست متفاوت روغن برای قطر حفره های هوا برابر با  $d = 1.1\mu m$  رسم شده است که در این حالت بیشترین حساسیت نسبی سنسور 5921nm/RIU محاسبه گردید. همچنین، شیفیت بیشینه تلفات حبس شدگی به سمت طول موجهای کوتاهتر با افزایش ضریب شکست روغن ترانسفورماتور در شکل مشخص است. نتایج ما نشان می دهد که بیشترین حساسیت سنسور پیشنهادی به ازای ضخامت ۵۰ نانومتر طلا و ضخامت ۱۰ نانومتر لایه دی اکسید تیتانیوم حاصل می گردد. همچنین نتایج ما نشان می دهد که حساسیت سنسور پیشنهادی با افزایش ضریب شکست روغن بصورت خطی افزایش می یابد.