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 درصنعت 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 لایه‌های طلا، تیتانیوم و تک لایه گرافن بیشترین حساسیت نسبی سنسور پیشنهادی، ۶۰۹۵ $nm / RIU$ 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.



این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

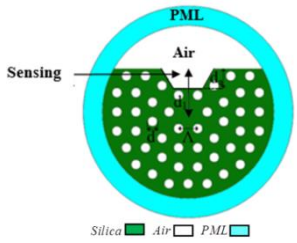
[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19 ]

## ۱.مقدمه

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 می‌کند[۱]. همچنین، با جلوگیری از تماس مستقیم اکسیژن با قطعات ترانسفورماتور از اکسیداسیون آن جلوگیری می‌کند. 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]. پلاسمون‌های سطحی چگالی نوسانات الکترون‌های آزاد در یک فلز هستند که در طول سطح مشترک فلز-دی‌الکتریک انتشار پیدا می‌کنند و توسط باریکه‌ی نور پلاریزه P برانگیخته می‌شوند. 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 می‌کند. 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 گرفته‌اند[۳]. اخیرا، 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 کرده‌اند[۲]. دراین فیبر ها تغییر ویژگی های ساختاری مانند تغییر قطر، فاصله وجنس حفره ها وتغییر ضخامت لایه فلز مورد استفاده در بیوسنسور به منظور ایجاد تشدید پلاسمون‌های سطحی در فصل مشترک عایق و دی‌الکتریک امکان کنترل بهتر خصوصیاتی مانند حساسیت، دقت و تلفات را فراهم می نماید. لذا در این مقاله یک سنسورD- 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 می‌شود، افزایش یابد. محاسبات و شبیه‌سازیهای مربوطه به روش FDTD با استفاده از نرم‌افزار 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=1µm و فاصله بین دو حفره Λ=1.9 µm ، شعاع کل سنسور 9µm و $d_1$=4.5µm است.



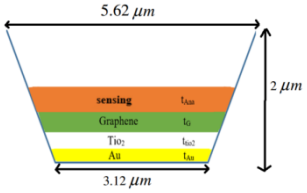

شکل ۱: تصویرشماتیک از سطح مقطع سنسور پیشنهادی

یک کانال ذوزنقه‌ای شکل در نیمه بالایی سطح مقطع سنسور طراحی شده است که شامل لایه‌های طلا، دی اکسید تیتانیوم، تک لایه‌گرافن و نهایتا لایه حسگری شامل روغن است (شکل ۲). گرافن آرایش شش ضلعی از اتم‌های کربن، می‌تواند ۲/۳٪ از میزان کل نور را جذب کند، بنابراین حضور لایه گرافنی می‌تواند سبب افزایش اندرکنش نور شده و به بهبود حساسیت سنسور کمک کند.



این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19 ]




شکل۲: تصویر شماتیک از کانال ذوزنقه‌ای شکل تعبیه شده در ساختار سنسور پیشنهادی

درساختار پیشنهادی، به‌منظور رسیدن به حساسیت نسبی بالا، ضخامت لایه طلا ۵۰ نانومتر، ضخامت لایه دی اکسید تیتانیوم ۱۰ نانومتر، ضخامت لایه گرافن ۰/۳۴ نانومتر و پارامتر های شبکه فیبر کریستال فوتونی d=1μm و Λ=2μm انتخاب شده است. همچنین ارتفاع کانال ذوزنقه‌ای سنسور ۲میکرومتر بوده که لایه روغن ترانسفورماتور در لایه اخر قرار خواهد گرفت. ابعاد کانال ذوزنقه‌ای، 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]:

$$n_1(T)=1.49367-\left(3.91\times10^{-4}\right)\left(T-25°C\right) \qquad (۱)$$

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]:

$$n(\lambda)_{silica}=\sqrt{1+\frac{0.691663^2}{\lambda^2-0.004679}+\frac{0.407943^2}{\lambda^2-0.013512}+\frac{0.897479^2}{\lambda^2-97.934003}} \qquad (۲)$$

همچنین ضریب شکست دی‌اکسید تیتانیوم( $Tio_2$ ) از $n_{Tio_2}=\sqrt{5.913+\frac{0.2441}{\lambda^2-0.0843}}$ و ثابت دی الکتریک طلا از مدل درود قابل محاسبه است.

جدول۱: 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 |

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:

$$\alpha_{loss}=8.686\times\frac{2\pi}{\lambda}Im(n_{eff})\times10^4 \qquad (۳)$$

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 می توان به صورت نسبت تغییرات زاویه تشدید پلاسمون های سطحی به ازای تغییرات طول موج تشدید به صورت $SS=\frac{\Delta\lambda}{\Delta n}\left(nm/\mathrm{RIU}\right)$ تعریف کرد.

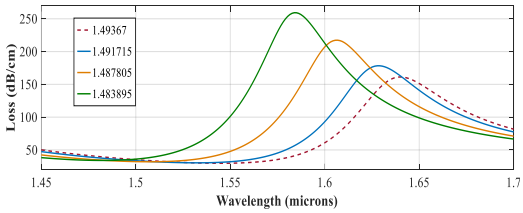
## ۴. نتایج و بحث ها

تلفات حبس شدگی سنسور پیشنهادی برحسب 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 کاملا 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 باکاهش بیشینه و افزایش پهنای منحنی اتلافات نمایان می‌شود. همچنین، در این حالت بیشترین حساسیت نسبی سنسور مقدار 6095nm/RIU محاسبه شد.



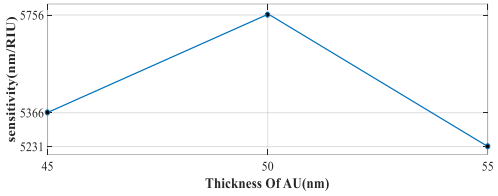
این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19 ]



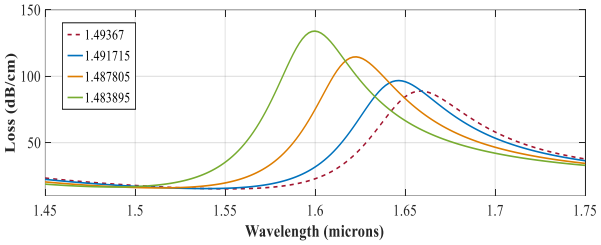

شـکل۳: نمودار تلفات حبس شـدگی برحسـب طول موج به ازای ضـرایب شکست مختلف روغن با $t_{AU}=50nm,\ d=1\mu m, \Lambda=2\mu m$

همچنین،نمودار تلفات حبس شـدگی به ازای مقادیر مختلف $\Lambda$ بررسی شده که بیشترین حساسیت سنسور پیشنهادی به ازای $\Lambda$=2μm 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.




شکل۴:تغییرات میزان حساسیت سنسور نسبت به تغییر ضخامت لایه طلا از۴۵نانومتر به ۵۵نانومتر با $d=1\mu m, \Lambda=2\mu m$

در شـکل (۵)، تلفات حبس شـدگی سـنسـور پیشـنهادی برحسب طول موج به ازای ضرایب شکست متفاوت روغن برای قطر حفره های هوا برابر با d=1.1μm رسم شده است که در این حالت بیشـترین حسـاسـیت نسـبی سـنسـور 5921nm/RIU محاسبه گردید. همچنین، شیفت بیشینه تلفات حبس شـدگی به سـمت طول موجهای کوتاهتر با افزایش ضـریب شـکسـت روغن ترانسـفورماتور در شـکل مشـخص اسـت. نتایج ما نشـان میدهد که بیشـترین حساسیت سنسور پیشنهادی به ازای ضخامت ۵۰ نانومتر طلا و ضخامت ۱۰ نانومتر لایه دی اکسید تیتانیوم حاصل میگردد. همچنین نتایج ما نشـان میدهد که حسـاسـیت سنسور پیشنهادی با افزایش ضریب شکست روغن بصورت خطی افزایش مییابد.




شکل۵: 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 لایـه گرافن در افزایش میزان انـدرکنش نور و افزایش حساسیت سنسور مشهود است.

## نتیجه‌گیری

در این مقاله سـنسـور مبتنی بر فیبر کریسـتال فوتونی به منظور تشـخیص دمای روغن ترانسـفور ماتور از طریق سنجش ضریب شکست روغن ترانسفورماتور طراحی شد. سـنسـور پیشـنهادی مبتنی بر لایه طلا به ضـخامت ۵۰ نانومتر، لایه دی اکسـید تیتانیم با ضـخامت ۱۰ نانومتر و تک لایه گرافن بیشینه میزان حساسیت 6095 nm/RIU را نشان داد.

## مرجع‌ها

**[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.



این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19 ]