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

بررسی نظری تأثیر ضخامت لایه جاذب و هندسه بر حساسیت حسگرهای تار نوری نازک شده

علی ریاحی[۱و۲]، محمد واحدی[۱*]، جواد خلیل‌زاده[۲]

mvahedi@iust.ac.ir

۱-دانشگاه علم‌وصنعت ایران، دانشکده فیزیک

۲-مرکز اپتیک و لیزر دانشگاه جامع امام حسین (ع)

چکیده - در این مقاله، یک مطالعه جامع برای تعیین هندسه بهینه تار جهت رسیدن به بیشترین حساسیت حسگرهای تار نوری نازک شده انجام می شود. به‌منظور تعیین تأثیر ضخامت لایه، زاویه و قطر نازک سازی تار بر حساسیت حسگرهای تار نوری نازک شده، یک روش پله‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. حساسیت حسگر تار نوری نازک شده با افزایش زاویه و کاهش قطر نازک شده زیاد می شود. همچنین حساسیت حسگر به ضریب شکست لایه جاذب بستگی دارد. اگر ضریب شکست لایه بزرگتر از ضریب شکست تار باشد، نقاط بهینه‌ای در نمودار حساسیت برحسب ضخامت مشاهده می‌شود و اگر کوچکتر از آن باشد با افزایش ضخامت لایه جاذب، حساسیت همواره افزایش می‌یابد.

کلید واژه-میدان میرا، ضخامت لایه جاذب، تار نوری نازک شده، حساسیت

Theoretical Investigation of the Effect of Absorbing Layer Thickness and Geometry Effect on the Sensitivity of Tapered-Fiber Sensors

A. Riahi[1, 2], M. Vahedi[1], J. Khalilzadeh[2]

۱.Physics department, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

۲.Optics and Laser Research Center, Imam Hossein University of Technology, Tehran, Iran

Abstract- In this paper, a comprehensive study was conducted to determine the optimum geometry resulting in the largest sensitivity for the tapered fiber-optic gas sensors. A staircase concatenation method was introduced to investigate the effect of geometry and the absorbing layer thickness. The sensitivity of the sensor is increased with increasing of the tapering angle and decreasing of the tapered diameter. Refractive index of the layer is an important parameter affecting the sensitivity. If refractive index of the layer is larger than refractive index of the fiber, some optimum points are observed and for the case that the refractive index of the layer is smaller than that of the fiber, the sensitivity is increased by increasing the layer thickness.

Keywords: Tapered optical fiber, layer thickness effect, Evanescent field, Sensitivity.

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

با پیشرفت‌های انجام شده در حوزه تار نوری، ساخت حسگر با آن به‌دلیل مزایایی ازجمله دقت اندازه‌گیری، زمان پاسخ کوتاه و مصونیت در برابر تداخلات الکترومغناطیسی، در حال گسترش است. از انواع حسگرهای ساخته شده با تار نوری در صنایع مختلفی مانند پتروشیمی‌ها، صنایع غذایی و کنترل کیفیت منابع آب مورد استفاده قرار می‌گیرند.

حسگرهای تار نوری گوناگونی برای کاربردهای مختلف طراحی و بررسی شده‌اند. یکی از جالب‌ترین آنها، حسگر تار نوری نازک‌شده (TOF) می‌باشد که به‌دلیل حساسیت بالا و زمان پاسخ کوتاه و همچنین نحوه ساخت آسان مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند. برای استفاده از تار نوری به‌عنوان حسگر نیاز است تا تغییراتی بر روی هندسه تار نوری ایجاد کرد تا بتوان برهم‌کنش نور با محیط خارجی را افزایش داد. یکی از راه‌های افزایش برهم‌کنش نور با محیط بیرون، که در این حسگرها استفاده می‌شود، نازک‌سازی قسمتی از تار نوری می‌باشد. با عمل نازک‌سازی، میدان موج میرا به سطح تار امتداد یافته و با نمونه اطراف در تعامل قرار می‌گیرد. تعامل نوری موج هدایت شده با محیط اطراف می‌تواند ابزاری قدرتمندی برای کاربردهای حسگری باشد [۱-۳].

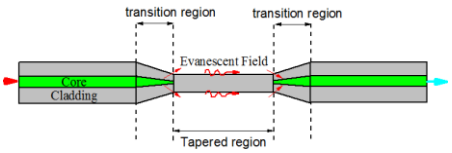
برای شناسایی ماده مجهول در حسگرهای نوری، لایه‌نشانی متناسب با ماده موردنظر بر روی قسمت نازک‌شده تار نوری مورد نیاز است. واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی لایه جاذب با ماده موردنظر سبب تغییرات خصوصیات نوری این لایه از جمله ضریب شکست آن می شود. این تغییرات سبب تغییر خصوصیات نور عبوری از تار شامل تغییر در شدت، قطبش و یا فاز آن می شود که توسط آشکار ساز مناسب قابل شناسایی است.

برای طراحی حسگر TOF با حساسیت مناسب، باید هندسه تار نوری شامل قطر و زاویه نازک‌شده تنظیم شود. تلاش‌های بسیاری برای مطالعه تأثیر این کمیات صورت گرفته است [۱-۳]. همچنین ضخامت لایه جاذب می‌تواند حساسیت حسگر را دستخوش تغییر کند. برخی از محققین به‌شکل پراکنده به این موضوع پرداخته‌اند [۴].

در این مقاله، روش پله‌ای برای شبیه‌سازی حسگر TOF ارائه شده است. تاکنون مدل نظری جامعی برای تعیین عملکرد حسگر گزارش نشده است. حساسیت حسگر براساس مدل ارائه شده بدست آمد و تأثیر زاویه و قطر تار نوری نازک شده و همچنین ضخامت لایه جاذب بر حساسیت مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مبانی نظری و شبیه‌سازی

نور در داخل تار نوری طبق اصل بازتاب کلی داخلی منتشر می‌شود. با نازک‌سازی تار نوری، عملاً مغزی و غلاف در هم ادغام می‌شود. ناحیه نازک شده، نقش مغزی و محیط بیرون نقش غلاف موجبر جدید را ایفا می‌کنند. مطابق شکل ۱، تار نوری نازک‌شده دارای سه قسمت می‌باشد: تار نوری اصلی، ناحیه گذار و ناحیه نازک‌شده. لایه‌نشانی متناسب با سنجش ماده موردنظر بر روی قسمت نازک‌شده در شکل ۱ انجام می‌شود.



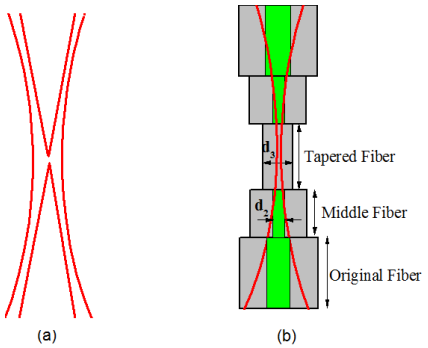
شکل ۱: طرحواره تار نوری نازک‌شده و قسمت‌های مختلف آن.

برای درک سازوکار تغییر مدها در تار نوری نازک شده، همان‌طور که در شکل ۲ (ب) نشان داده شده است، فرض می‌کنیم که تار دچار افت پله‌ای در قطر آن می‌شود. در هر گام، تاری با یک V خاص وجود دارد که تعداد مدها را

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

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

تعیین می‌کند. این مدها که مدهای موضعی نامیده می‌شوند، نقش حالت میانی را ایفا می‌کنند که سبب انتقال نور به ناحیه نازک شده می‌شوند. در ناحیه گذار، تغییر شدیدی در تعداد V ایجاد نشده و تارنوری به‌صورت تک‌مد باقی مانده است. بنابراین کل ناحیه گذار را با یک تارنوری شبیه سازی می‌کنیم و یک مدل سه قسمتی برای شبیه‌سازی تارنوری نازک شده ارائه می‌کنیم (شکل ۲).



شکل ۲: (الف) تقریب پله‌ها برای تارنوری نازک شده، (ب): شبیه‌سازی سه مرحله‌ای ساده از تارنوری نازک شده.

توان جفت‌شده از تاری به تار دیگر را می‌توان با همپوشانی انتگرال میدان ورودی و مدهای تار خروجی بدست آورد:

$$P_m = (\frac{1}{2\omega\mu_0})\beta_m|\int \psi_m(x,y)E_{in}(x,y,z=0)dxdy|^2 \qquad (۱)$$

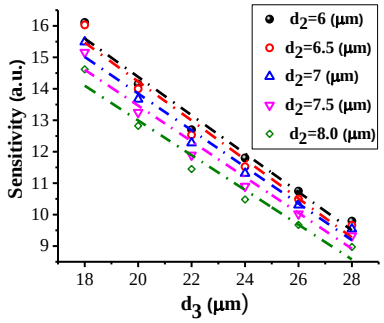
در آن E_{in}، β_m، ψ_{lm} به‌ترتیب ثابت انتشار مد، میدان ورودی و پروفایل مد تارنوری متناظر با مد LP_{lm} می‌باشد. برای به‌دست آوردن حساسیت، مجموع انتگرال مدهای تارنوری نازک‌شده در خارج از تارنوری محاسبه می‌شود. حساسیت متناسب است با:

$$\sum_m|c_m|^2\int_a^\infty|\psi_m(\rho)|^2\rho d\rho \qquad (۲)$$

که در آن $c_m = \int \psi_m(\rho)E_{in}(\rho,z=0)\rho d\rho$ و a شعاع تار می‌باشد[۵].

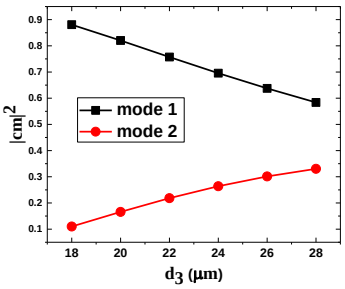
۳- نتایج و بحث

در این کار، تار انتخاب شده دارای مغزی با قطر d=9μm و ضریب شکست ۱,۴۶و غلاف با قطر d=125μm و ضریب شکست ۱,۴۵۳ می‌باشد. وابستگی حساسیت به قطر نازک‌شده در شکل۳ نشان داده شده است.



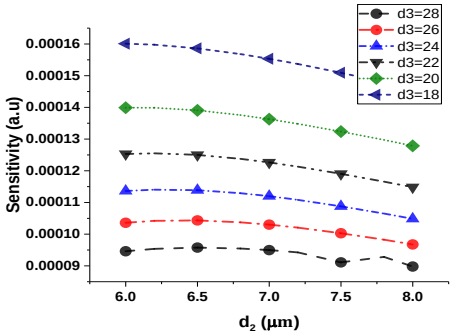
شکل۳: وابستگی حساسیت به قطر نازک شده.

نحوه توزیع توان در مدهای تارنوری در شکل ۴ مشخص شده است. مطابق شکل توان جفت‌شده به مد اصلی تارنوری کاهش و به مد دوم افزایش و در نتیجه شدت میدان میرای خارج از تارنوری کاهش می‌یابد که در نهایت حساسیت برای قطرهای بزرگتر نازک‌شده کاهش می‌یابد.



شکل ۴: نحوه توزیع توان در مدهای تار برحسب قطر تارنوری نازک شده.

شکل۵ وابستگی حساسیت به قطر تارنوری میانی را نشان می‌دهد. در واقع قطر تارنوری میانی مرتبط با زاویه نازک‌سازی است. d_2 بزرگتر متناظر با زاویه کوچکتر می‌باشد.



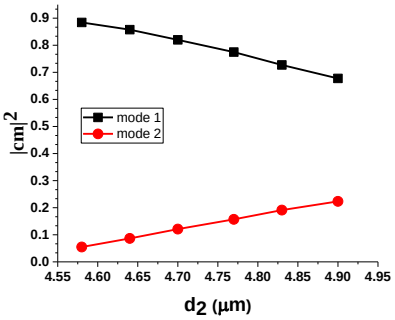
شکل ۵: وابستگی حساسیت به زاویه نازک‌سازی از طریق d_2.

نحوه توزیع توان در مدهای تارنوری برحسب قطر تار میانی در شکل ۶ مشخص شده است. همانگونه که از شکل

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

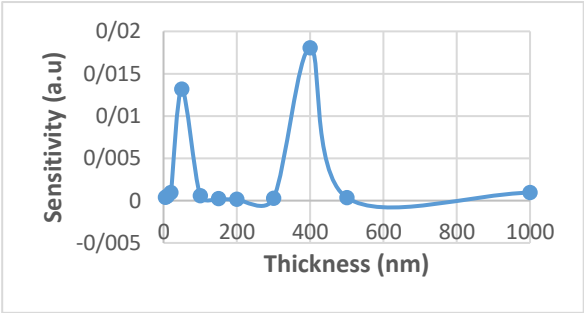
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]

مشخص است کاهش توان جفت شده به مد اول نشان‌دهنده کاهش حساسیت با افزایش d_2 می‌باشد.



شکل ۶: نحوه توزیع توان در مدهای تار برحسب قطر تار میانی.

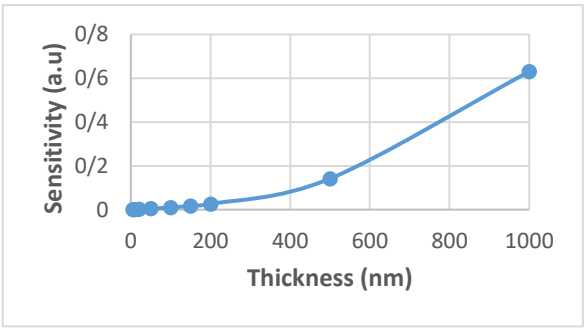
به‌منظور بررسی نحوه تاثیر ضخامت لایه جاذب بر حساسیت حسگر، مطابق روابط ۳ و ۴ ضرایب شکست مختلفی مورد بررسی قرار گرفت. نمودار حساسیت برحسب ضخامت لایه با ضریب شکست $n=2.7$ و $d=12\mu m$ (قطر ناحیه نازک شده) در شکل ۷ نشان داده شده است. همانگونه که از شکل مشاهده می‌شود نقاط بهینه‌ای برای حساسیت وجود دارد.



شکل۷: حساسیت برحسب ضخامت لایه جاذب با $n=2.7$.

نمودار حساسیت برحسب ضخامت لایه جاذب با ضریب شکست $n=1.35$ و $d=12\mu m$ در شکل ۸ نشان داده شده است. همانگونه که از شکل مشاهده می‌شود حساسیت با افزایش ضخامت افزایش می‌یابد.

علت رفتار مشاهده شده در شکل ۷ وجود مدهای غلاف و تزویج قوی با این مدها در ضخامتهای خاصی است که منجر به بیشینه‌های مشاهده شده در این شکل می‌شود [۴]. رفتار مشاهده شده در شکل ۸ نیز در غیاب مدهای غلاف قابل انتظار است. چرا که در این حالت، با افزایش ضخامت، میدان میرا در خارج از فیبر افزایش می یابد.



شکل ۸: حساسیت برحسب ضخامت لایه جاذب با $n=1.35$.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست آمده پیش‌بینی می‌کند که با افزایش زاویه و کاهش قطر، حساسیت حسگرهای تارنوری نازک‌شده افزایش می‌یابد. همچنین ضخامت لایه نیز می‌تواند بر حساسیت حسگر تأثیر بگذارد. هنگامی که ضریب شکست لایه از ضریب شکست تارنوری کوچکتر باشد، با افزایش ضخامت لایه، حساسیت حسگر افزایش و هنگامی که ضریب شکست لایه از ضریب شکست تار بزرگتر باشد، مقادیر بهینه‌ای برای حساسیت حسگر به‌دست می‌آید.

مرجع‌ها

[۱] علی ریاحی و دیگران، " طراحی و شبیه‌سازی حسگر فیبر نوری نازک‌شده غیربی‌دررو جهت آشکارسازی هیدروژن"، بیست‌و پنجمین کنفرانس فوتونیک ۱۳۹۷.

[2] Verma, R. K. "Sensitivity enhancement of a lossy mode resonance based tapered fiber optic sensor with an optimum taper profile." *Journal of Physics D: Applied Physics* 51.41 (2018): 415302.

[3] Yadav, T. K., et al. "Study of single mode tapered fiber-optic interferometer of different waist diameters and its application as a temperature sensor." *Journal of the European Optical Society-Rapid publications* 9 (2014).

[4] Del Villar, et al. "Influence on cladding mode distribution of overlay deposition on long-period fiber gratings." *JOSA A* 23.3 (2006): 651-658.

[5] Ghatak, Ajoy, and K. Thyagarajan. An introduction to fiber optics. Cambridge university press, 1998.

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

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