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

مدلسازی نظری حسگر ضریب شکست فیبر نوری با ساختار توری مبتنی بر تشدید مد اتلافی

سیما ادیب نیا[۱]، فاطمه شهشهانی[۱]، مریم کریمی[۲]

[۱]دانشکده فیزیک و شیمی، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران
[۲]پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران

چکیده - در این مقاله یک حسگر ضریب شکست فیبری با توری براگ که بر اساس تشدید مد اتلافی کار می‌کند، به طور نظری بررسی شده است. در این حسگر یک قسمت کوچک از غلاف فیبر برداشته و با یک لایه نازکی مانند ITO که یک اکسید رسانای شفاف است، پوشانده می‌شود. این حسگر در دو ساختار توری با انتقال فاز و بدون انتقال فاز مورد مطالعه قرار گرفته است و عملکرد این دو ساختار باهم مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که ساختار حسگر با انتقال فاز $\frac{\pi}{2}$ در وسط توری دارای ضریب دقت بیشتری نسبت به ساختار بدون انتقال فاز است. دقت حسگر به ضریب جفت‌شدگی توری بستگی دارد و در ساختار با انتقال فاز، افزایش ضریب جفت شدگی سبب افزایش دقت حسگر می‌گردد.

کلید واژه- انتقال فاز، تشدید مد اتلافی، توری براگ، حساسیت، حسگر فیبر نوری.

Theoretical Modeling of Optical Fiber Refractive Index Sensor with Grating Structure Based on the Lossy Mode Resonance

Sima Adibnia[1], Fatemeh Shahshahani[1], Maryam Karimi[2]
[1]Physics Department, Alzahra University, Tehran, Iran
[2]Plasma Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran.

Abstract - In this paper, a fibre-refractive index sensor with a Bragg grating based on the lossy mode resonance is theoretically investigated. In this sensor, a small portion of the fibre cladding is removed and covered with a thin layer such as ITO that is the transparent conductive oxide. This sensor has been studied in two grating structures with phase shift and without phase shift and the performance of these two structures are compared. The simulation results show that the sensor structure with π / 2 phase shift in the middle of the grating has a higher accuracy coefficient than the structure without phase. The accuracy of the sensor depends on the coupling coefficient and the increasing coupling coefficient causes the increasing accuracy of sensor in the structure with phase shift.

Keywords: Phase shift, Lossy mode resonance, Bragg grating, Sensitivity, Optical fiber sensor.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]

مقدمه

امروزه کاربردهای حسگر فیبر نوری که برای سنجش و اندازه-گیری کمیت‌های مختلف مانند دما، فشار، ارتعاشات، جابجایی، چرخش و ضریب شکست به کار می‌رود، رو به رشد و توسعه است. حسگرهای فیبر نوری می‌توانند بر اساس برهم‌کنش مستقیم نمونه تحت آزمایش با موج اتلافی نوری در فیبر عمل کنند. به منظور افزایش برهم‌کنش نور عبوری از فیبر با محیط اطراف، ساختارهای مختلفی مانند ساختارهای D شکل، ساختارهای مخروطی، ساختارهای با توری براگ با دوره تناوب بلند معرفی شده است[۱ و ۲].

معمولا برای افزایش برهم‌کنش بین میدان درون فیبر با محیط اطراف، بخشی از غلاف فیبر را برداشته و با لایه نازکی از یک ماده دیگر جایگزین می‌کنند. چنانچه ماده لایه نازک از جنس فلز باشد، تشدید پلاسمون سطحی رخ خواهد داد و اگر این ماده از دسته دی‌الکتریک‌ها باشد، حسگر فیبر نوری بر اساس تشدید مد اتلافی عمل می‌کند. در تشدید مد اتلافی جفت‌شدگی بین مد موجبر و یک مد اتلافی خاص در مقدار مشخصی از ضخامت لایه نازک اتفاق می‌افتد. در جفت‌شدگی بین دو مد، شرط هم-پوشانی میدان‌ها و تطبیق فاز هر دو وجود دارد. در شرط تطبیق فاز، قسمت حقیقی ثابت انتشار مد اتلافی باید با قسمت حقیقی ثابت انتشار مد موجبر یکسان باشد [۴ و ۳].

در این مقاله، مدلسازی یک حسگر فیبر نوری مبتنی بر تشدید مدهای اتلافی و با ساختار توری براگ که در ناحیه مغزی فیبر ایجاد شده، به طور نظری بررسی می‌شود. ناحیه‌ای که در آن توری ایجاد شده سبب بازتاب‌های متعدد و توزیع شده امواج در داخل فیبر می‌شود[۵]. از توری براگ به منظور گزینش طول موجی و افزایش دقت و حساسیت در ساختار حسگر استفاده می‌شود. عملکرد حسگر فیبر نوری زمانی که در درون توری انتقال فاز ایجاد شده باشد و یا بدون انتقال فاز باشد، از لحاظ حساسیت و دقت حسگر مقایسه شده است.

در ادامه، مبانی نظری حسگرهای فیبر نوری با ساختار توری براگ بر اساس تشدید مد اتلافی توضیح داده می‌شود و در بخش سوم، نتایج حاصل از شبیه‌سازی ارائه و بررسی خواهد شد. در پایان، نتیجه‌گیری کوتاهی آورده شده است.

۲- مبانی فیزیکی

انتشار پرتو در حسگر فیبری با ساختار توری بر اساس حل معادلات ماکسول و مبانی نظری جفت‌شدگی مد و با در نظر گرفتن شرایط مرزی مناسب بررسی می‌شود[۶]. در این مقاله برای حل معادلات مد جفت شده از روش ماتریس انتقال استفاده شده است که در این روش، توری به چندین بخش کوچک متوالی به طول Δz تقسیم می‌شود و میدان‌های نوری در هر بخش با ماتریس انتقال بدست می‌آید. با استفاده از این روش می‌توان میدان عبوری نور را در انتهای فیبر بدست آورد. درایه‌های ماتریس انتقال با رابطه‌های زیر بیان می‌شود:

$$F_{11} = \frac{1}{1-r(q)^2}\left[e^{iq\Delta z} - r(q)^2 e^{-iq\Delta z}\right] \quad (۱)$$

$$F_{12} = \frac{-r(q)}{1-r(q)^2}\left[e^{iq\Delta z} - e^{-iq\Delta z}\right] \quad (۲)$$

$$F_{21} = -F_{12} \quad (۳)$$

$$F_{22} = \frac{-1}{1-r(q)^2}\left[r(q)^2 e^{iq\Delta z} - e^{-iq\Delta z}\right] \quad (۴)$$

در رابطه‌های ۱ تا ۴، $q = \pm\sqrt{\delta^2 - K^2}$ و $r(q) = \frac{q-\delta}{K}$ است. K ضریب جفت شدگی توری نامیده می‌شود و δ انحراف از فرکانس براگ است و با رابطه زیر تعریف میشود:

$$\delta(\omega) = \frac{n_{eff}}{c}(\omega - \omega_B) \quad (۵)$$

که در آن ω و ω_B بترتیب فرکانس زاویه‌ای نور و فرکانس زاویه‌ای براگ است. براساس روش ماتریس انتقال میدان‌های نوری در انتهای فیبر بر حسب میدان‌های نوری در ابتدای فیبر از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} A_f(L) \\ A_b(L) \end{bmatrix} = F \times \begin{bmatrix} A_f(0) \\ A_b(0) \end{bmatrix} \quad (۶)$$

$$F = F^{(N)} \dots F^{(3)} F^{(2)} F^{(1)} \quad (۷)$$

که در آن L طول توری و N تعداد لایه های توری براگ و A_f میدان رو به جلو و A_b میدان بازگشتی است.

یک راه حل مناسب برای انتخاب یک فرکانس خاص در باند توقف فرکانسی، استفاده از انتقال فاز در ساختار حسگر توری براگ است. این تغییر فاز، باعث ایجاد یک شکاف در پهنای باند بازتابی می‌شود و در نتیجه یک باند انتقالی باریک شکل می‌گیرد. این باند انتقالی با پهنای کم، امکان تمرکز روی همان ناحیه طول-موجی به‌منظور بررسی دقیق‌تر خصوصیات حسگر را فراهم می-کند. به همین منظور در روابط مربوط به توری براگ، ماتریس انتقال فاز زیر نیز وارد می‌شود:

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]

$$\boldsymbol{T_{PS}} = \begin{bmatrix} e^{i\frac{\varphi}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{\varphi}{2}} \end{bmatrix} \quad (۸)$$

که در آن φ فاز دلخواه است. با فرض اینکه این انتقال فاز در وسط توری اعمال شود، با توجه به یکنواخت بودن توری، ماتریس F به صورت زیر تغییر می‌یابد:

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{F^{\left(\frac{N}{2}\right)}} \times \boldsymbol{T_{PS}} \times \boldsymbol{F^{\left(\frac{N}{2}\right)}} \quad (۹)$$

توان نور عبوری بهنجار از انتهای حسگر از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\boldsymbol{T} = \left|\frac{\boldsymbol{A_f(L)}}{\boldsymbol{A_f(0)}}\right|^2 = \left|\boldsymbol{F_{11}} - \frac{\boldsymbol{F_{12}} \times \boldsymbol{F_{21}}}{\boldsymbol{F_{22}}}\right|^2 \quad (۱۰)$$

این توان به مشخصات ساختاری حسگر از جمله ضریب جفت‌شدگی توری، طول قسمتی از فیبر که غلاف آن برداشته شده است، ضریب شکست لایه نازک و ضریب شکست محیط اطراف فیبر بستگی دارد. عملکرد حسگر فیبر نوری معمولا با دو پارامتر حساسیت و دقت بررسی می‌شود. حساسیت یک حسگر ضریب شکست با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$S_\lambda = \frac{\Delta\lambda_{res}}{\Delta n_s} \quad (۱۱)$$

که در آن، $\Delta\lambda_{res}$ تغییرات طول موج تشدید مد اتلافی و Δn_s تغییرات ضریب شکست محیط اطراف است.

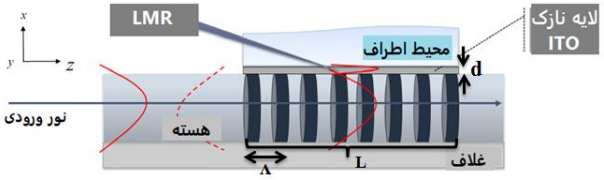
پارامتر دقت به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\boldsymbol{F} \equiv \frac{\boldsymbol{FSR}}{\boldsymbol{FWHM}} \quad (۱۲)$$

در این رابطه، FSR محدوده آزاد طیفی و $FWHM$ پهنای نیم بیشینه توان در تشدید را بیان می‌کند. لازم به ذکر است که مد اتلافی در لایه نازک ITO ایجاد می‌شود. مشخصات این لایه روی ثابت انتشار مد و ضریب شکست موثر ساختار تاثیر دارد که به روش ضریب شکست موثر محاسبه می‌شود.

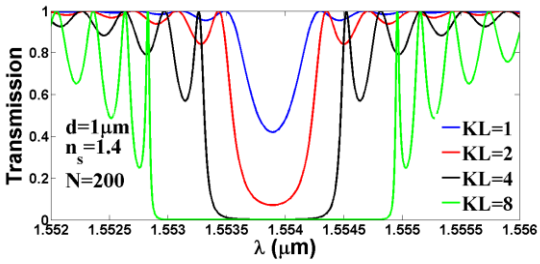
۳- نتایج شبیه سازی

در شکل ۱ ساختار ساده‌ای از حسگر فیبر نوری با استفاده از توری مبتنی بر تشدید مد اتلافی نشان داده شده است. در این شکل دوره تناوب توری با Λ، طول ناحیه توری با L و ضخامت لایه نازک ITO با d مشخص شده است.

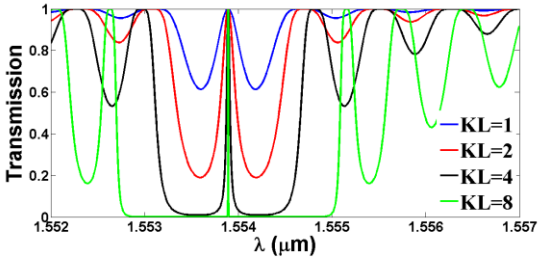


شکل ۱: ساختار حسگر فیبر نوری با توری مبتنی بر تشدید مد اتلافی.

در شبیه‌سازی‌های انجام شده، L = 2 mm و d =1 μm در نظر گرفته شده است. در ادامه نتایج حاصل از شبیه‌سازی حسگر فیبر نوری با ساختار توری براگ با انتقال فاز و بدون انتقال فاز، ارائه شده است.



(الف)

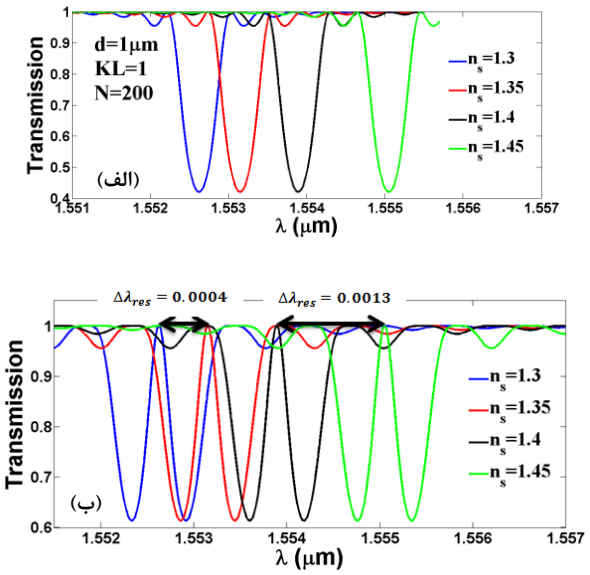


(ب)

شکل۲: طیف توان نور عبوری حسگر به ازای ضریب جفت‌شدگی‌های مختلف (KL). الف-ساختار بدون انتقال فاز. ب- ساختار با انتقال فاز

در شکل ۲، طیف توان نور عبوری حسگر فیبر نوری مبتنی بر توری براگ به ازای ضریب جفت‌شدگی‌های مختلف (KL)، در دوحالت، الف- ساختار بدون انتقال فاز، ب- با انتقال فاز $\frac{\pi}{2}$ در وسط توری مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در ساختار با انتقال فاز، در وسط نوار توقف فرکانسی (محدوده فرکانسی که دارای کمترین توان عبوری است)، یک قله ایجاد شده و هرچه ضریب جفت‌شدگی بیشتر باشد، این قله تیزتر است. با افزایش ضریب جفت‌شدگی، تداخل امواج پیش‌رونده در یک طول موج خاصی، سازنده می‌شود و هرچه مقدار جفت‌شدگی بیشتر باشد امواج با دامنه‌های بیشتری با یکدیگر جمع می‌شوند در نتیجه این قله تیزتر خواهد شد که این به معنی تمرکز بر روی یک ناحیه طول موجی بسیار کوچک است.

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]



شکل۳: طیف توان نور عبوری ساختار حسگر فیبر نوری مبتنی بر توری براگ به ازای ضریب شکست‌های مختلف محیط. الف- ساختار بدون انتقال فاز. ب- با انتقال فاز $\frac{\pi}{2}$ در وسط توری.

در شکل ۳، طیف توان نور عبوری حسگر فیبر نوری مبتنی بر توری براگ به ازای ضریب شکست‌های مختلف محیط، الف- ساختار بدون انتقال فاز، ب- با انتقال فاز $\frac{\pi}{2}$ در وسط توری نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش ضریب شکست محیط مقدار طول موج تشدید، افزایش می‌یابد که علت آن تغییر ضریب شکست مؤثر و در نتیجه تغییر مدهایی است که می‌توانند در داخل فیبر نوری منتشر شوند. همچنین مقدار این جابجایی با افزایش n_s بیشتر می‌شود. پس می‌توان دریافت که با افزایش n_s، حساسیت افزایش می‌یابد.

به منظور مقایسه دقت در اندازه‌گیری حساسیت، ضریب ظرافت برای حسگر فیبر نوری مبتنی بر توری براگ بدون انتقال فاز و با انتقال فاز با استفاده از نتایج شکل ۲ محاسبه شده و مقادیر بدست آمده بترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

جدول۱: ضریب ظرافت برای حسگر فیبر نوری مبتنی بر توری براگ بدون انتقال فاز

KL	FWHM (μm)	FSR (μm)	F
۱	۰,۰۰۰۴	۰,۰۰۰۶	۱,۵
۲	۰,۰۰۰۸	۰,۰۰۰۷	۰,۸۷۵۲
۴	۰,۰۰۱۱	۰,۰۰۰۸	۰,۷۲۷۳
۸	۰,۰۰۲۱	۰,۰۰۱۱	۰,۵۲۳۸

جدول۲: ضریب ظرافت برای حسگر فیبر نوری مبتنی بر توری براگ با انتقال فاز $\frac{\pi}{2}$ در وسط توری

KL	FWHM (μm)	FSR (μm)	F
۲	۰,۰۰۰۶	۰,۰۰۰۳	۱
۳,۵	۰,۰۰۰۷	۰,۰۰۰۲	۲
۹	۰,۰۰۰۹	۰,۰۰۰۱	۴
۱۲۰	۰,۰۰۱۲	۰,۰۰۰۱	۸

با توجه به نتایج بدست آمده، ملاحظه می‌شود که در حالت بدون انتقال فاز، افزایش ضریب جفت‌شدگی باعث افزایش محدوده آزاد طیفی و در نتیجه کاهش دقت در اندازه‌گیری می‌شود اما با ایجاد انتقال فاز در ساختار، افزایش جفت‌شدگی سبب افزایش دقت در اندازه‌گیری حساسیت حسگر می‌شود و به ازای KL=8 ساختار حسگر دارای دقت ۱۲۰ است.

۴-نتیجه گیری

نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که ساختار حسگر با انتقال فاز $\frac{\pi}{2}$ در وسط توری دارای دقت بیشتری نسبت به ساختار بدون انتقال فاز است. دقت حسگر به ضریب جفت‌شدگی توری بستگی دارد و به ازای KL=8 ساختار حسگر دارای دقت ۱۲۰ است. همچنین به ازای یک ضریب جفت‌شدگی ثابت، با افزایش ضریب شکست محیط، مقدار طول موج تشدید نیز افزایش می‌یابد و به سمت طول موج‌های بلندتر می‌رود. این نتیجه برای هر دو ساختار توری براگ با انتقال قاز و بدون انتقال فاز صادق است.

مرجع‌ها

[1] J. Villatoro, D. Monzón-Hernández, D. Talavera, "High resolution refractive index sensing with cladded multimode tapered optical fiber", Electronics letters. Vol. 40, pp. 106-107, 2004.
[2] A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire, J. B. Judkins, Bhatia, V. T. Erdogan, J. E. Sipe, "Long-period fiber gratings as band-rejection filters", Journal of lightwave technology. Vol. 14, pp. 58-65, 1996.
[3] N. Paliwal, J. John, "Lossy Mode Resonance Based Fiber Optic Sensors", Springer, Cham. pp. 31-50, 2017.
[4] I. D. Villara, "Optical sensors based on lossy-mode resonances, " Sensors and Actuators B, Vol. 240,pp. 174–185, 2017.
[5] M. Han, F. Guo, Y. Lu, "Optical fiber refractometer based on cladding-mode Bragg grating", Optics Letters. Vol. 35, pp 399-401, 2010.
[6] T. Erdogan, "Fiber grating spectra", Journal of lightwave technology. Vol. 15, pp. 1277-1294, 1997.

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]