همزمان سنجی میدان مغناطیسی و دما به وسیله حسگر تار نوری دوشکستی دار باریک شده احاطه شده با نانو سیال مغناطیسی در آینه حلقوی تار نوری

اعظم لایقی و حمید لطیفی
پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی

چکیده– در این مقاله حسگر اندازه گیرنده همزمان میدان مغناطیسی و دما پیشنهاد شده و به طور تجربی تست شده است. این حسگر تار نوری دوشکستی دار احاطه شده با نانو ذرات مغناطیسی در داخل آینه حلقوی تار نوری است. طول موج دره ها در پاسخ طیفی ساختار ارائه شده تحت تاثیر میدان مغناطیسی اعمالی و دما قرار می گیرد. با بهره گیری از روش ماتریس دو مشخصه ای امکان اندازه گیری میدان مغناطیسی و دما به طور همزمان فراهم می شود. رابطه خطی بین تغییر جابه جایی طول موجی و تغییر میدان مغناطیسی/ دما در محدوده معینی از میدان مغناطیسی و دما انجام شده است که برای کاربردهای حسگری مطلوب هستند.

کلید واژه- حسگر میدان مغناطیسی تار نوری، آینه حلقوی تار نوری ، تار نوری باریک شده بی دررو، نانو سیال مغناطیسی.

Simultaneous measurement of magnetic field and temperature based on magnetic fluid –clad nonadiabatic tapered Hi-Bi fiber in fiber loop mirror

Azam Layeghi and Hamid Latifi

Laser and Plasma Institute, Shahid Beheshti University.

Abstract- A simultaneous measuring sensor of magnetic field and temperature is proposed and experimented by the surrounded magnetic fluid as a cladding of non-adiabatic tapered Hi-Bi fiber optic in fiber loop mirror. The wavelength of the spectral resonance dips of the proposed structure is influenced by applied magnetic field and temperature. A two-parameter matrix method is proposed and utilized to measure the magnetic field and temperature simultaneously. The linear relationship between the corresponding wavelength shift variation and magnetic field/temperature change is obtained at certain ranges of magnetic field and temperature, which is favorable for sensing applications.

Keywords: Magnetic fiber sensor, fiber loop mirror, non-adiabatic tapered fiber, Nano-magnetic fluid.

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

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

۱- مقدمه

چیدمان آینه حلقوی تار نوری (*FLM*[1]) وسیله مورد علاقه ای است که در کاربردهای حسگری مورد استفاده قرار می گیرد. در FLM نور در دو جهت متفاوت با استفاده از جفت کننده ۳ dB تار نوری انتشار می یابد و تمام نور به درگاه ورودی بر می گردد. قرار دادن تار نوری دوشکستی دار در *FLM* دارای چندین مزیت از قبیل عدم وابستگی به قطبش نور ورودی و نسبت خاموشی بالا[2]است.

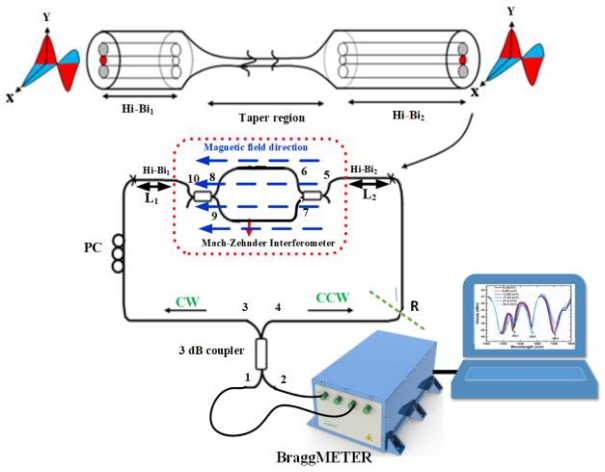
مواد سیال مغناطیسی (NMF[3]) با داشتن نانو ذرات مغناطیسی (با ابعاد *nm* ۵-۱۰) خواص مگنتو اپتیکی فراوانی از قبیل تغییر ضریب شکست، دو شکستی تنظیم پذیر و غیره دارند. وسایل فوتونیکی فراوانی به ویژه حسگرهای نوری بر پایه سیال مغناطیسی ساخته شده اند [1].

حسگری که بتواند چندین پارامتر را اندازه گیری نماید بسیار مورد علاقه است. اصولا حسگرهای اندازه گیرنده میدان مغناطیسی و دمای ساخته شده از ترکیب دو حسگر بهره برده اند [2] و یا از تار نوری بلور فوتونی استفاده نموده اند [3]. در کار قبلی گروه ما نشان داده شد که با تار نوری باریک شده بی دررو ساخته شده از تار نوری دوشکستی دار در داخل *FLM* حساسیت حسگر افزایش می یابد[4]. در این کار به علت تاثیر پذیری دمایی مواد سیال مغناطیسی و همچنین علاقه مندی به اندازه گیری همزمان دما از حسگر تارنوری باریک شده دوشکستی دار احاطه شده با مواد سیال مغناطیسی در داخل FLM استفاده شده است تا به طور همزمان دما و میدان مغناطیسی اندازه گیری شود.

۲- فیزیک و اصول کار حسگر

با باریک کردن تار نوری دوشکستی دار، محیط پیرامون تار نوری همانند غلاف تار نوری باریک شده عمل می کند و موجب انتشار چندین مد می شود. تار نوری باریک شده دوشکستی دار *PANDA* توزیع میدان الکتریکی نامتقارنی را به خاطر ساختارش بر می انگیزد. در ناحیه پایین باریک شدگی تار نوری جفت شدگی انرژی بین مد اصلی مغزی تار نوری کشیده نشده و مد اصلی غلاف و مدهای مرتبه بالاتر غلاف صورت می پذیرد. هر مد بخش غالبی از میدان الکتریکی در داخل مغزی دارد و مابقی اش در خارج مغزی است. میرایی نمایی نور از مرز مغزی-غلاف به صورت میدان میراشونده اتفاق می افتد. پس از آنکه مدها از ناحیه کمره یکنواخت مرکزی انتشار یافتند، آنها فازهای نوری متفاوتی بدست می آورند. اختلاف فازی بین مدها به ضریب شکست تار نوری و هم محیط پیرامون وابسته است. سپس دوباره آنها در ناحیه گذار رو به بالای تار نوری باریک شده به داخل مغزی باز می گردند. مدها تداخل می یابند و طیف عبوری به صورت تابع نوسانی از طول موج تغییر می کند. بنابر این یک تار نوری باریک شده همانند تداخل سنج ماخ زندر عمل می کند.

به منظور بررسی طیف تداخلی تار نوری باریک شده در FLM، خصوصیات عبوری تداخل سنج FLM به صورت نظری مطابق با دیاگرام شماتیکی چیدمان تجربی شکل (۱) بدست آورده شده است. چیدمان شامل یک جفت کننده تار نوریی *dB* ۳ و تار نوری باریک شده دوشکستی داری است که بین دو قطعه تار نوری دوشکستی دار در FLM ساندویچ شده است. همانگونه که در شکل (۱) مشاهده می شود چیدمان شامل یک تحلیل گر طیف نوری و نور از چشمه نور وارد یک درگاه جفت کننده نوری می شود و به باریکه نور تقسیم می شود. مطابق چیدمان یکی از پرتوهای نور در جهت ساعتگرد و دیگری



شکل ۱: چیدمان تجربی آزمایش اندازه گیری میدان مغناطیسی و دما با تار نوری باریک شده دوشکستی دار و NMF در داخل FLM.

---

[1] Fiber loop mirror
[2] High extinction ratio
[3] Nano-Magnetic Fluid

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

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

کننده نوری به هم می رسند و تداخل می نمایند. می در جهت پادساعتگرد منتشر می شوند و دوباره در جفت توان با آنالیز ماتریس جونز ماتریس طیف عبوری را به صورت زیر بدست آورد.

$$E_{out} = (\{[K_{4,2}][R][J_{HB2}]([K_{10,8}][J_1][K_{5,6}]+[K_{10,9}][J_2][K_{5,7}])[J_{HB1}][J_{PC}][K_{1,3}]\} + \{[K_{3,2}][J_{PC}][J_{HB1}]([K_{5,6}][J_1][K_{10,8}]+[K_{5,7}][J_2][K_{10,9}])[J_{HB2}][R][K_{1,4}]\})E_{in} \quad (۱)$$

ماتریس های $[J_1]$ ، $[J_2]$ و ϕ به صورت زیر تعریف و ماتریس های دیگر به وسیله روابط ۳ و ۴ داده می شوند:

$$[J_1]=\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}e^{i\varphi},[J_2]=\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix},\phi=\frac{2\pi nL}{\lambda} \quad (۲)$$

$$[K_I]=[K_{1,3}]=[K_{10,8}]=[K_{5,6}]=[K_{4,2}]=\begin{bmatrix}\sqrt{1-c} & 0\\ 0 & \sqrt{1-c}\end{bmatrix} \quad (۳)$$

$$[K_C]=[K_{1,4}]=[K_{5,7}]=[K_{10,9}]=[K_{3,2}]=\begin{bmatrix}j\sqrt{c} & 0\\ 0 & j\sqrt{c}\end{bmatrix} \quad (۴)$$

$$[J_{PC}]=\begin{bmatrix}\cos\theta & -\sin\theta\\ \sin\theta & \cos\theta\end{bmatrix}\begin{bmatrix}e^{i\Gamma/2} & 0\\ 0 & e^{-i\Gamma/2}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\cos\theta & \sin\theta\\ -\sin\theta & \cos\theta\end{bmatrix} \quad (۵)$$

$$[J_{HBi}]=\begin{bmatrix}e^{i\varphi_i/2} & 0\\ 0 & e^{-i\varphi_i/2}\end{bmatrix},[R]=\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & -1\end{bmatrix} \quad (۶)$$

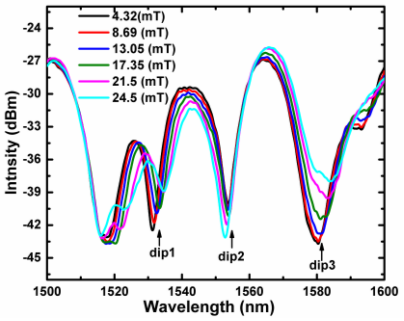
$[J_1]$ و $[J_2]$ به ترتیب ماتریس های بازوی حسگری و مرجع حسگر و $[K_I]$ و $[K_c]$ به ترتیب ماتریس های جفت شدگی برخط و عرضی جفت کننده ۳ dB هستند. c نسبت شکافتگی در جفت شونده است که در اینجا ۰/۵ فرض شده است. $[J_{PC}]$، $[J_{HBi}]$ (i=1,2) و $[R]$ که به ترتیب ماتریس های جونز کنترل گر قطبش، فیبر دو شکستی دار، آینه است. Γ تاخیر ساز و θ زاویه چرخش تیغه های موج کنترل گر قطبش نسبت به دستگاه مختصات آزمایشگاه است [۴]. طیف عبوری حسگر به وسیله ماتریس های جونز به صورت زیر بدست می آید:

$$T=2c^2(1-\cos\varphi)\times 4c^2\times\sin^2(\frac{\Gamma}{2})\sin^2(2\theta)\times\cos^2(\frac{\pi B(L_1+L_2)}{\lambda}) \quad (۷)$$

چهار عبارت معادله (۷) به ترتیب نشان دهنده تداخل ماخ زندر و جفت کننده هایش، جفت کننده های مستقیم ساگناک، کنترلگر قطبش و تار نوری دوشکستی دار هستند.

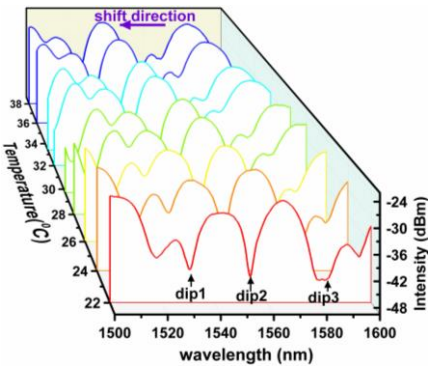
۳- آزمایش و نتایج تجربی

حسگر تار نوری باریک شده دوشکستی دار به وسیله لیزر CO_2 ساخته شده است. قطر و طول این حسگر به ترتیب حدود μm ۷ و cm ۰/۶ است. همچنین طول های تار نوری دو شکستی دار (L_1 و L_2) تقریبا cm ۱۰ و cm ۱۱/۴ است. برای اندازه گیری حساسیت حسگر ناحیه باریک شده با NMF پوشانده می شود و در FLM و در بین میدان مغناطیسی ناشی از حلقه های هلمهولتز قرار داده شده است. پاسخ طیفی حسگر نسبت به تغییرات میدان مغناطیسی در شکل (۳) نشان داده شده است. جابه جایی طول موجی nm ۳/۸ به ازاء تغییر میدان مغناطیسی در محدوده mT ۰- ۲۴ به وجود می آید.



شکل ۳: طیف عبوری حسگر تحت میدان های مغناطیسی متفاوت در محدوده mT ۰-۲۴ .

وابستگی دمایی حسگر از دمای اتاق (۲۲ ℃) تا ۵۰ ℃ بررسی شده است در حالیکه میدان مغناطیسی اعمالی صفر است. طیف عبوری حسگر در شکل (۴) نشان داده شده است. به علت ضریب دما نوری منفی MF، با افزایش دما طیف عبوری حسگر به سمت طول موج های کوچکتر جابه جا می شود. همچنین تار نوری دوشکستی



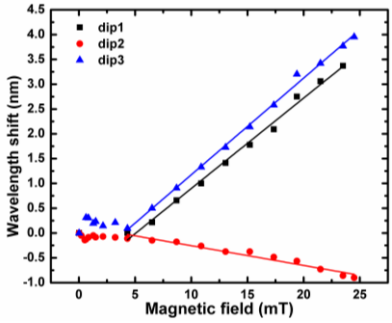
شکل ۴: طیف عبوری حسگر تحت دماهای متفاوت در محدوده ℃ ۲۲-۳۸.

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

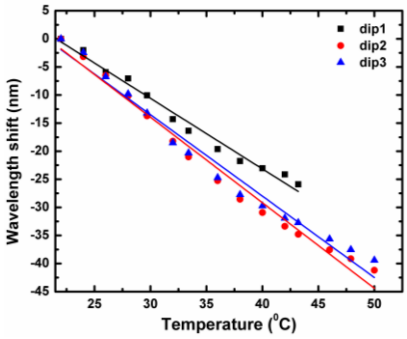
[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-02]

دار *PANDA* با افزایش دما حساسیت دمایی منفی نشان می دهد.

در شکل (۵) جابه جایی طول موجی طیف عبوری در دره های (۱)، (۲) و (۳) شکل (۳) به ازاء تغییرات میدان مغناطیسی نشان داده شده است. در حالیکه دما حدود ℃ ۲۲ ثابت نگه داشته شده است. شکل (۶) جابه جایی طول موجی ناشی از تغییرات دمایی این دره ها را نشان می دهد در حالیکه میدان مغناطیسی اعمال نشده است. با تغییر میدان مغناطیسی دره (۱) و (۳) با داشتن جابه جایی به سمت طول موج های بزرگتر نسبت به دره (۲) با جابه جایی بیشتری دارند. این در حالی است که دره (۲) با افزایش میدان مغناطیسی به سمت طول موج های کمتر جابه جا شده است. حسگر در محدوده *mT* ۴ تا ۲۴ دارای رفتاری خطی با حساسیت *pm/mT* ۱۸۲، -۳۹/۸ و ۱۹۵ و دارای حساسیت دمایی در محدوده ℃ ۲۲ تا ℃ ۵۰ برابر *nm/℃* ۱/۲۶-، *nm/℃* ۱/۵- و *nm/℃* ۱/۴- به سمت طول موج های کمتر به ترتیب برای دره های (۱)، (۲) و (۳) است.



شکل ۵: جابه جایی طول موجی حسگر تار نوری در مقابل میدان های مغناطیسی متفاوت برای دره های ۱، ۲و ۳.



شکل ۶: جابه جایی طول موجی حسگر تار نوری باریک شده در برابر دماهای متفاوت برای دره های ۱، ۲ و ۳.

دره های مختلف جابه جایی طول موجی متفاوتی نشان می دهند. اختلاف حساسیت دو دره (۱) و (۲) بیشتر است. ماتریس مشخصه $M_{H,T}$ به ازاء تغییرات میدان مغناطیسی و دما عملکرد حسگری این حسگر را برای دره های (۱) و (۲) می توان به صورت رابطه (۶) نمایش داد:

$$\begin{bmatrix}\delta\lambda_1\\ \delta\lambda_2\end{bmatrix}=M_{H,T}\begin{bmatrix}\Delta H\\ \Delta T\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0.182 & -1.26\\ -0.0398 & -1.5\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta H\\ \Delta T\end{bmatrix} \qquad (۶)$$

بنابراین با بررسی همزمان دو دره (۱) و (۲) دو کمیت اندازه گیری شونده میدان مغناطیسی و دما را می توان به طور همزمان بدست آورد. با استفاده از محاسبه انحراف معیار داده ها، سیستم تغییرات طول موجی *pm* ۲± را می تواند تفکیک کند. بنابراین حد آشکارسازی حسگر نسبت به تغییرات میدان مغناطیسی در محدوده *mT* ۲۴-۴و برابر *μT* ۲۵/۶ است.

۴- نتیجه‌گیری

یک ساختار تار نوری باریک شده دوشکستی دار احاطه شده با نانو مواد مغناطیسی با غلظت کم ۰/۱ ٪ برای اندازه گیری همزمان میدان مغناطیسی و دما طراحی شده است و خصوصیت حس کنندگی میدان مغناطیسی و دمایی ساختار به طور تجربی آزمایش شده است. بیشینه حساسیت میدان مغناطیسی و دمایی این حسگر به ترتیب برابر *pm/mT* ۱۹۵ و *nm/℃* ۱/۵- بدست آمده است. با استفاده از ماتریس دو پارامتری ارائه شده می توان میدان مغناطیسی و دمای محیط را به طور همزمان اندازه گیری نمود.

مراجع

[1] A. Layeghi, H. Latifi, and O. Frazão, "Magnetic field sensor based on nonadiabatic tapered optical fiber with magnetic fluid," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 26, no. 19, pp. 1904–1907, 2014.

[2] J. Xia, F. Wang, H. Luo, Q. Wang, and S. Xiong, "A Magnetic Field Sensor Based on a Magnetic Fluid-Filled FP-FBG Structure," *Sensors*, vol. 16, no. 5, p. 620, 2016.

[3] H. Liu, C. Tan, C. Zhu, Y. Wang, Y. Gao, H. Ma, and D. Cheng, "Simultaneous measurement of temperature and magnetic field based on directional resonance coupling in photonic crystal fiber," *Opt. Commun.*, vol. 391, pp. 111–115, 2017.

[4] A. Layeghi and H. Latifi, "Enhancement of the sensitivity of ferrofluidic magneto-optical fiber sensor by non-adiabatic tapered Hi-Bi fiber in fiber loop mirror," in *SPIE*, 2017, vol. 10323, pp. 1–4.

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

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