اندازه گیری شدت میدان مغناطیسی در غلظتهای متفاوت نانوذرات سیال مغناطیسی با استفاده از حسگر فیبر نوری باریک شده بی دررو

اعظم لایقی، محمد اسماعیل زیبایی، محمد مهدی طهرانچی و حمید لطیفی

پژوهشکده لیزر و پلاسما،دانشگاه شهید بهشتی

چکیده - در این مقاله تاثیر غلظت نانو ذرات فروسیال مغناطیسی با ابعاد *nm* ۱۰ بر روی حساسیت اندازه گیری میدان مغناطیسی با استفاده از حسگر فیبر نوری به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده ازحسگر ضریب شکست بر پایه فیبر نوری باریک شده و غوطه ور شده در نانوفروسیال مغناطیسی، حساسیت حسگر ، در محدوده میدان مغناطیسی ۰ تا *mT* ۲۵، اندازه گیری شده است. حسگر میدان مغناطیسی با غلظت های متفاوت نانو ذرات در محدوده ۰.۰۱٪ تا ۰.۱۲٪ (درصد حجمی) بیشترین حساسیت های شدتی و طول موجی به ترتیب *dB/mT* $^{-۳}$ ۱۰ × ۱۱.۳۶ و *pm/mT* ۲۱۲ را از خود نشان داده است.

کلید واژه- حسگر فیبر نوری، اندازه گیری میدان مغناطیسی، نانو ذرات مغناطیسی.

Nan-adiabatic tapered fiber optic sensor for magnetic field measurement with different nano-magnetic fluid concentration

A.Layeghi, M. I. Zibaii, M. M.Tehranchi, H. Latifi

Laser and Plasma Institute, Shahid Beheshti University

Abstract- In this paper the concentration effect of magnetic fluid (MF) nanoparticles with dimension of *10 nm* was investigated for magnetic field sensing with a non-adiabatic tapered optical fiber (NATOF) sensor. Using a refractive index (RI) sensor based-NATOF embedded in MF, the sensitivity of magnetic sensor in the range of *0-25 mT* was measured. The most intensity and wavelength sensitivity of magnetic field sensor for different nanoparticle concentrations from *0.01%* to *0.12%* was obtained 11.36×10^{-3} and *212 pm/mT*, respectively.

Keywords: fiber optic sensor, measuring magnetic field, Magnetic fluid nanoparticles

۱- مقدمه

اخیرا حسگرهای میدان مغناطیسی مبتنی بر تار نوری به طور گسترده ای مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته اند. دسته ای از این حسگرهای تار نوری از سیال مغناطیسی به عنوان ماده حس کننده استفاده می کنند. ماده سیال مغناطیسی ماده کلوئیدی از نانو ذرات مغناطیسی با پایداری بالا است که به طور یکنواختی در مایع حامل مثل آب یا اتر پخش شده است. به واسطه اینکه، مواد سیال مغناطیسی دارای خواص مگنتو اپتیکی گوناگونی از جمله اثر فارادی ، ضریب شکست تنظیم پذیر، شدت عبور وابسته به میدان و دوشکستی است بنابراین به طور چشمگیری مورد علاقه محققین می باشد و به عنوان ماده حس کننده برای پیشرفت حسگر میدان مغناطیسی به کار می رود[۱]. تعدادی از حسگرهای تار نوری میدان مغناطیسی که گزارش شده اند، از ماده سیال مغناطیسی برای پوشاندن سطح وسایل تار نوری مختلف از جمله تداخل سنج ها [۲]، توری های تار نوری [۳] و حلقه های میکرونی تارنوری [۴]، بهره گرفته اند و به این وسیله میدان مغناطیسی را از طریق اثر تغییر پذیری ضریب شکست ماده سیال مغناطیسی تحت اعمال میدان مغناطیسی اندازه گیری کرده اند. روش دیگر استفاده از این مواد سیال مغناطیسی تزریق کردن آنها به داخل حفره های تارهای بلور فوتونیکی یا کاواک فابری پرو است که علی رغم حساسیت خوبشان ساخت این حسگرها تا حدی مشکل است و تارهای بلور فوتونیکی عمدتا گران قیمت می باشند.

تداخل سنج مدی و میکرونی تار نوری، حسگر ضریب شکستی بسیار خوبی است که اخیرا به وجود آمده است[۵]. این حسگرها دارای قطر بسیار کوچک و میدان میراشونده بزرگی هستند که منجر می شود تا حساسیت بسیار بالایی به ضریب شکست محیط خارجی نسبت به سایر تداخل سنج های فیبر نوری معمولی نشان دهند. در این مقاله با استفاده از حسگر تار نوری باریک شده و غوطه ور در نانو ذرات فروسیال مغناطیسی، میدان مغناطیسی اندازه گیری شده است و تاثیر غلظت بر روی حساسیت حسگر مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- فیزیک و اصول کار حسگر

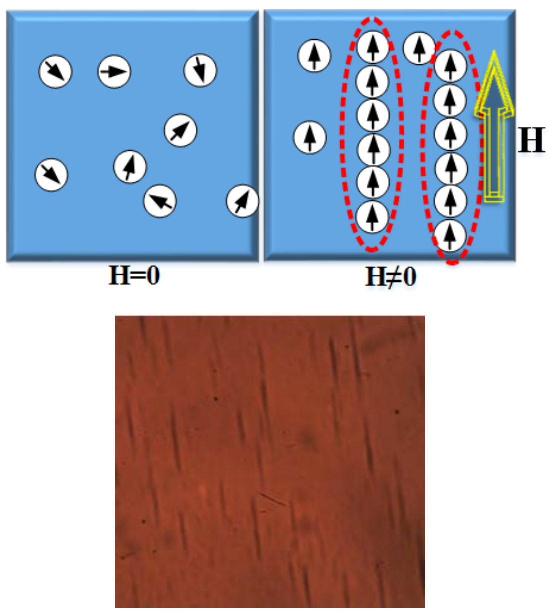
نانوفروسیال استفاده شده در آزمایش نانو ذرات Fe_3O_4 با ابعاد تقریبا ۱۰ *nm* در مایع حامل آب قرار دارد و چهار غلظت متفاوت نانوذرات ۰.۰۱٪، ۰.۰۰۵٪، ۰.۱٪ و ۰.۱۲٪ مورد استفاده قرار گرفته است. این ذرات در داخل میدان مغناطیسی به صف می شوند و زنجیره هایی از ذرات را تشکیل می دهند. در شکل ۱ تصویر با بزرگنمایی X ۱۰۰ از نانو ذرات که در اثر اعمال میدان مغناطیسی بصورت زنجیره ای به خط شده اند نشان داده شده است.

پذیرفتاری الکتریکی χ به بزرگی میدان مغناطیسی و جهت نسبی بین میدان الکتریکی E و میدان مغناطیسی H وابسته است. هنگامیه میدان مغناطیسی خارجی موازی با راستای انتشار نور است خواهیم داشت:

$$\partial\chi_{\parallel}/\partial H > 0 \qquad (۱)$$

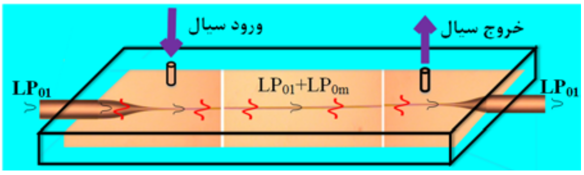
که $\chi\|$ پذیرفتاری الکتریکی است. رفتار ذرات مغناطیسی در سیال وابسته با میدان مغناطیسی است. بنابراین ضریب شکست سیال مغناطیسی به میدان وابسته است. ضریب شکست به صورت $n = \sqrt{\varepsilon_r} = \sqrt{1+\chi}$ بیان می شود که ε_r و χ ثابت دی اکتریک و پذیرفتاری الکتریکی را نشان می دهند. بنابراین ضریب شکست سیال مغناطیسی با افزایش میدان مغناطیسی افزایش می یابد.

تصویر میکروسکوپی حسگر میدان مغناطیسی پیشنهاد شده به همراه تصویر شماتیکی محفظه نگهدارنده در شکل ۲ نشان داده شده است. این حسگر شامل تار نوری تک



شکل ۱: شکل شماتیکی نانوذرات مغناطیسی در سیال قبل و بعد از اعمال میدان (شکل بالا)،تصویر واقعی به دست آمده از جهت گیری نانو ذرات پس از اعمال میدان مغناطیسی(شکل پایین).

مد است که با استفاده از لیزر CO_2 باریک شده است و در داخل نگهدارنده ای از جنس پلکسی قرار داده شده است. این حسگر دارای طول تقریبی ۶ *mm* و قطر کمره ۵-۷ µm است و دارای دو ناحیه گذار شدید در ناحیه باریک شدگی تارنوری است. حسگر تارنوری باریک شده به صورت مستقیم و بدون انحنا در داخل نگهدارنده قرار داده می شود. نگهدارنده دارای دو سوراخ برای ورود و خروج مواد سیال مغناطیسی است تا مواد سیال مغناطیسی به راحتی در کنار حسگر قرار گیرد و در صورت لزوم از کنار آن خارج شود.



شکل ۲: تصویر میکروسکوپی حسگر تار نوری باریک شده به همراه تصویر شماتیکی محفظه نگهدارنده حسگر.

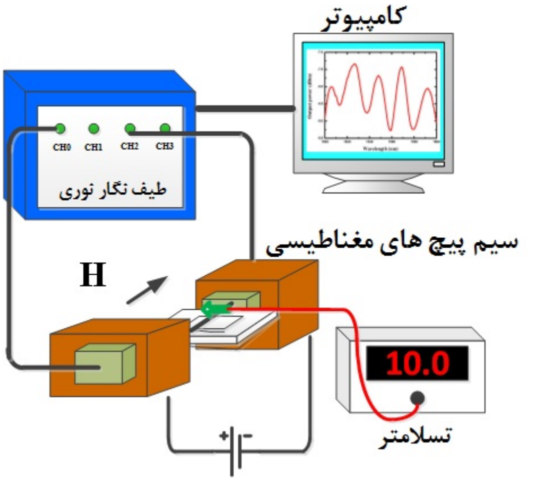
باریک شدگی تار نوری تک مد منجر به برانگیخته شدن مدهای مرتبه بالاتر در تار نوری تک مد می شود. مدهای مرتبه بالا، میدان میرا شونده ای را در محیط اطراف ناحیه باریک شده به وجود می آورند که می تواند محیط پیرامون تار نوری را احساس کنند. هنگامیکه نور از تار تک مد وارد اولین شیب ناگهانی ناحیه باریک شده می شود. تغییر شکل تار نوری منجر می شود که به همراه مد اصلی و حداقل یک مد مرتبه بالا بر انگیخته شود. این دو مد دوباره در انتهای ناحیه باریک شده، در گذار رو به بالا، با هم ترکیب شده و با یکدیگر تداخل می کنند. با فرض اینکه ضریب شکست های موثر دو مد n_1 و n_2 هستند، اختلاف فاز بین آنها به صورت $\Phi=2\pi\Delta n/\lambda$ است. به گونه ای که $\Delta n=n_1-n_2$ و λ طول موج خلاء است. طول موج *m* امین دره یعنی λ_m در طیف عبوری تداخل سنج مدی توسط رابطه زیر بیان می شود

$$\lambda_m = 2(n_1-n_2)L/(2m+1) \qquad (۲)$$

که *m* مرتبه تداخل است. از آنجائیکه n_2 به ضریب شکست خارجی حساس است، می توان با رد یابی طول موج دره تغییرات ضریب شکست محیط را بدست آورد.

۳-آزمایش و نتایج تجربی

چیدمان تجربی برای حس کردن میدان مغناطیسی در شکل ۳ نشان داده شده است. دو انتهای حسگر تار نوری به تحلیل گر طیف نوری و چشمه نور خروجی از آن متصل شده است. میدان مغناطیسی به وسیله دو سیم پیچ مغناطیسی به وجود می آید و قدرت میدان با تنظیم جریان ورودی به داخل سیم پیچ ها کنترل می شود. در این چیدمان برخلاف کار قبلی که توسط این گروه انجام شده است [۵] میدان مغناطیسی موازی با راستای انتشار نور است و تاثیرات متفاوت آن بر روی نانوذرات سیال مغناطیسی مشاهده شده است.

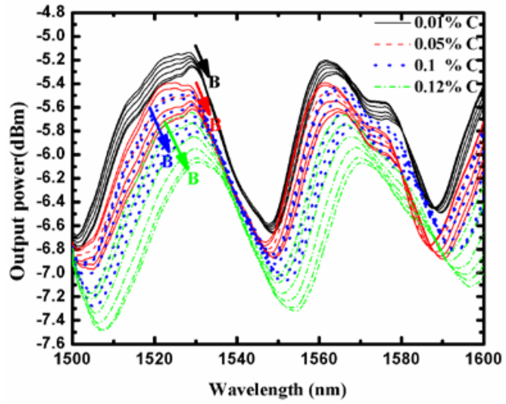


شکل ۳: چیدمان تجربی آزمایش اندازه گیری میدان مغناطیسی با تار نوری باریک شده و نانو ذرات مغناطیسی.

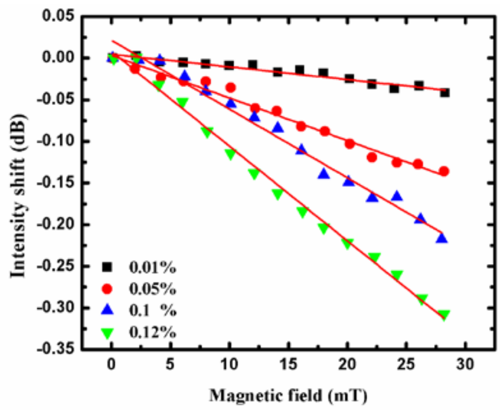
شکل ۴ طیف عبوری از حسگر تار نوری را در میدان های مغناطیسی متفاوت برای غلظت های گوناگون نانو ذرات مغناطیسی نشان می دهد. مشاهده می شود که طیف با افزایش میدان مغناطیسی و غلظت به سمت طول موج های بزرگتر جابه جا می شود و به طور همزمان شدت عبوری با افزایش میدان مغناطیسی کاهش می یابد. جهت پیکانها در شکل ۴ نشان دهنده جهت افزایش میدان مغناطیسی از ۰ تا ۲۵ *mT* در هر غلظت از نانو ذرات مغناطیسی است. جابه جایی به سمت طول موج های بزرگتر نشان می دهد که ضریب شکست نانو ذرات فروسیال مغناطیسی در حال افزایش یافتن است. همچنین با افزایش غلظت نانو ذرات فروسیال مغناطیسی میزان جابه جایی طول موجی و نیز توان افت افزایش می یابد. به گونه ای که مشاهده می شود ضریب شکست اولیه نانو ذرات فروسیال در حالت $B=۰$ با درصد غلظت بالاتر نانو ذرات در بین طیف حسگر با غلظت پایینتر نانوذرات (و در حالت $B>۰$) قرار گرفته است.

شکل ۵ جابه جایی شدت نور عبوری دره ای از طیف را

که نزدیک nm ۱۵۵۰ است را نشان می دهد. همان طور که در شکل مشاهده می شود با افزایش غلظت نانو ذرات



شکل ۴: طیف خروجی حسگر تار نوری برای غلظت های متفاوت نانو ذرات فروسیال مغناطیسی در داخل میدان های مغناطیسی که در جهت پیکانها از ۰ تا ۲۵ mT به اِزاء هر غلظت افزایش می یابد.

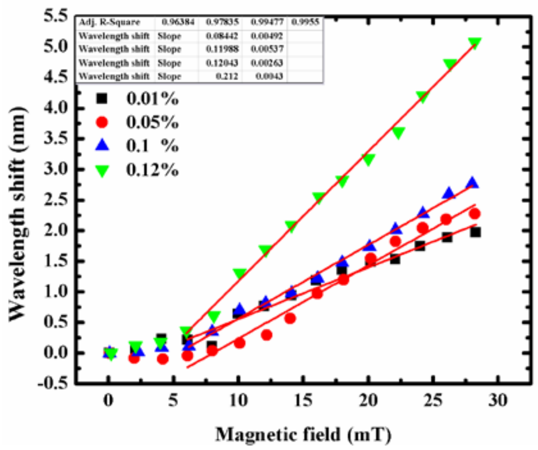


شکل ۵: پاسخ شدت حسگر تار نوری برای غلظت های متفاوت نانو فروسیال مغناطیسی به شدت میدان مغناطیسی متفاوت.

مغناطیسی میزان افت توان افزایش یافته همچنین با افزایش میدان مغناطیسی جابه جایی شدت عبوری اتفاق می افتد. بدین ترتیب با افزایش غلظت میزان حساسیت شدتی افزایش می یابد. مقدار حساسیت به ترتیب از غلظت ۰.۰۱٪ تا ۰.۱۲٪ برابر است با $^{-۳}$ ۱۰ × ۱.۵۸ .۰-، $^{-۳}$ ۱۰ × ۵.۱۱-، $^{-۳}$ ۱۰ × ۸.۲۵- و $^{-۳}$ ۱۰ × ۱۱.۳۶- *dB/mT.*

شکل ۶ جابه جایی طول موجی را برای غلظت های متفاوت نانوفروسیال مغناطیسی تحت اعمال میدان مغناطیسی نشان می دهد. جابه جایی طول موجی برای دره نزدیک طول موج nm ۱۵۵۰ مورد بررسی قرار گرفته شده است.

برای شدت میدان های مغناطیسی بالای mT ۶ یک رفتار خطی خوب بدست آمده است. مقدار حساسیت حسگر برای غلظت های ۰.۰۱٪، ۰.۰۵٪، ۰.۱٪ و ۰.۱۲٪ حساسیت های ۸۴.۴، ۱۱۹.۸۸، ۱۲۰.۴۳و ۲۱۲ *Pm/mT* بدست آمده است.



شکل ۶: جابه جایی طول موج حسگر تار نوری برای غلظت های متفاوت نانو فروسیال مغناطیسی در میدان های مغناطیسی متفاوت.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از تار نوری باریک شده و با استفاده از نانوفرو سیال مغناطیسی شدت میدان مغناطیسی اندازه گیری شده است. حسگر میدان مغناطیسی در محدوده میدان ۰ تا ۲۵ mT با غلظت های متفاوت نانو ذرات در محدوده ۰.۰۱٪ تا ۰.۱۲٪ (درصد حجمی) بیشترین حساسیت های شدتی و طول موجی به ترتیب dB/mT $^{-۳}$ ۱۰ × ۱۱.۳۶- و ۲۱۲ pm/mT از خود نشان داده است. نتایج نشان می دهد که می توان با کنترل غلظت میزان حساسیت حسگر تار نوری باریک شده را کنترل نمود.

مراجع

[1] Shengli Pu and Shaohua Dong, “Magnetic Field Sensing Based on Magnetic-Fluid-Clad Fiber-Optic Structure With Up-Tapered Joints,” *IEEE Photonics J.*, vol. 6, no. 4, pp. 1–6, 2014.

[2] W. Lin, Y. Miao, H. Zhang, B. Liu, Y. Liu, W. Lin, Y. Miao, H. Zhang, B. Liu, Y. Liu, and B. Song, “ Fiber-optic in-line magnetic field sensor based on the magnetic fluid and multimode interference effects,” Appl. Phy. Lett. vol. 151101, 2013.

[3] J. Zheng, X. Dong, P. Zu, L.-Y. Shao, C. C. Chan, Y. Cui, and P. P. Shum, “Magnetic field sensor using tilted fiber grating interacting with magnetic fluid.,” *Opt. Express*, vol. 21, no. 15, pp. 17863–8, 2013.

[4] X. Li and H. Ding, “All-fiber magnetic-field sensor based on microfiber knot resonator and magnetic fluid,” Opt.Lett. vol. 37, no. 24, pp. 5187–5189, 2012.

[5] A. Layeghi and O. Frazao, “Magnetic Field Sensor Based on Non-adiabatic Tapered Optical Fiber with Magnetic Fluid,” *IEEE Poton.Technol. Lett.*, vol. 26, no. 19, VOL. 26, NO. 19, 2014.