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

اندازه‌گیری دوشکستی فروسیال بر اساس تارنوری باریک شده بی‌دررو در ساختار آینه حلقوی

اعظم لایقی، حمید لطیفی، محمد اسماعیل زیبائی و امیدرضا رنجبر نائینی

پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی

چکیده –دو شکستی پارامتر مهمی در مواد نوری در زمینه نور شناخت ا ست. در این مقاله روش جدید برای اندازه‌گیری دو شکستی فروسیال مغناطیسی با استفاده از تار نوری باریک شده در چیدمان آینه حلقوی ارائه شده است. شبیه سازی تئوری به منظور اثبات کارآمد بودن سیستم اندازه‌گیری انجام شده است. نتایج تجربی بدست آمده نشان می‌دهد که دو شکستی فرو سیال در میدان مغناطیسی در محدوده ۰ تا ۲۹/۴۸ میلی تسلا بین ۰ تا $۳/۵\times۱۰^{-۴}$ تغییر کرده است. این چیدمان توانمندی بالقوه‌ای در زمینه حسگری تارنوری و کاربردهای زیستی از قبیل دارو رسانی را دارد.

کلید واژه- حسگر تارنوری، تارنوری باریک شده بی‌دررو، تارنوری آینه حلقوی، دوشکستی، فروسیال مغناطیسی.

Birefringence Measurement of Ferro-Fluid based on Non-Adiabatic Tapered Fiber Optic in Fiber Loop Mirror

Azam Layeghi, Hamid Latifi, Mohammad Ismail Zibaii**, and** Omid R Ranjbar-Naeini

Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University.

a_layeghi@sbu.ac.ir, latifi@sbu.ac.ir, m_zibaye@sbu.ac.ir, o_ranjbarnaeini@sbu.ac.ir

Abstract- Birefringence measurement is an important properties of optical material in optical area. Compared with conventional birefringence measurement method, a novel birefringence measurement method of ferro-fluid is presented using non-adiabatic tapered fiber optic in fiber loop mirror configuration. Simulation and experiment were done to prove the effective of measurement system. Also, the birefringence of ferro-fluid in the range from 0 to 29.48 mT was obtained equal to $0\text{-}3.5\square10^{-4}$. This structure has great potential in the optical sensing area and biomedical applications as drug delivery.

Keywords: Birefringence, Fiber loop mirror, Ferro-fluid , non-adiabatic tapered fiber, Optical fiber sensor.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]

۱. مقدمه

نانو ذرات مغناطیسی پخش شده در محیط مایعات گوناگون به فروسیال مغناطیسی معروف هستند و به صورت گسترده‌ای در کاربردهای فیزیکی و مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرند[1]. جذاب تر آنکه فروسیال‌ها در زمینه بیولوژی و فناوری زیستی به خوبی مورد استقبال بوده‌اند[2]. برای مثال پیوند آنتی‌بادی‌ها با ذرات مگامیت (γ-Fe_3O_4) مطالعه شده است. از این روش برای دارو رسانی هدفمند در داخل بدن با استفاده از میدان مغناطیسی استفاده می شود. اندازه‌گیری‌های دوشکستی نوری یک ابزار آزمون فیزیکی مناسب برای اثبات این پیوند است[2].

نانوذرات مغناطیسی به دلیل دارا بودن اندازه نانویی‌شان موجب شده‌اند تا فروسیال دارای خصوصیت پارامغناطیس باشد. با اعمال میدان مغناطیسی، ذرات مغناطیسی فروسیال ساختار منظمی را در امتداد میدان مغناطیسی بدست می‌آورند. بدین ترتیب سیال مغناطیسی ناهمسانگرد می‌شود و دوشکستی مشابه کریستال تک محوری خواهد داشت[3]. هنگامیکه میدان مغناطیسی برداشته می‌شود، خاصیت مغناطیسی فروسیال از بین می‌رود و ذرات به حالت بی‌نظمی و بی‌قاعدگی و کاتوره‌ای خود بر می‌گردند.

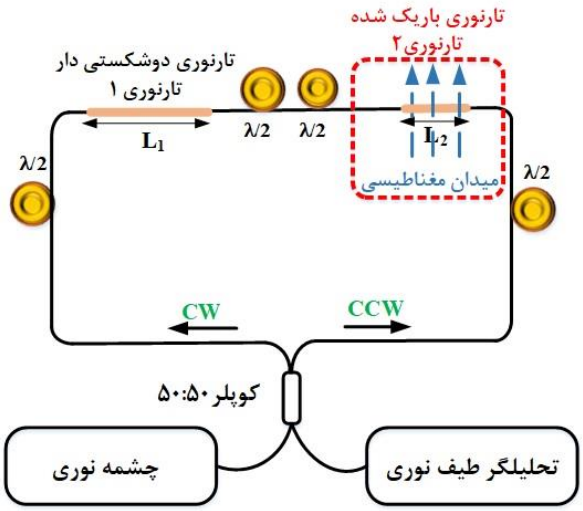
فرض می‌شود که فروسیال آبی شامل تنها ذرات منفرد است که هر کدام از آنها به عنوان یک ناحیه واحد هستند که با معلق شدن در آب به صورت پارامغناطیس عمل می‌کنند و مغناطش کلوئید حاصل را می‌توان توسط فرمول لانگوین شرح داد. همچنین اندازه‌گیری دوشکستی القاء شده از میدان مغناطیسی در فروسیال‌ها یک روش ماکروسکوپی جالب در نگاه بهتر به طرحواره ذره را می‌دهد. دو شکستی حاصله نیز از فرمول لانگوین پیروی می‌کند.

برای اندازه‌گیری دوشکستی سیستم موجبر نوری, فروسیال مغناطیسی [4] و سایر سیستمها اکثرا از پلاریزور و آنالیزور در فضای آزاد اپتیکی استفاده می‌شود.

دراین مقاله دوشکستی فروسیال مغناطیسی با استفاده از برهمکنش میدان میرا شونده تارنوری با محیط اطراف حسگر تارنوری در چیدمان آینه حلقوی بدست آورده شده است. دامنه میدان میرا شونده در تارنوری تک مد بسیار کم است. اما با باریک کردن تارنوری می‌توان مقدار عمق نفوذ میدان میراشونده را به میزان قابل توجهی افزایش داد. علاوه بر آن، می‌توان از آن برای طراحی وسایل نوری و حسگرهای تارنوری جدید مانند فیلتر دوشکستی تنظیم پذیر، میراکننده نوری و کلیدهای نوری بهره برد.

۲. تئوری

در کارهای اخیر ساختار آینه حلقوی تارنوری را به همراه تارنوری باریک شده نشان داده‌ایم [5] ,[3]. تداخل سنج آینه حلقوی تارنوری متشکل از یک کوپلر تارنوری ۵۰:۵۰، دو قطعه تارنوری با طول‌های L_1 و L_2 به ترتیب دارای دو شکستی‌های β_1 و β_2 و کنترلگرهای قطبش تماما تارنوری است. کنترل‌گرهای قطبش به صورت صفحه نیم موج عمل می‌کنند. چیدمان آینه حلقوی به همراه تارنوری باریک شده در شکل ۱ نشان داده شده است. در این چیدمان از منبع نوری با پهنای باند وسیع، تحلیل‌گر طیف نوری با تفکیک پذیری ۱ پیکومتر و چهار کنترل‌گر قطبش و تارنوری باریک شده در حلقه استفاده شده است. تارنوری باریک شده در یک نگهدارنده قرار داده و توسط فروسیال مغناطیسی احاطه شده است. همانگونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود نور در درگاه ورودی کوپلر به دو پرتو تقسیم می شود. یکی از این



شکل ۱: شماتیک تارنوری باریک شده احاطه شده با فروسیال مغناطیسی در داخل آینه حلقوی.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]

پرتوها در جهت ساعتگرد و دیگری در جهت پادساعتگرد منتشر می‌شوند و دوباره در کوپلر به یکدیگر رسیده و تشکیل طرح تداخلی را می‌دهند. همچنین پرتوهای تداخلی در کوپلر به درگاه‌های خروجی و ورودی وارد می‌شوند. خصوصیات این پرتوهای تداخلی به طور همزمان توسط مقدار دوشکستی تارنوری، حالت قطبش کنترل‌گر قطبش و طول ناحیه باریک شده تعیین می‌شود.

طیف عبوری از آینه حلقوی توسط ماتریس جونز قابل محاسبه است [6]:

$$T=[\cos(\frac{\phi_1+\phi_2}{2})\sin(\frac{\theta_1+\theta_2}{2})\cos(\frac{\theta_1-\theta_2}{2})+\cos(\frac{\phi_1-\phi_2}{2})\sin(\frac{\theta_1-\theta_2}{2})\cos(\frac{\theta_1+\theta_2}{2})]^2 \quad (۱)$$

θ_i (i=۱و۲) جهتگیری قطبش نور نسبت به دستگاه مختصات آزمایشگاه هستند. ϕ_i اختلاف فاز ناشی از نواحی دوشکستی دار است که مقدار آن برابر با $2\pi\beta_iL_i/\lambda$ است به گونه‌ای که L_1 طول تارنوری باریک شده و L_2 طول تارنوری دوشکستی دار و β_1 ضریب دوشکستی تارنوری دوشکستی دار و β_2 ضریب دوشکستی تارنوری باریک شده و محیط پیرامون آن و λ طول موج منبع نوری است.

همانطور که رابطه (۱) مشاهده می شود با چرخاندن محورهای تارنوری دو بخش دوشکستی‌دار به وسیله تیغه‌های نیم موج می‌توان طول دوره تناوب طیف عبوری را تنظیم نمود. هنگامیکه زاویه چرخش قطبش دو قسمت ۱و ۲ با هم برابر باشد ($\theta_1=\theta_2$) طول راه نوری موثر تداخل $\beta_1L_1+\beta_2L_2$ است. چنانچه زوایا برهم عمود باشند ($\theta_2=90-\theta_1$) طول راه نوری دو بخش دوشکستی‌دار برابر $\beta_1L_1-\beta_2L_2$ است. در این حالتها دوره طول موجی $\Delta\lambda_\pm$ طیف عبوری به صورت رابطه زیر است.

$$\Delta\lambda_\pm=\frac{\lambda^2}{\beta_1.L_1\pm\beta_2L_2} \quad (۲)$$

آینه حلقوی با دو بخش دو شکستی‌دار این امکان را فراهم می‌کند که به راحتی دوره تناوب طول موجی طیف عبور برای دوشکستی‌های کم طبق مخرج رابطه (۳) با هم جمع و یا کم شوند. بنابراین با اندازه‌گیری دو دوره تناوب طول موجی مجزای $\Delta\lambda_+$ و $\Delta\lambda_-$ و داشتن طول L_2 می‌توان دو شکستی β_2 را طبق رابطه زیر محاسبه نمود:

$$\beta_2=\frac{\lambda^2}{2L_2}(\frac{1}{\Delta\lambda_+}-\frac{1}{\Delta\lambda_-}) \quad (۳)$$

رابطه (۳) نشان می دهد که برای محاسبه دوشکستی تارنوری دوم نیازی به دانستن دوشکستی و طول تارنوری اول نمی باشد.

۳. نتایج تجربی

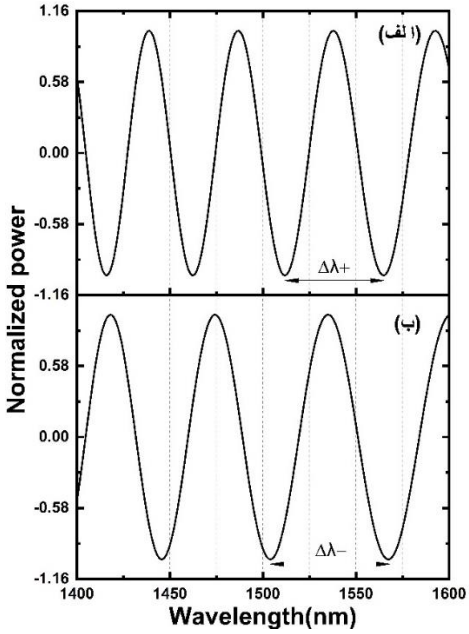
در این بررسی تارنوری شماره ۱ دوشکستی‌دار پاندا با ضریب دوشکستی β_1 برابر با $3/3\times10^{-4}$ استفاده شده است. تارنوری شماره ۲ تارنوری تک مد می باشد که با استفاده از روش کششی-حرارتی به وسیله لیزر CO_2 به صورت بی‌دررو باریک شده است. در این ساختار تارنوری باریک شده دارای طول باریک شدگی و قطر باریک شدگی به ترتیب برابر با ۱ سانتی‌متر و ۷ میکرومتر است. مطابق شماتیک چیدمان تجربی نشان داده شده در شکل ۱ تارنوری باریک شده احاطه شده با فروسیال مغناطیسی در ساختار آینه حلقوی قرار داده می‌شود.

با توجه به تئوری، طیف عبوری از ساختار آینه حلقوی برای حالت $\beta_1L_1+\beta_2L_2$ در شکل ۲-الف نشان داده شده است. در شکل ۲-ب طیف عبوری از تارنوری برای حالت $\beta_1L_1-\beta_2L_2$ در ساختار آینه حلقوی را نشان می‌دهد. در این محاسبات طول تارنوری دوشکستی‌دار (L_1) برابر ۲۵ سانتی‌متر و دوشکستی تارنوری باریک شده احاطه شده با فروسیال (β_2) برابر با $3/5\times10^{-4}$ در نظر گرفته شده است.

برای اندازه‌گیری دوشکستی فروسیال مغناطیسی تارنوری باریک شده با فروسیال مغناطیسی احاطه شده و در ساختار آینه‌حلقوی قرار داده می‌شود و با اعمال میدان مغناطیسی در محدوده ۰ تا ۲۹/۴۸ میلی‌تسلا، طیف عبوری از چیدمان برای هر میدان مغناطیسی اندازه‌گیری می‌شود. تغییرات دوره تناوب طول موجی برای دو حالت قطبش عبوری در

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]

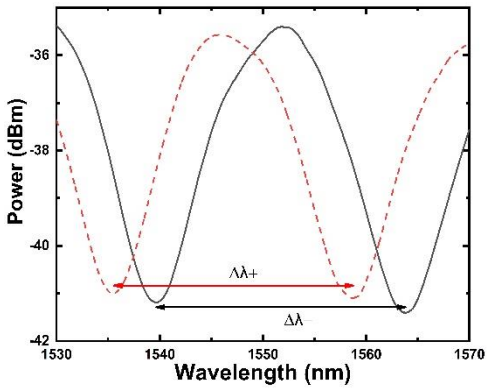


شکل ۲: طیف‌های عبوری حاصل از تئوری چیدمان آینه حلقوی شامل دو بخش دوشکستی‌دار الف) حالت $\beta_1L_1+\beta_2L_2$ ب) حالت $\beta_1L_1-\beta_2L_2$.

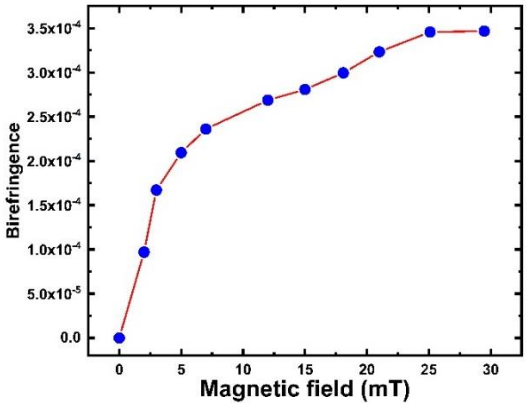
میدان ۱۸ میلی تسلا در شکل ۳ نشان داده شده است. در این میدان مقادیر $\Delta\lambda_+$ و $\Delta\lambda_-$ به ترتیب برابر ۲۳ و ۲۴/۳۹۸ نانومتر است. نتایج بدست آمده مطابق شکل ۴ نشان می‌دهد که دوشکستی فروسیال در این محدوده میدان مغناطیسی بین ۰ تا $۳/۵\times۱۰^{-۴}$ تغییر کرده است. آزمایش برای هر وضعیت قطبش سه بار تکرار شده است.

۴. نتیجه‌گیری

با قرار دادن تارنوری باریک شده بی‌دررو احاطه شده با فروسیال مغناطیسی در ساختار آینه حلقوی و بررسی پاسخ طیف عبوری آن به صورت تئوری و تجربی، یک روش ساده



شکل ۳: طیف‌های نوری عبوری از چیدمان در دو حالت قرارگیری تیغه‌های نیم موج در ۱۸ میلی‌تسلا.



شکل ۴: نتایج تجربی دوشکستی فروسیال تحت میدان مغناطیسی‌های متفاوت با خطای ۲ پیکومتر.

برای اندازه‌گیری دوشکستی بر اساس تداخل سنجی ارائه شده است. با این چیدمان دوره طول موجی طیف عبوری برای استخراج مقادیر طول راه نوری $\beta.L$ استفاده شده است. این اندازه گیری تماما با تارنوری و با حجم کمی از فروسیال انجام پذیرفته است. از این چیدمان می‌توان در کاربردهای صنعتی و زیستی استفاده نمود تا اثرات دوشکستی مورد بررسی قرار گیرد. همچنین از آن برای کاربردهای حسگری اندازه گیری میدان مغناطیسی نیز می‌توان استفاده نمود.

مراجع

[1] R. E. Rosensweig, “Magnetic Fluids,” *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 19, no. 1, pp. 437–461, 1987.

[2] U. Hateli, W. SchOtt, J. Teller, and M. Zborowski, *Scientific and Clinical Applications of Magnetic Carriers*. 1997.

[3] A. Layeghi and H. Latifi, “[INVITED] Magnetic field vector sensor by a nonadiabatic tapered Hi-Bi fiber and ferrofluid nanoparticles,” *Opt. Laser Technol.*, vol. 102, pp. 184–190, 2018.

[4] S. S. Taketomi, S. Ogawa, H. Miyajima, and S. ChikazumiChikazumi, “Magnetic birefringence and dichroism in magnetic fluid,” *IEEE Transl. J. Magn. Japan*, vol. 4, no. 6, pp. 384–394, 1989.

[5] ا. لایقی, ح. لطیفی ,م. ا. زیبائی, “کاهش حساسیت دمایی تارنوری با دوشکستی بالا در ساختار آینه حلقوی با استفاده از باریک سازی بی دررو ”*بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران*., ۱۳۹۷.

[6] Y. Yang, L. Lu, S. Liu, W. Jin, Z. Han, and Y. Cao, “Temperature-insensitive pressure or strain sensing technology with fiber optic hybrid Sagnac interferometer,” in *SPIE*, vol. 9852, p. 985216, 2016.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]