بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۴-۱۲ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

اندازه‌گیری مستقیم ضریب جذب غیرخطی نانوذرات شاره مغناطیسی با استفاده از انحراف‌سنجی ماره‌ای موازی و مقایسه آن با روش جاروب z

حسین قاسمی[۱] و سیف اله رسولی[۲]

پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، تهران[۱]،

دانشگاه تحصیلات تکمیلی در علوم پایه زنجان[۲]،

چکیده - در این مقاله با استفاده از دو روش انحراف‌سنجی ماره‌ای موازی در پیکربندی جاروب z و روش جاروب z، ضریب جذب غیرخطی نانو ذرات شاره مغناطیسی اندازه‌گیری شده است. مقدار ضریب جذب غیرخطی ۷۲×۱۰^{-۳} cm/W با علامت مثبت از روش جاروب-z به‌دست آمده که نشان دهنده جذب دوفوتونی است. در روش انحراف‌سنجی ماره‌ای موازی تغییرات شعاع انحنا باریکه و از آن تغییرات فاز و در نتیجه ضریب شکست و ضریب جذب غیرخطی به ترتیب $۹/۸\times۱۰^{-۴}$ cm^2/W - و ۶۷×۱۰^{-۳} cm/W به‌دست آمده است. ضریب جذب غیرخطی به‌دست آمده از روش ماره در توافق خوبی با مقدار به‌دست آمده از روش جاروب-z می‌باشد.

کلید واژه- پدیده تالبوت، انحراف‌سنجی ماره‌ای، لیزر، نانو ذرات.

Measurement of Nonlinear Absorption Coefficient of Colloidal Ferro-fluid Nanoparticles Using Parallel Moire′ Deflectometery and Comparison with Z-Scan Method

Hossein Ghasemi[1] and Saifollah Rasouli[2]

Plasma and Nuclear Fusion Research School, NSTRI, Tehran, Iran[1],

Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan, Iran[2],

Abstract- In this paper we have used parallel moire′ deflectometery in z-scan configuration and z- scan methods to measure nonlinear coefficient of ferrofluid. Values obtained from two methods are compared. The value of nonlinear coefficient is obtained to be 72×10^{-3} cm/W in z-scan method. The positive sign illustrate two photon absorption process. The radius of curvature of laser beam and phase changes are extracted and nonlinear coefficient was in good agreement with the value of z-scan method.

Keywords: Talbot effect, Parallel moiré fringes, Laser, Nanoparticles.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

۱- مقدمه

بسیاری از پدیده‌های غیرخطی از ضریب شکست غیرخطی و ضریب جذب غیرخطی نتیجه می‌شود. که باعث کاربردهای جالبی از این رشته شده است. محلول‌های مغناطیسی یکی از شاخه‌های نانو است، که کمتر از دیگر شاخه‌های نانو به آن پرداخته شده است. محلول‌های مغناطیسی از ذرات بسیار ریز کلوییدی (در حدود ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر) از جنس فلزهایی که خاصیت مغناطیسی دارند (مانند آهن و کبالت) به‌شکل سوسپانسیون در مایع، ساخته می‌شوند.

اولین بار گلت و همکارانش با استفاده از انحراف سنجی ماره، اثرات عدسی گرمایی القاء شده را با اندازه‌گیری کاهش نمایانی نقش ماره بررسی کردند[۱]. هم‌چنین در مقاله‌ی [۲] ضریب شکست غیرخطی شاره مغناطیسی با استفاده از فریزهای ماره موازی مورد بررسی قرار گرفت. یکی از مستندترین روش‌های اندازه‌گیری ضریب شکست و ضریب جذب غیرخطی مواد تکنیک جاروب z است.

در این مقاله ضریب شکست و ضریب جذب غیرخطی این ماده با استفاده از روش انحراف‌سنجی ماره موازی مورد مطالعه قرار گرفته است. برای بررسی صحت مقدار به‌دست آمده‌ی ضریب جذب غیر خطی از روش جاروب z استفاده شد[۳].

۲- مبانی نظری

در شدت‌های بالا، ضریب جذب تابعی از شدت نور تابشی می‌باشد. بنابراین:

$$\alpha(I)=\alpha+\beta I$$

که در آن β ضریب جذب غیرخطی می‌باشد. جذب غیرخطی می‌تواند ناشی از جذب چند فوتونی مستقیم، اشباع جذب یک فوتونی یا جذب حامل‌های آزاد باشد.

جهت اندازه‌گیری ضریب جذب غیرخطی نانوذرات شاره مغناطیسی از چیدمان جاروب z روزنه باز استفاده شده است. از این روش می‌توان مقدار و علامت ضریب جذب غیرخطی را تعیین کرد [۳]. برای انجام آزمایش از لیزر نئودیمیوم یاگ دمش دیودی موج پیوسته با توان ۷۰ میلی‌وات و کمر باریکه ۰۳/ میلی‌متر استفاده شده است. رابطه بین مقدار توان عبوری (T) و ضریب جذب غیرخطی (β) به‌صورت زیر می‌باشد (به‌شرط $q_0(0)>1$) [۳]:

$$T(z,S=1)=\sum_{m=0}^{\infty}\ [-I_0L_{eff}\beta/(1+z^2/z_0^2)]^m/(m+1)^{3/2}$$

$$L_{eff}=(1-\exp(-\alpha L))/\alpha$$

که در این روابط L و L_{eff} به‌ترتیب ضخامت و ضخامت موثر نمونه، I_0 شدت باریکه لیزر در کانون عدسی و ω_0 کمر باریکه در کانون می‌باشد.

در روش انحراف‌سنجی ماره‌ای موازی جهت اندازه‌گیری ضریب شکست غیرخطی[۲] نمونه مابین دو عدسی حرکت داده می‌شود، در نتیجه تغییراتی در شعاع انحنای نور ایجاد می‌شود. بنابراین مطابق رابطه‌ی،

$$d_m=\frac{rd}{Z_k}, \qquad (۱)$$

گام فریزهای ماره تغییر می‌کند که r، d، Z_k، به‌ترتیب شعاع انحنای باریکه، گام توری و فاصله تالبوت می‌باشد. با تعیین موقعیت نقاط بنیادی برای دستگاه اپتیکی، شعاع انحنای باریکه در ورود به توری G1 بر حسب z قابل استنتاج است.

$$r(z)=L_2-S(z)-f(t), \qquad (۲)$$

که L_2 فاصله‌ی توری G_1 از عدسی L_2، S فاصله‌ی صفحه‌ی اصلی خروجی دستگاه اپتیکی تا L_2 و f_t فاصله‌ی کانونی سیستم اپتیکی است. با استفاده از ماتریس تبدیل دستگاه به رابطه زیر برای شعاع انحنای جبهه موج می‌رسیم،

$$r(z)=L_2+\frac{f_2^{\,2}}{z}-\frac{f_2^{\,2}f_{eff}}{z^2}-f_2. \qquad (۳)$$

حال می‌بایست اثرات غیرخطی ایجاد شده توسط شدت باریکه روی نمونه را به‌صورت کمیت قابل اندازه‌گیری بیان شود. با عبور باریکه‌ی همگرا و گاوسی لیزر از نمونه، با فرض وجود جذب غیرخطی، توزیع تابندگی و انتقالِ فاز باریکه در صفحه‌ی خروجیِ نمونه به‌صورت زیر به‌دست می‌آید،

$$\Delta\phi(z,r)=\frac{kn_2}{\beta}\ln[1+q(z,r)], \qquad (۴)$$

به طوریکه $q(z,r)=\beta I(z,r)L_{eff}$. با بسط رابطه بالا،

$$\phi(z,r)=kIn_2L_{eff}-\frac{k\beta n_2}{2}I^2L_{eff}^{\,2}, \qquad (۵)$$

به‌دست می‌آید. با جایگذاری تابع توزیع گاوسی باریکه در رابطه فوق داریم،

$$I(r,z)=I_0\frac{w^2{}_0}{w^2(z)}\exp(-\frac{2r^2}{w(z)^2}),$$

در تقریب عدسی نازک، فاصله‌ی کانونی f_{eff}،

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

$$f_{eff}(z)=\frac{\pi w^4(z)}{4n_2L_{eff}P}+\frac{\beta w(z)^2}{4n_2}= \quad (۶)$$
$$f_{n_2}(0)\left(1+\frac{z^2}{z_o^2}\right)^2+f_{n_2,\beta}(0)\left(1+\frac{z^2}{z_o^2}\right),$$

به‌دست می‌آید. که در آن $f_{n_2}(0)$ و $f_{n_2,\beta}(0)$ به‌عنوان فاصله‌های کانونی موثر در کانون تعریف می‌شوند. با جایگذاری رابطه (۳) و (۶) در رابطه (۱) خواهیم داشت،

$$d_m=\frac{d}{Z_k}[L_2-f_2+\frac{f_2^{\,2}}{z}-(\frac{f_2^{\,2}}{z^2}) \quad (۷)$$
$$(f_{n_2}(O)\left(1+\frac{z^2}{z_o^2}\right)^2+f_{n_2,\beta}(O)\left(1+\frac{z^2}{z_o^2}\right)).$$

آنچه از این رابطه مشخص است، وابستگی گام فریزهای ماره به فاصله کانونی موثر است که با داشتن مقادیر $f_{n_2}(0)$ و $f_{n_2,\beta}(0)$ ضریب شکست غیرخطی و ضریب جذب غیرخطی به‌دست می‌آید. اگر از رابطه نسبت به z مشتق‌گیری شود و برابر صفر قرار داده شود، رابطه زیر به‌دست می آید،

$$f_{n_2}(0)=\frac{z_0a_{\min}+2f_{n_2,\beta}(0)}{2(1-a_{\min}^4)}, \quad (۸)$$

که z_0 طول پراش رایلی و $a_{\min}=\frac{z_{\min}}{z_0}$ می‌باشد. با جایگذاری رابطه (۸) در رابطه (۷)،

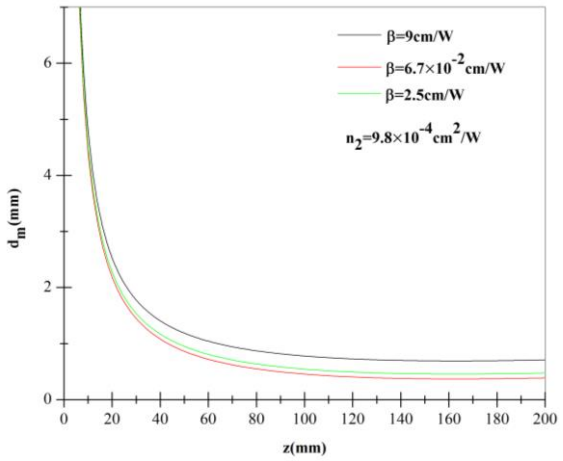
$$d_m=\frac{d}{Z_k}[L_2-f_2+\frac{f_2^{\,2}}{z}- \quad (۹)$$
$$(\frac{f_2^{\,2}}{z^2})([hf_{n_2,\beta}(0)+s]\left(1+\frac{z^2}{z_o^2}\right)^2+f_{n_2,\beta}(0)\left(1+\frac{z^2}{z_o^2}\right))].$$

(

گام فریزهای ماره به‌دست می‌آید، که در آن ثابت‌های h و s به‌صورت زیر می‌باشند،

$$h=-\frac{1}{(1-a_{\min}^4)},s=\frac{z_0a_{\min}}{2(1-a_{\min}^4)}$$

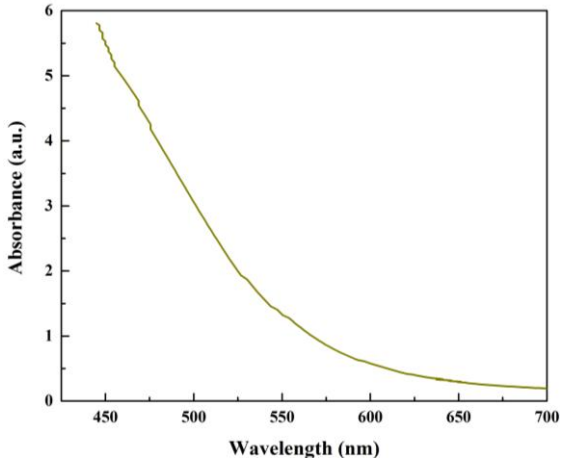
رابطه‌ی (۸) به مقادیر گام فریزهای ماره در zهای مثبت، که از آزمایش به‌دست آمده است، برازش داده می‌شود. بدین ترتیب پارامتر مجهول $f_{n_2,\beta}(0)$ ، قابل استخراج است. با داشتن دو پارامتر $f_{n_2}(0)$ ، $f_{n_2,\beta}(0)$ و با استفاده از رابطه‌ی (۶)، ضریب جذب غیرخطی و ضریب شکست غیرخطی نمونه‌ی مورد نظر تعیین می‌شود. نمودار تئوری گام فریزهای ماره در ضریب شکست غیرخطی ثابت به ازاء ضرایب جذب غیرخطی متفاوت در شکل زیر نمایش داده شده است، البته بایستی یادآور شد که تغییرات ضریب شکست ناشی از تغییرات همزمان دو ترم ضریب شکست و ضریب جذب غیرخطی است.



شکل ۱: نمودار تئوری گام فریزهای ماره موازی به ازاء ضریب شکست غیرخطی ثابت.

۳- نتایج تجربی

طیف جذبی نانوذرات شاره مغناطیسی تولید شده در محلول تینر شکل ۲ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود. با توجه به قانون بیر لامبرت A=αl که در آن α ضریب جذب خطی و l طول مسیر می‌باشد، می‌توان مقدار جذب خطی را به‌دست آورد. در طول‌موج ۵۳۲ نانومتر، ضریب جذب خطی به‌دست آمده برای نانوذرات شاره مغناطیسی ۱/۸ بر سانتی‌متر می‌باشد.



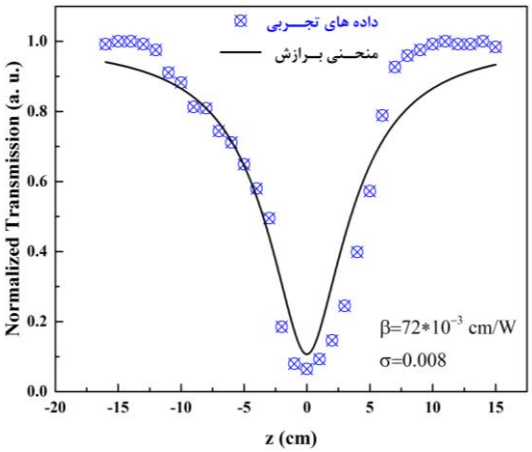
شکل۲: طیف جذبی فرابنفش- مرئی محلول شاره مغناطیسی.

آزمایش جاروب z روزنه باز محلول نانوذرات شاره مغناطیسی با استفاده از سلول با ضخامت ۱ میلی‌متر انجام شده است. منحنی تغییرات عبور جاروب z روزنه باز در شکل ۳ نشان داده شده است. از این منحنی می‌توان علامت و اندازه ضریب جذب غیرخطی را به‌دست آورد. مقدار ضریب جذب غیرخطی برای نانوذرات شاره مغناطیسی ۷۲×۱۰^{-۳} سانتی‌متر بر وات به‌دست می‌آید. با علامت مثبت که نشان دهنده جذب دوفوتونی است. همان‌طور که شکل ۳ نشان

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

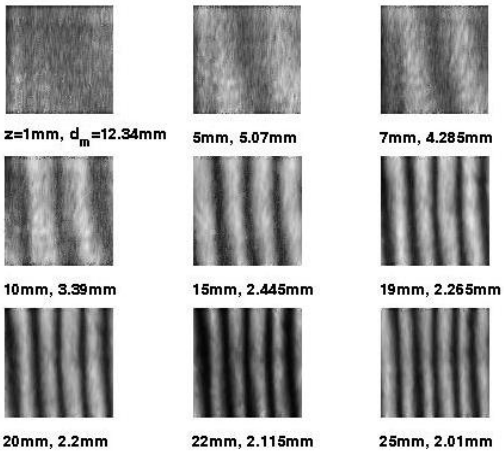
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

می‌دهد، منحنی دارای دره‌ای در نقطه کانونی است.



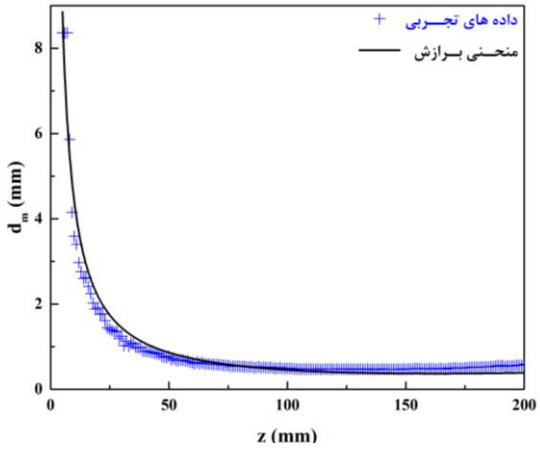
شکل ۳: منحنی جاروب-z روزنه باز محلول شاره مغناطیسی.

مطابق چیدمان مقاله [۲] در فاصله ۷۷ سانتیمتر از توری G_1، توری G_2 قرار دارد. صفحات و راستای این دو توری به‌موازات هم‌دیگرند. از برهم‌نهی خود تصویر توری اول و توری دوم فریزهای ماره‌ی موازی ایجاد می‌شود. با جابه‌جایی میلی‌متری نمونه در فواصل مثبت بین دو عدسی گام فریزهای ماره به‌طور محسوسی تغییر می‌کنند. در شکل ۴ چند نمونه از نقش ماره‌ی ایجاد شده، آورده شده است. این نقش پس از یک پالایش فضایی توسط صفحه دوربین CCD دریافت شده است.



شکل ۴: فریزهای ماره‌ی موازی نوعی مربوط به شاره‌ی مغناطیسی در توان ۷۰ میلی وات.

با برازش رابطه (۸) با داده‌های تجربی مطابق شکل ۵ مقدار $n_2 = -9.8\times10^{-4} cm^2/W$ و $\beta = 67\times10^{-3} cm/W$ به‌دست آمد.



شکل ۵: نمودار مقادیر گام فریزهای ماره.

۴- نتیجه‌گیری

تغییرات فاز در نمونه در شدت‌های بالا ناشی از دو قسمت ضریب شکست و ضریب جذب غیرخطی است. در این‌جا روشی کامل و دقیق برای اندازه‌گیری ضریب‌شکست و ضریب‌جذب غیرخطی مواد ارائه شده است. در روش انحراف‌سنجی ماره با استفاده از ساختار فریزهای ماره موازی تغییرات شعاع انحناء با اندازه‌گیری مقدار تغییر گام فریزهای ماره به‌دست می‌آید. و از آن تغییرات فاز و در نتیجه ضریب شکست و ضریب جذب غیرخطی با یک بار اندازه‌گیری در zهای مثبت به‌ترتیب $n_2 = -9.8\times10^{-4} cm^2/W$ و $\beta = 67\times10^{-3} cm/W$ استخراج شده است. این روش برای اندازه‌گیری ضریب‌شکست و ضریب جذب غیرخطیِ کوچک مناسب است. با افزایش فاصله دو توری و کاهش گام توری‌ها دقت اندازه‌گیری افزایش می‌یابد. مقدار به‌دست آمده از این روش با مقدار به‌دست آمده از روش جاروب z در شرایط مشابه، مقایسه شد که در توافق خوبی با آن است.

مراجع

[1] I. Glatt, Z. Karny, and O. Kafri, "Spatial analysis of the CO2 laser-induced thermal lens in SF6 by moiré deflectometry", Appl. Opt. Vol. 23, No. 2, pp. 274-277, 1984.

[2] S. Rasouli, H. Ghasemi, M. T. Tavassoly and H. R. Khalesifard, "Application of "parallel" moiré deflectometry and the single beam Z-scan technique in the measurement of the nonlinear refractive index", Appl. Opt, Vol. 50, No. 16, pp. 2356-2360, 2011.

[3] M. Sheik-Bahae, A. A. Said, T. Wei, D. J. Hagan, and E. W. Vanstryland, "Sensitive measurement of optical nonlinearities using a single beam", IEEE J. Quantum Electron., Vol. 26 No. 4, pp.760-769, 1990.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]