بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

اندازه گیری ضریب شکست غیرخطی نانوذرات Fe_3O_4 تولید شده با کندوسوز لیزری توسط روش پراش میدان دور

فائزه جدیدی[۱]، محمد اسدنژاد[۱]، محمدحسین مجلس‌آرا[۲]، محمدحسن یوسفی[۱] و محمدجواد ترکمنی[۳]

[۱]مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران
[۲]گروه فیزیک، دانشگاه خوارزمی، تهران
[۳]مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران، تهران

چکیده - در این پژوهش نتایج تجربی حاصل از پراش میدان دور نانوذرات Fe_3O_4 که با استفاده از کندوسوز آهن در آب مقطر توسط هماهنگ اول لیزر Nd:YAG فرکانس بالا تولید شده‌اند، بررسی شده است. همچنین ضریب شکست غیرخطی با استفاده از روش جاروب-z که روشی متداول در بررسی ویژگی‌های اپتیک غیرخطی است، به‌منظور مقایسه با مقادیر حاصل از روش پراش در میدان دور تعیین شده است. ضریب شکست غیرخطی مرتبه دوم نانوذرات Fe_3O_4 با به کار بردن لیزر پیوسته $He\text{-}Ne(\lambda=632.8\ nm)$ در هر دو روش به‌دست آمده است.

کلید واژه- پراش میدان دور، ضریب شکست غیرخطی، کندوسوز لیزری، نانوذرات Fe_3O_4.

Measurement of Nonlinear Refractive index of Fe_3O_4 Nanoparticles produced by laser ablation by Far Field Diffraction

F. Jadidi[1], M. Asadnezhad[1], M. H. Majles Ara[2], M. H. Yousefi[1], and M. J. Torkamani[3]

[1]Department of Electrical and Electronic Engineering, Maleke-ashtar University of Technology, Tehran
[2]Institute of Physics, Kharazmi University, Tehran
[3]Iranian National Centre for Laser Science and Technology, Tehran

Abstract- In this paper experimental results concerning far field diffraction of Fe_3O_4 nanoparticles produced by ablating iron target in distilled water using the first harmonic of an acousto-optically Q-switched Nd:YAG laser are presented. In the present research we measured nonlinear refractive index of Fe_3O_4 nanoparticles using a single beam z-scan technique to compare with the results of far field diffraction. In both experiment we used a He-Ne CW laser beam operated at 632.8 nm to obtain nonlinear refractive index of Fe_3O_4 nanoparticles.

Keywords: Far Field Diffraction, Nonlinear Refractive index, Laser Ablation, Fe_3O_4 nanoparticles.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر تولید و مطالعه ویژگی‌های نانوذرات، افزایش چشم‌گیری در جهان یافته است. پاسخ اپتیک غیرخطی(NLO) نانوذرات به‌طور چشمگیری نسبت به مواد حجیم مربوطه بهبود می‌یابد. مواد با اپتیک غیرخطی مرتبه سوم و زمان پاسخ سریع در کاربردهای وسایل اپتیکی مورد نیازند. به‌دلیل پاسخ اپتیک غیرخطی بالای چنین موادی می‌توان از آن‌ها در سامانه‌های ارتباطی فیبر نوری مانند تغییر نوری، واحدهای مسیریابی، بازگشت سیگنال دیجیتال، محیط ذخیره نوری و محدودکننده‌های اپتیکی استفاده کرد. بنابراین بررسی‌های زیادی روی اپتیک غیرخطی نانوذرات صورت می‌گیرد. آثار قوی اپتیک غیرخطی مشاهده شده به‌دلیل اثرات محدودیت کوانتومی مانند جذب غیرخطی و غیرخطی‌های اپتیکی مرتبه دوم و سوم برای ساختن محدودکننده اپتیکی، مدولاتور اپتیکی و هماهنگ اول و دوم لیزری تحت بررسی هستند[۱].

اپتیک غیرخطی شاخه‌ای از اپتیک است که به بررسی برهم‌کنش‌های غیرخطی تابش الکترومغناطیسی و محیط می‌پردازد. برهم‌کنش غیرخطی به معنی پاسخ محیط با رفتار غیرخطی به میدان‌های تابشی فرودی و تغییر طول موج یا فرکانس امواج الکترومغناطیس ورودی به محیط است[۲]. اپتیک غیرخطی پدیده‌ای است که در نتیجه تغییر خواص اپتیکی ماده در حضور نور پرشدت، مانند نور لیزر مشاهده می‌شود.

تلاش‌های اولیه برای یافتن موادی که ضرایب غیرخطی بزرگ دارند، به‌منظور استفاده در کاربردهای تغییر اپتیکی و حفاظت حسگرها انجام شد. روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری ضریب شکست غیرخطی وجود دارد که روش جاروب- z و پراش میدان دور از آن جمله هستند.

یکی از روش‌های تعیین اندازه ضریب شکست غیرخطی ماده، پراش در میدان دور است. وقتی پرتو نور پرشدت با محیط غیرخطی واکنش دهد، الگوی توزیع شدت حلقه‌های هم مرکز پس از عبور پرتو از محیط غیرخطی می‌تواند در ناحیه دور القا شود.

این اثر مدولاسیون فاز فضایی ناشی از ضریب شکست مختلط وابسته به شدت می‌باشد و در بلورهای مایع، پلیمرها و نانوساختارها مشاهده شده است.

با استفاده از این نقش‌های حلقوی هم مرکز می‌توان ضریب شکست غیرخطی محیط را به‌دست آورد.

بدین منظور یک پرتو گاوسی با طول موج λ که در محیط غیرخطی به ضخامت L در جهت محور z منتشر می‌شود، را در نظر می‌گیریم. هنگامی‌که پرتو در محیط غیرخطی منتشر می‌شود، تعداد حلقه‌های روشن (N) با افزایش تغییر فاز غیرخطی به‌طور خطی طبق رابطه (۱) افزایش پیدا می‌کند:

$$N = \frac{|\Delta\varphi_0|}{2\pi} \qquad (۱)$$

که در آن $\Delta\varphi_0 = k_0 \Delta n(z_0,0) L$ بیشینه تغییر فاز غیرخطی است که در آن k_0 عدد موج در خلا، $\Delta n(z,0) = n_2 I(z,r)$ ضریب شکست محیط (وابسته به شدت) و L ضخامت نمونه است.

با توجه به عبارت بالا رابطه تغییر ضریب شکست با تعداد حلقه‌ها، N، به‌صورت زیر است:

$$N = \frac{\Delta n L}{\lambda} \qquad (۲)$$

که در آن λ طول موج باریکه لیزر است. با توجه به رابطه $n = n_0 + n_2 I$ و رابطه (۲) می‌توان ضریب شکست غیرخطی را به‌دست آورد[۳]:

$$n_2 = \frac{N\lambda}{IL} \qquad (۳)$$

نانوذرات را می‌توان با استفاده از روش‌های پیچیده شیمیایی مانند میکروامولوسیون، تجزیه گرمایی، سل-ژل و... تولید کرد. چالش اساسی تمام روش‌ها، توانایی کنترل ذرات تولید شده با ساختار و توزیع اندازه مطلوب است[۴]. از جمله معایب روش‌های متداول تولید نانوذرات با روش‌های شیمیایی درجه خلوص کمتر نانوذرات تولید شده است[۵].

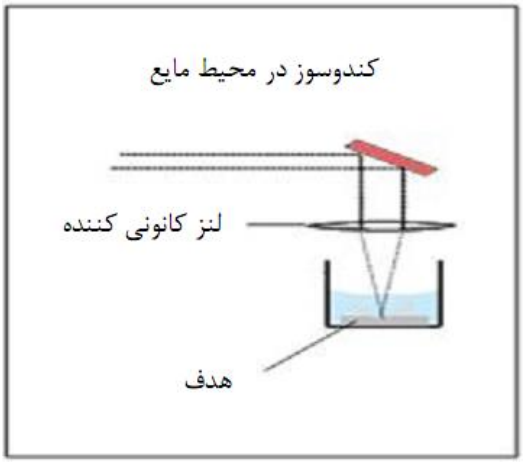
در این پژوهش به منظور دستیابی به خلوص بالا از روش فیزیکی کندوسوز لیزری برای تولید نانوذرات Fe_3O_4 استفاده شده است.

۲- روش آزمایش

به‌منظور آماده سازی نمونه جهت بررسی خواص اپتیک غیرخطی، هدفی از جنس ورق آهن کم کربن(St14) پس از تمیزکاری سطحی، داخل بشر حاوی ۵ cc آب مقطر تحت تابش لیزر قرار داده شد. برای کندوسوز هدف از لیزر

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

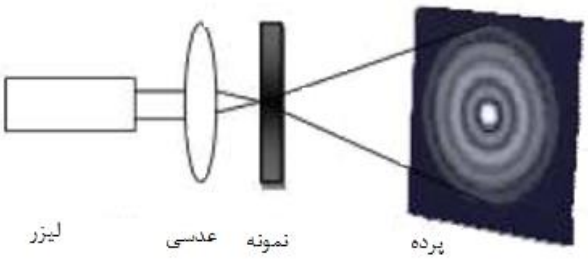
پالسی Nd:YAG با تغییر Q که دارای طول موج ۱۰۶۴ نانومتر و فرکانس ۲ kHz بود، استفاده گردید. سپس هدف به مدت ۱۵ دقیقه تحت تابش لیزر با انرژی ۲ mj قرار گرفت. پهنای زمانی پالس ۲۴۰ ns و قطر لکه لیزر روی هدف ۷۰μm بود. شکل (۱) چیدمان کندوسوز لیزری در محیط مایع را به‌صورت طرح واره نشان می‌دهد.



شکل ۱: چیدمان کندوسوز لیزری هدف در محیط مایع

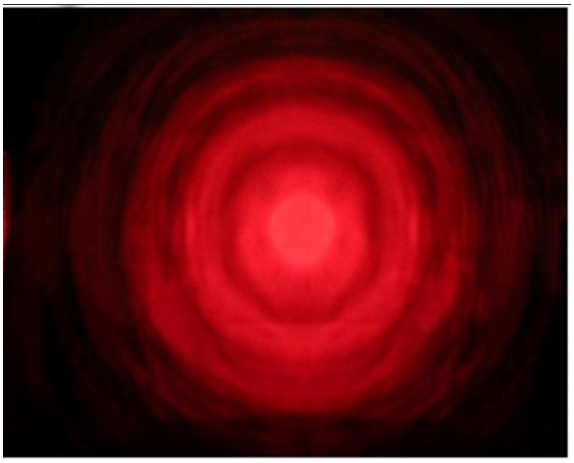
پس از آماده سازی نمونه به منظور یافتن ضریب شکست غیرخطی در این آزمایش با روش پراش در میدان دور از چیدمان شکل (۲) استفاده شده است.

بدین منظور از لیزر پیوسته هلیوم- نئون با طول موج nm ۶۳۲.۸ و توان ۵۰mW استفاده کرده و نمونه را در سلول کوارتز در کانون عدسی با فاصله کانونی ۸ cm قرار داده‌ایم.



شکل ۲: چیدمان مورد استفاده در مشاهده پراش میدان دور

باید دقت کرد که تشکیل این حلقه‌ها بسیار حساس است و نمونه باید دقیقا در کانون عدسی قرار گیرد. یک جابجایی کوچک از این شرایط ممکن است باعث محو شدن تصویر حلقه‌ها شود. تصویر حلقه‌های پراش در شکل (۳) آمده است.



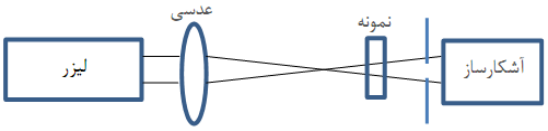
شکل ۳: حلقه‌های پراش نانوذرات Fe_3O_4 در شدت ۵۰ mW با استفاده از چیدمان پراش میدان دور

در این روش با استفاده از تعداد حلقه‌های پراش و رابطه (۳) ضریب شکست غیرخطی نمونه به‌دست می‌آید.

همان‌طور که مشاهده می‌شود ۵ حلقه تشکیل شده است. با استفاده از روابط ذکر شده و نتایج تجربی، مقدار ضریب شکست غیرخطی برای نانوذرات Fe_3O_4 با استفاده از روش پراش میدان دور در شدت ۵۰ mW برابر ۰.۱۸۴×۱۰^{-۷} است.

در ادامه این پژوهش ضریب شکست غیرخطی با استفاده از روش جاروب- z به‌منظور مقایسه با نتیجه حاصل از پراش میدان دور، اندازه‌گیری شده است.

آزمایش جاروب- z با روزنه بسته برای نانوذرات Fe_3O_4 در سلول کوارتز به ضخامت ۱ mm با استفاده از لیزر پیوسته هلیم- نئون با طول موج ۶۳۲.۸ nm انجام شده است. فاصله کانونی عدسی همگرای به کار رفته برابر با ۸ cm است. چیدمان آن در شکل (۴) آمده است.

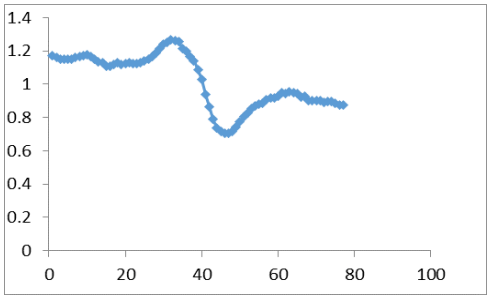


شکل ۴: چیدمان مورد استفاده در اندازه‌گیری ضریب شکست غیر خطی

منحنی گذار بهنجار شده بر حسب گام حرکت نمونه در توان ۵۰ mW در شکل (۵) رسم شده است. مشاهده می‌شود که محدوده پاسخ غیرخطی نمونه اطراف فاصله کانونی است و در فواصل دور از کانون مقدار تقریبا ثابتی دارد. البته این آزمایش بسیار حساس است و در طول

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

آزمایش باید دقت کرد پرتو لیزر در هر گام حرکت نمونه به سمت آشکارساز در مکان ثابتی به نمونه برخورد کند. همچنین به‌منظور دقت ثبت توان رسیده به آشکارساز در هر گام حرکت، باید مدت زمان یکسانی برای ثبت آن در نظر گرفت.



شکل ۵: منحنی جاروب- z روزنه بسته نانو ذرات Fe_3O_4

همان‌طور که در منحنی شکل (۵) مشاهده می‌شود اختلاف بین قله و دره برابر ۰.۶۳ =ΔTp-v است.

حال مقدار n_2 را از رابطه زیر که توسط شیخ بهایی در سال ۱۹۸۹ گزارش شده است، به‌دست می‌آوریم:

$$n_2 = \frac{\Delta T_{p-v}}{0.406(1-S)^{0.25} k L_{eff} I_0} \qquad (۴)$$

در این رابطه S گذردهی روزنه، از تقسیم توان عبوری از روزنه(۲.۹۵ mW) بر توانی که در غیاب روزنه ثبت شده است(۲۹.۲ mW)، برابر ۰.۱ قرار داده می‌شود. باید توجه کرد که پس از رسیدن بیشترین توان به آشکارساز، آن را ثابت کرده و سپس روزنه را مقابل آن قرار می‌دهیم.

در رابطه بالا k عدد موج و I_0 شدت پرتو لیزر است که از رابطه $I_0 = 2P_0/\pi w_0$ به دست می‌آید، که P_0 توان و w_0 شعاع پرتو لیزر است. همچنین L_{eff}، ضخامت موثر نمونه، توسط رابطه (۵) تعریف می‌شود[۳]:

$$L_{eff} = 1 - e^{-\alpha L}/\alpha \qquad (۵)$$

که α ضریب جذب خطی نمونه و برابر ۱.۹۹ cm^{-1} و L برابر با ۱ میلی‌متر است.

با توجه به این‌که در این منحنی قله قبل از دره است، علامت ضریب شکست نانوذرات Fe_3O_4 منفی و نشان دهنده این است که پدیده غیرخطی به‌دلیل فرایند خودواکانونی ایجاد شده است و مقدار ضریب شکست آن‌ها برابر با ۱.۰۱۱×۱۰$^{-۷}$ cm^2/W است.

با توجه به مقدار ضریب شکست غیرخطی این نانوذرات نمایندگان مناسبی جهت استفاده در محدودکننده‌های اپتیکی به شمار می‌آیند. همچنین برای به دست آوردن مقدار پذیرفتاری غیرخطی مرتبه سوم از رابطه (۶) استفاده می شود:

$$n_2(\frac{cm^2}{W}) = \frac{12\pi^2}{n_0^2 c} 10^7 \chi^3(esu) \qquad (۶)$$

پذیرفتاری غیرخطی مرتبه سوم نانوذرات Fe_3O_4 برابر با ۱.۵۰×۱۰$^{-۷}$ است.

۳- نتیجه‌گیری

با استفاده از روش پراش میدان دور اندازه ضریب شکست غیرخطی نانوذرات Fe_3O_4 که توسط روش کندوسوز لیزری تولید شده‌اند با استفاده از لیزر پیوسته هلیوم-نئون در شدت ۵۰ mW برابر ۰.۱۸۴×۱۰$^{-۷}$ است که در مرتبه ضریب به‌دست آمده توسط روش جاروب-z است. بنابراین این نانوذرات خواص اپتیک غیرخطی مناسبی دارند.

مراجع

[1] Q. Wang, J. Xu, R. Xie, *Nonlinear optics of nanoparticles and nanocomposits*, Encyclopedia of Nanoscience and nanotechnology, Vol. 8, pp101-111, 2004.

[2] F. Trager, *Handbook of Lasers and Optics*, Springer, New York, 2007.

[3] M. Sheikh-Bahae, M.P. Hasselbeck, *Third order optical nonlinearities*, OSA Handbook of Optics, Vol. IV, Chapter.17, 2000.

[4] M. Mera, M.E. Espinsa, R. Rerez , *Synthesis of magnetite(Fe3O4) nanoparticles without surfactants at room temperature*, Materials Letters 61, pp 4447-4451, 2007.

[5] A. Hahn, S. Barcikowski and B. N. Chichkov, *Influences on Nanoparticle Production during Pulsed Laser Ablation*, 2008.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]