بررسی ضرایب غیرخطی نوری نانوذرات طلا به روش روبش-Z با استفاده از تپ‌های لیزری فمتوثانیه

فرشته حاج اسماعیل بیگی^{*}، اسماء السادات معتمدی، افتخار سادات بستان‌دوست، رضا گودرزی
پژوهشکده فوتونیک و فن‌آوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی ۱۳-۱۴۹۹۵۱۱، تهران- ایران
*Email: fesmaeilbaigi@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۶/۱۲ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۹/۱۷

چکیده

در این پژوهش علامت و مقدار ضرایب جذب و شکست غیرخطی نوری نانوذرات طلا به روش روبش-Z اندازه‌گیری شده است. از لیزر Ti:sapphire در دو حالت موج پیوسته و تپی با دیرش زمانی ۶۰ fs و نرخ تکرار ۸۰ MHz در طول موج ۸۰۰ nm نانومتر و توان متوسط ۲۸ mW استفاده شده است. نانوذرات طلا به روش کندوسوز لیزری با تپ‌های ۲۰ ns و نرخ تکرار ۱۰ Hz در محلول SDS ایجاد شده است. استفاده از تپ‌های فمتوثانیه با نرخ تکرار بالا منجر به ظهور اثرات غیرخطی الکترونی و گرمایی شد. به منظور حذف اثر تجمعی گرمایی ناشی از نرخ تکرار بالای تپ‌های لیزر فمتوثانیه و تفکیک ضرایب غیرخطی گرمایی و الکترونی، نتایج به دست آمده با روش-Z با استفاده از لیزر موج پیوسته در همان طول موج و توان تابشی مقایسه شده است. ضریب جذب غیرخطی الکترونی و گرمایی به ترتیب 15×10^{-5} و $125 \times 10^{-5} \text{ cm.W}^{-1}$ به دست آمده است. در هر دو غیرخطیت الکترونی و گرمایی، اثر کر واکانونی اتفاق افتاده و مقادیر ضرایب شکست غیرخطی الکترونی و گرمایی به ترتیب -41×10^{-9} و $-34 \times 10^{-9} \text{ cm}^2 \text{ W}^{-1}$ محاسبه شده است. اندازه‌گیری‌ها نشان داد که ضرایب غیرخطی نمونه مورد مطالعه در این پژوهش از مقادیر به دست آمده برای نمونه‌های ساخته شده به روش شیمیایی بزرگ‌تر است.

کلیدواژه‌ها: روبش-Z، لیزر فمتوثانیه، غیرخطیت نوری، نانوذرات طلا

Investigation of the nonlinear optical coefficients of gold nanoparticles by Z-scan method using the femtosecond laser pulses

F. Hajiesmaeilbaigi*, A.S. Motamedi, E.S. Bostandoost, R. Goodarzi

Photonics and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.BOX: 143995-13, Tehran, Iran

Research Article

Received 2.9.2020, Accepted 7.12.2021

Abstract

The present work measured the sign and the amount of nonlinear optical absorption coefficient and nonlinear refractive index of gold nanoparticles by Z-scan method. The Ti: sapphire laser is used in two modes: continuous wave and pulsed with 60 fs duration and a repetition rate of 80 MHz at the wavelength of 800 nm, with an average power of 28 mW. Gold nanoparticles were obtained by the laser ablation method with 20 ns pulses and a repetition rate of 10 Hz in SDS solution. Due to using femtosecond laser pulses with a high repetition rate, thermal and electronic nonlinear effects appeared. The results were compared with a continuous wave Z-scan at the same wavelength and exposure power to eliminate the cumulative thermal effect and separate the electronic and thermal nonlinear coefficients. The electronic and thermal nonlinear absorption coefficients were obtained 15×10^{-5} and $125 \times 10^{-5} \text{ cm.W}^{-1}$, respectively. Kerr de-focusing effect occurred in both electronic and thermal nonlinearity, and the nonlinear electronic and the thermal refractions were calculated -41×10^{-9} and $-34 \times 10^{-9} \text{ cm}^2 \text{ W}^{-1}$, respectively. The experiments show that the nonlinear coefficients of the sample prepared in this research are larger than the values obtained for the samples made by the chemical method.

Keywords: Z-scan, Femtosecond laser, Optical nonlinearity, Gold nanoparticles

۱. مقدمه

توسعه روزافزون علم و فن آوری نانو فرصت‌های جدیدی برای اپتیک غیرخطی ایجاد کرده است. شمار فزاینده‌ای از مواد نانو دارای خواص غیرخطی نوری قابل ملاحظه‌ای هستند. اغلب مواد نوری با پاسخ غیرخطی بزرگ و سریع در زمینه‌های گوناگون اپتوالکترونیکی و فوتونیکی مانند ارتباطات نوری، پردازش اطلاعات نوری، ذخیره‌سازی داده و کلیدها و محدودکننده‌های نوری کاربرد دارند [۱-۳].

مشخصه‌یابی خواص نوری غیرخطی مواد در بیش‌تر زمینه‌های فیزیک در هر دو شاخه بنیادی و کاربردی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تاکنون مطالعات بسیاری برای محاسبه پذیرفتاری نوری غیرخطی مرتبه سوم، که مسئول پدیده‌هایی مانند تولید هم‌هنگ سوم و مزدوج فاز نوری است، صورت گرفته است.

پایداری همراه با پذیرفتاری درجه سوم بزرگ و پاسخ فوق سریع نانوذرات فلزی نویدبخش استفاده از این مواد برای ساخت ابزار فوتونیکی می‌باشند. ویژگی اصلی نانوذرات فلزی تشدید پلاسمون سطحی آن‌ها است که از یک سو به شکل، اندازه و نوع نانوذرات و از سوی دیگر به مؤلفه‌های دی‌الکتریک محیط پیرامون آن‌ها وابسته است [۴، ۵].

نانوذرات طلا و نقره دارای باند جذب تشدید پلاسمون سطحی (SPR) وسیعی در ناحیه مرئی بیناب الکترومغناطیس هستند؛ هم‌چنین با تغییر اندازه و شکل نانوذرات، امکان کوک‌پذیری مکان قله جذب SPR در سرتاسر بیناب مرئی وجود دارد [۱، ۴].

در اندرکنش غیرخطی نور و ماده اثرات غیرخطی متفاوتی از جمله غیرخطیت الکترونی، بازجهت‌گیری‌های مولکولی و غیرخطیت‌های گرمایی به‌طور هم‌زمان اتفاق می‌افتند که منجر به یک پاسخ غیرخطی منفرد می‌شوند. بنابراین آزمایش‌ها و کاربردهای مواد غیرخطی نوری با حضور یا رقابت سازنده یا مخرب دو یا چند پدیده غیرخطی، که با مشخصه خواص نوری غیرخطی محیط و میدان لیزر اعمالی تعیین می‌شوند، اغلب پیچیده می‌شود. نوع و قدرت هر اثر غیرخطی به ویژگی‌های نور و ماده بستگی دارد. به‌عنوان مثال، این پاسخ ممکن است به زمان دیرش، طول موج، نرخ تکرار و انرژی تپ لیزری و هم‌چنین جذب خطی و غیرخطی ماده بستگی داشته باشد. بنابراین به‌منظور انجام اندازه‌گیری‌های نوری غیرخطی دقیق و صحیح، شناخت همه اثرات غیرخطی احتمالی، درجه اهمیت آن‌ها و چگونگی تمایز آن‌ها از یک‌دیگر ضروری است.

چندین روش متفاوت برای تعیین پاسخ نوری غیرخطی مواد وجود دارد که متداول‌ترین و ساده‌ترین آن‌ها روش روبش-Z است که توسط شیخ‌بهایی و همکارانش ارائه شده است [۵، ۶]. روبش-Z یک روش تک باریکه‌ای ساده و مؤثر برای تعیین علامت و مقادیر قسمت‌های حقیقی و موهومی پذیرفتاری درجه سوم غیرخطی است که به‌ترتیب متناسب با ضرایب شکست و جذب غیرخطی هستند [۶]. در این روش، متناسب با آستانه تخریب ماده و اندازه نمونه تحت بررسی، لیزرهای متفاوتی از جمله لیزرهای موج پیوسته، تپی با دیرش زمانی نانو تا فمتوثانیه و نرخ تکرارهای از چند هرتز تا چندین مگاهرتز مورد استفاده قرار می‌گیرند. در حالت موج پیوسته، اثر غالب در نمونه غیرخطیت گرمایی است. هنگامی که دیرش زمانی تپ لیزری و یا فاصله جدایی تپ‌ها از یک‌دیگر با زمان گذر آکوستیکی t_a قابل مقایسه باشد اثرات آکوستیکی آشکار خواهد شد [۷، ۸]؛

$$t_a = \frac{w}{v_s} \quad (1)$$

که در آن w اندازه لکه لیزر و v_s سرعت صوت در نمونه است که برای مایعات و جامدات در حدود 1×10^5 تا $5 \times 10^5 \text{ cm.s}^{-1}$ می‌باشد. از طرف دیگر، هنگامی که رفتارهای درازمدت مورد بررسی قرار می‌گیرند، صرف‌نظر از دیرش زمانی تپ لیزری، اثرات پخش گرمایی اهمیت پیدا خواهند کرد. در نرخ‌های تکرار بالا، از آن‌جا که قبل از این‌که نمونه به دمای محیط برگردد تپ بعدی می‌رسد، پاسخ غیرخطی اغلب به‌وسیله اثرات گرمایی انباشته شده تغییر خواهد کرد. این امر برای مواردی که نمونه با قطاری از تپ‌ها، که فاصله جدایی آن‌ها کوتاه‌تر از زمان مشخصه گرمایی t_c است، اتفاق می‌افتد:

$$t_c = \frac{w^2}{4D} \quad (2)$$

که در آن $D (\text{cm}^2.\text{s}^{-1})$ ضریب پخش گرمایی ماده بوده و مقدار آن برای مایعات و شیشه‌های اپتیکی 1×10^{-3} تا $6 \times 10^{-3} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ است [۹، ۱۰]. بنابراین اگر زمان تکرار تپ‌ها از زمان پخش گرمایی بیش‌تر باشد، اثرات گرمایی می‌تواند کاهش یابد.

برای چیدمان‌های متداول روبش-Z مقدار اندازه لکه لیزر در حدود 10 تا $50 \mu\text{m}$ است و بنابراین مطابق با رابطه‌های ۱ و ۲،

در حالت کلی هر درجه‌ای از غیرخطیت را می‌توان در نظر گرفت اما برای سادگی فقط غیرخطیت درجه سوم، یعنی حالتی که ضریب شکست n براساس ضریب شکست خطی n_0 و جمله غیرخطی وابسته به شدت به شکل رابطه ۳ توصیف می‌شود، در نظر گرفته می‌شود:

$$n = n_0 + \frac{n_2}{2} |E|^2 = n_0 + \gamma I = n_0 + \Delta n \quad (3)$$

در این رابطه E میدان الکتریکی و I شدت باریکه لیزر در داخل نمونه بوده و n_2 یا γ ضریب شکست غیرخطی نمونه است:

$$n_2(\text{esu}) = \frac{cn_0}{4\pi} \gamma \left(\frac{m}{w} \right) \quad (4)$$

با فرض باریکه گوسین با کمر باریکه W_0 که در امتداد $+Z$ حرکت می‌کند، میدان به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$E(Z, r, t) = E_0(t) \frac{w_0}{w(z)} \exp\left(-\frac{r^2}{w^2(z)} - \frac{ikr^2}{2R(z)}\right) e^{-i\phi(z, t)} \quad (5)$$

که $W(z)$ شعاع باریکه و $R(z)$ شعاع انحنای جبهه موج در نقطه z است. $E_0(t)$ میدان الکتریکی تابش در کانون و جمله $e^{-i\phi(z, t)}$ شامل تمام تغییرات فازی یک‌نواخت شعاعی می‌باشد. اگر طول نمونه L به اندازه‌ای کوچک باشد که بتوان از تغییرات قطر باریکه در داخل نمونه به دلیل پراش یا شکست غیرخطی صرف‌نظر کرد، یعنی هنگامی که شرط $L \ll z_R$ برقرار باشد، شیخ‌بهایی و همکاران نشان دادند که تغییرات فازی روی محور در کانون به شکل زیر تعریف می‌شود [۷]:

$$\Delta \phi_0 = \frac{\gamma \pi}{\lambda} n_2 I_0 L_{\text{eff}} \quad (6)$$

که $k = 2\pi/\lambda$ طول پراش باریکه، k بردار موج، $L_{\text{eff}} = (1 - e^{-\Delta \phi_0})/\Delta \phi_0$ طول مؤثر در فضای آزاد و a طول موج لیزر در آن α ضریب جذب خطی، L طول نمونه و I_0 شدت روی محور در کانون است. همچنین تغییرات فاز به اختلاف پهنجار شده تراگیل قله و دره، T_{p-v} در نمودار روبش Z - روزنه بسته، به شکل زیر بستگی دارد [۵، ۶]:

$$\Delta T_{p-v} \cong 0.406(1-S)^{1/5} |\Delta \Phi_0| \quad (7)$$

زمان گذر آکوستیکی چند ده نانوثانیه و زمان پخش گرمایی در حدود چند ده میلی‌ثانیه تا چند ده میکروثانیه خواهد بود.

لیزرهای قفل شده مدی معمولاً تپ‌های فوق‌کوتاه با نرخ تکرار بالا (۸۰ تا ۱۰۰ MHz) تولید می‌کنند که معمولاً فاصله زمانی بین تپ‌های متوالی (۱۰ تا ۱۲ ns) از زمان گذر آکوستیکی بیش‌تر بوده و بنابراین در بررسی با این‌گونه لیزرها، پدیده‌های آکوستیکی نقش قابل‌توجهی ندارند. از سوی دیگر، در فاصله زمانی بین دو تپ نمونه نمی‌تواند به دمای تعادل برگردد و در نتیجه به دلیل انباشتگی حرارتی، پدیده‌های گرمایی القا خواهند شد. بدین ترتیب ضرایب جذب خطی یا غیرخطی بسیار کوچک هم، که در سایر موارد قابل صرف‌نظر کردن هستند، منجر به پاسخ روبش Z - بزرگی خواهند شد که به سادگی قابل اندازه‌گیری است [۴-۵ و ۱۱-۱۲]. لازم به ذکر است که سهم گرمایی غیرخطیت در زمانی که طول موج باریکه لیزر دورتر از نوار جذب خطی نمونه باشد، کاهش خواهد داشت. هنگامی که کاربردهای مواد غیرخطی درجه سوم غیرتشدیدی برای ابزاری در نرخ تکرار بالا مانند سیستم‌های ارتباطات نوری در نظر گرفته می‌شوند، این اثرات بسیار مهم هستند.

در مطالعات گذشته ضرایب غیرخطی نانوذرات طلا با استفاده از تپ‌های لیزری با دیرش زمانی ۵ ns و نرخ تکرار ۱۰ kHz و همچنین لیزر موج پیوسته Nd:YAG در طول موج هماهنگ دوم ۵۳۲ nm، که نزدیک به قله جذب نانو ذرات طلا است، مورد بررسی قرار گرفته است [۱۳-۱۵]. در این مقاله نانوذرات کلوییدی طلا با استفاده از روش کندوسوز لیزری تپی تولید شده و ضرایب شکست و جذب غیرخطی آن‌ها به روش روبش Z - با استفاده از لیزر Ti:sapphire در طول موج مرکزی ۸۰۰ nm، که بسیار دورتر از قله جذب نانوذرات طلا است، در دو حالت موج پیوسته و تپی با دیرش زمانی فمتوثانیه اندازه‌گیری شده و سهم‌های غیرخطیت الکترونی و گرمایی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. نظریه روبش Z -

پژوهش‌های بسیاری برای بررسی انتشار باریکه‌های لیزری پرشدت در داخل ماده غیرخطی و خود-شکستی به وجود آمده از آن انجام شده است. شیخ‌بهایی و همکاران برای آنالیز داده‌های روبش Z - بر اساس نظریه‌های موجود، روش تک باریکه‌ای ساده‌ای را برای تعیین اندازه و علامت ضرایب شکست و جذب غیرخطی و همچنین جدا کردن این ضرایب از یک‌دیگر فرمول‌بندی و ارائه کرده‌اند [۶].

همزمان اندازه‌گیری شده و مقدار آن نسبت به توان ورودی سنجیده می‌شود.

برای انجام روبش-Z از لیزر Ti:sapphire در طول موج مرکزی ۸۰۰ nm و توان خروجی ۲۸ mW به ترتیب در دو حالت موج پیوسته و تپی با دیرش زمانی ۶۰ fs و نرخ تکرار ۸۰ MHz استفاده شده است. باریکه لیزر توسط عدسی با فاصله کانونی ۱۵/۷ cm روی نمونه که در داخل سلول کوآرتز با ضخامت ۱ cm قرار دارد، متمرکز شده و نمونه در راستای Z توسط موتور پلکانی قابل کنترل در گام‌های مختلف با دقت ۲۰ μm و سرعت ۱ mm.s⁻¹ حرکت می‌کند و پس از طی هر گام به مدت ۶۰ s توقف کرده و توان تراگسیل نمونه توسط توان‌سنج خوانده شده و میانگین آن اندازه‌گیری می‌شود. برای اندازه‌گیری همزمان هر دو حالت روبش با روزه باز و بسته، باریکه خروجی از نمونه توسط یک تقسیم‌کننده باریکه به دو قسمت تقسیم شده و در حالت روبش با روزه بسته قبل از رسیدن به توان‌سنج از روزه با قطر ۱/۵ mm عبور می‌کند. برای حذف اثرات ناشی از سلول داده‌های آزمایش نسبت به حالت سلول خالی نیز بهنجار می‌شوند.

شکل ۱. بیناب جذبی نانوذرات کلوییدی طلا.

شکل ۲. طرح‌واره چیدمان روبش-Z برای اندازه‌گیری همزمان روزه باز و بسته. P توان‌سنج، BS تقسیم‌کننده باریکه، L عدسی، S نمونه و A روزه بسته.

که S اندازه روزه است. برای حالت روزه باز، یعنی S=۱، توان تراگسیل بهنجار شده به شکست غیرخطی حساس نبوده و تنها تابعی از ضریب جذب غیرخطی است [۵، ۶]:

$$T(z) \approx 1 - \frac{\beta I_{eff} L}{2\sqrt{2}(1 + \frac{z^2}{z_0^2})} \quad (8)$$

۳. روش‌های تجربی

۳.۱ روش تولید نانوذرات طلا

نانوذرات کلوییدی طلا به روش کندوسوز لیزری تولید شده است. در این روش ورقه طلا به مدت ۱۰ min در محلول آبی سدیم دودسیل سولفات (SDS)، که یک محلول پایدارکننده است، تحت تابش تپ‌های لیزری Nd:YAG در طول موج ۱۰۶۴ nm با نرخ تکرار ۱۰ Hz و پهنای تپ ۲۰ ns و انرژی ۹۰ mJ قرار گرفته و محلول کلوییدی نانوذرات طلا با مشخصه رنگی ارغوانی تولید شده است [۱، ۳]. بیناب جذبی نمونه تهیه شده در شکل ۱ ارایه شده است. تک قله جذب پلاسمونی در طول موج ۵۳۰ nm نشان‌دهنده حضور نانوذرات کروی شکل طلا در محلول می‌باشد. ضریب جذب خطی نمونه تهیه شده برای طول موج ۸۰۰ nm برابر ۰/۲۸ cm⁻¹ است.

۳.۲ روش روبش-Z

در روش روبش-Z، نمونه در الگوی شدت ایجاد شده توسط کانونی کردن باریکه لیزر در امتداد محور Z حرکت کرده و توان تراگسیل از میان نمونه در میدان-دور به وسیله آشکارساز اندازه‌گیری می‌شود. اگر یک روزه کوچک در جلوی آشکارساز قرار داشته باشد، روبش-Z روزه بسته و در حالت بدون روزه روبش-Z روزه باز نامیده می‌شود [۶].

آزمایش روبش-Z روزه باز برای تعیین ضریب غیرخطی استفاده می‌شود. توجه به این نکته ضروری است که در بیشتر موارد، شکست غیرخطی به تنهایی اتفاق نمی‌افتد و معمولاً با جذب غیرخطی مرتبط است. بنابراین داده‌های روبش-Z روزه بسته شامل جذب و شکست خواهد بود. برای استخراج ضریب شکست غیرخطی از جذب غیرخطی آزمایش روبش-Z روزه باز انجام شده و توان تراگسیل کل نمونه اندازه‌گیری می‌شود. این اندازه‌گیری مستقل از شکست غیرخطی بوده و تنها به جذب غیرخطی وابسته است. با تقسیم داده‌های روزه بسته به روزه باز، اثر جذب حذف شده و تنها اثر شکست غیرخطی را می‌توان اندازه‌گیری کرد.

طرح‌واره روبش-Z در شکل ۲ نشان داده شده است. در این چیدمان با استفاده از سه آشکارساز، توان تراگسیل از نمونه در دو حالت روزه بسته و باز در هر نقطه در امتداد محور Z به‌طور

۴. نتایج و بحث

نمودار روبش Z -روزنه باز برای هر دو حالت اندازه‌گیری با باریکه لیزر موج پیوسته و تپی با دیرش زمانی ۶۰ fs در شکل ۳ ارائه شده است. در هر دو حالت نمودار جذب غیرخطی به صورت دره بوده و بنابراین علامت جذب غیرخطی مثبت و نشان‌دهنده جذب اشباع معکوس می‌باشد که می‌تواند ناشی از جذب دو یا چند فوتونی یا جذب حالت برانگیخته یا هر دوی آن‌ها باشد. عمق دره در حالت تپی فمتوثانیه کمی از حالت موج پیوسته بیشتر است که نشان‌دهنده تغییرات فازی بیش‌تر و بنابراین جذب غیرخطی بزرگ‌تر می‌باشد.

در آزمایش روبش Z -علامت ضریب شکست غیرخطی توسط شکل منحنی تراگسیل روزنه بسته تعیین می‌گردد. وجود قله قبل از کانون و دره بعد از آن نشان‌دهنده اثر واکانونی و بنابراین علامت ضریب شکست منفی است، درحالی‌که قرارگرفتن دره قبل از قله بیان‌گر اثر کر^۱ خودکانونی بوده و علامت ضریب شکست مثبت است. در شکل ۴ نمودار توان تراگسیل بهنجار شده در روبش Z -روزنه بسته کلویید نانوذرات طلا برای باریکه لیزر موج پیوسته و تپی با دیرش زمانی ۶۰ fs ارائه شده است. با توجه به شکل در هر دو حالت تپی و موج پیوسته قله پیش از دره قرار گرفته که بیان‌گر اثر خود-واکانونی بوده و یا به عبارت دیگر نشان‌دهنده علامت ضریب شکست غیرخطی منفی نمونه می‌باشد. داده‌های تجربی نشان می‌دهند که در حالت اندازه‌گیری با باریکه موج پیوسته شدت دره و قله تقریباً برابر است (دره کمی عمیق‌تر است بدین معنی که درصد ناچیزی جذب چند اتمی وجود دارد). درحالی‌که برای اندازه‌گیری با باریکه تپی فمتوثانیه شدت دره از قله ضعیف‌تر شده که نشان‌دهنده اثر اشباع در نمونه می‌باشد. همچنین در هر دو حالت مکان قله و دره نسبت به کانون نامتقارن است که نشان‌دهنده بزرگ بودن تغییرات فاز ایجاد شده در اثر غیرخطیت نمونه و شکل‌گیری عدسی حرارتی و شکست غیرخطی منفی در اثر تجمع حرارت در ناحیه انتشار باریکه است. اما با توجه به فاصله جدایی بین قله و دره در داده‌های تجربی این نتیجه حاصل می‌شود که در حالت تپی فمتو ثانیه غیرخطیت درجه سوم که منشأ اثرات غیرخطی الکترونی دارد، در فرایند مؤثر است؛ در صورتی‌که در مورد اندازه‌گیری با باریکه موج پیوسته، سهم عمده اثر مربوط به غیرخطیت درجه پنجم با منشأ اثرات حرارتی می‌باشد.

شکل ۳. نتایج تجربی تراگسیل بهنجار شده روبش Z -روزنه باز و منحنی برازش داده‌ها برای هر دو حالت اندازه‌گیری با باریکه لیزر الف) تپی فمتوثانیه و ب) موج پیوسته.

شکل ۴. نمودار نسبت تراگسیل بهنجار شده روبش Z -روزنه بسته به روزنه باز و منحنی برازش داده‌ها برای هر دو حالت اندازه‌گیری با باریکه لیزر موج پیوسته و تپی فمتو ثانیه.

با استفاده از رابطه‌های ۶ تا ۸ و داده‌های نمودارهای شکل‌های ۳ و ۴، ضرایب شکست و جذب غیرخطی برای نانوذرات کلوییدی تولید شده با روش کندوسوز لیزری در هر دو حالت روبش Z -با باریکه لیزر موج پیوسته و تپی با دیرش زمانی ۶۰ fs محاسبه شده و به همراه مقادیر مراجع ۱۱ تا ۱۵ در جدول ۱ گزارش شده است.

1. Kerr Effect

۵. نتیجه گیری

ضرایب غیرخطی نوری به اندازه، غلظت، محیط پیرامون و روش تهیه نانوذرات بستگی دارد و همچنین تحت تأثیر مشخصات باریکه لیزر از جمله طول موج، شدت، پهنای تپ و نرخ تکرار می باشد. در این مقاله نانوذرات کلوییدی طلا به روش کندوسوز لیزری با استفاده از لیزر Nd:YAG با تپهای نانوثانیه در طول موج ۱۰۶۴ nm تولید شده و سپس ضرایب جذب و شکست غیرخطی آنها با استفاده از لیزر Ti:sapphire در طول موج مرکزی ۸۰۰ nm، که دورتر از قله جذب خطی نانوذرات است، به روش روبش-Z اندازه گیری شده است. برای حذف اثرات تجمعی گرمایی به وجود آمده به دلیل نرخ تکرار بالای تپها و تفکیک ضرایب غیرخطی گرمایی و الکترونی، نتایج اندازه گیری در حالت تپی با دیرش زمانی ۶۰ fs با حالت موج پیوسته مقایسه شده و با در نظر گرفتن این که غیرخطیت غالب در حالت موج پیوسته گرمایی بوده، مقادیر ضرایب غیرخطی گرمایی از الکترونی در حالت تپی فمتوثانیه از یکدیگر تفکیک شده و در جدول ۲ ارایه شده است. اندازه گیری ها نشان می دهد که ضرایب غیرخطی برای نمونه مورد مطالعه در این پژوهش از مقادیر به دست آمده در مرجع ۱۱ برای نمونه تهیه شده به روش شیمیایی، که با تپهای با نرخ تکرار ۱ kHz و دیرش زمانی ۶۰ fs در طول موج ۸۰۰ nm مورد بررسی قرار گرفته اند، بزرگ تر است.

جدول ۲. مقادیر ضرایب شکست و جذب غیرخطی الکترونی و گرمایی در

طول موج ۸۰۰ nm

ضرب غیرخطیت	شکست غیرخطی $n_2 (10^{-9} \text{ cm}^2/\text{W})$	جذب غیرخطی $\beta (10^{-5} \text{ cm/W})$
الکترونی	-۴۱	+۱۵
گرمایی	-۳۴	+۱۲۵

مراجع

1. F. Hajiesmaeilbaigi, A. Motamedi, *Synthesis of Au/Ag alloy nanoparticles by Nd:YAG laser irradiation*, *Laser Phys. Lett.*, **4**, 133–137 (2007).
2. G. Schmid, *Nanoparticles: From Theory to Application*, New York: Wiley (2011).
3. F. Hajiesmaeilbaigi, et al, *Preparation of silver nanoparticles by laser ablation and fragmentation in pure water*, *Laser Phys. Lett.*, **3**, 252–256 (2006).
4. M. Gonli, L. Razzari, M. Righini, *Z-scan measurements using high repetition rate lasers: how to manage thermal effects*, *Opt. A Pure Appl. Opt.*, **1**, 662-667 (1999).

همان طور که از داده های جدول ۱ مشخص است، مقادیر ضرایب جذب و شکست غیرخطی در حالت اندازه گیری با تپهای ۶۰ fs در مقایسه با باریکه موج پیوسته با توان متوسط یکسان (۲۸ mW) و در همان طول موج تحریک (۸۰۰ nm) که دورتر از نوار جذب خطی نمونه با مرکزیت ۵۳۰ nm است، بزرگ تر بوده که نشان دهنده وجود ترکیبی از اثرات غیرخطی الکترونی و گرمایی می باشد. همان گونه که در قسمت های قبل بیان شد، در روبش-Z با لیزر موج پیوسته اثر غیرخطی غالب حرارتی بوده و بنابراین ضریب شکست غیرخطی اندازه گیری شده نشان دهنده غیرخطیت حرارتی نمونه می باشد.

در حالتی که نمونه تحت تابش تپهای لیزری با دیرش زمانی ۶۰ fs با نرخ تکرار ۸۰ MHz قرار می گیرد، فاصله جدایی تپها از یکدیگر در حدود ۱۲ ns است. با توجه به آن که این زمان تقریباً به سرعت گذر آکوستیکی در نمونه (۳۰ ns) نزدیک است، می توان نتیجه گرفت که سهم اثر غیرخطی آکوستیکی اندک و قابل صرف نظر کردن خواهد بود. از سوی دیگر فاصله جدایی تپها از مدت پخش گرمایی در نمونه (۲۰ ms) بسیار کم تر است و بنابراین انباشتگی گرمایی اتفاق افتاده و غیرخطیت اندازه گیری شده ترکیبی از غیرخطیت الکترونی و گرمایی است. با توجه به آن که تمام شرایط اندازه گیری برای هر دو حالت موج پیوسته و تپی یکسان است، می توان نتیجه گرفت که اختلاف ضرایب اندازه گیری شده در دو حالت مربوط به اثر غیرخطیت الکترونی است.

جدول ۱. مقایسه مقادیر ضرایب شکست و جذب غیرخطی اندازه گیری شده

در طول موج ۸۰۰ nm در این پژوهش و مراجع دیگر

شرایط بررسی ضرایب نوری غیرخطی نانوذرات طلا	شکست غیرخطی $n_2 (10^{-9} \text{ cm}^2/\text{W})$	جذب غیرخطی $\beta (10^{-5} \text{ cm/W})$
CW, ۸۰۰ nm	-۳۴	+۱۲۵
۸۰ MHz, ۸۰۰ nm, ۶۰ fs	-۷۵	+۱۴۰
۸۰۰ nm, ۱ KHz, ۶۰ fs [۱۱]	۰/۰۱۳	+۰/۰۰۸۴
۱۰ KHz, ۵ ns, ۵۳۲ nm [۱۵]	$-۳,۷۲ \times 10^{-5}$	$-۶,۳۶ \times 10^{-5}$
CW, ۵۳۲ nm [۱۳]	---	+۶۴۰
CW, ۵۳۲ nm [۱۴]	-۱۱	+۲۳۰

5. M. Sheik-bahae, et al, *Sensitive measurement of optical nonlinearities using a single beam*, [IEEE Leos News, February](#), 17–26 (2007).
6. M. Sheik-Bahae, A.L.I.A. Said, T. Wei, *High sensitivity single beam n_2 measurement*, [Opt. Lett.](#) **14**, 955-959 (1989).
7. R. de Nalda, et al, *Limits to the determination of the nonlinear refractive index by the Z-scan method*, [J. Opt. Soc. Am. B.](#) **19**, (2002).
8. M. Falconieri, *Thermo-optical effects in Z-scan measurements using high-repetition-rate lasers*, [J. Opt. A: Pure Appl. Opt.](#) **1**, 662-667 (1999).
9. M. Falconieri, G. Salvetti, *Simultaneous measurement of pure-optical and thermo-optical nonlinearities induced by high-repetition-rate femtosecond laser pulses application to CS₂*, [Appl. Phys. B.](#) **69**, 133-136 (1999).
10. N. Wickremasinghe, et al, *Eliminating thermal effects in z-scan measurements of thin PTCDA films*, [Opt. Express](#), **22**, 23955 (2014).
11. P. Qi, et al, *Optical nonlinearities of alcoholic liquids under high-repetition-rate femtosecond lasers by single beam time-resolved eclipsed Z-scan*, [Opt. Laser Technol](#), **109**, 643–647 (2019).
12. Yue Fu, Rashid A. Ganeev, P.S. Krishnendu, et.al., *Size dependent off resonant nonlinear optical properties of gold nanoparticles and demonstration of efficient optical limiting*, [Optical Materials Express](#), **9** (3), 976(2019).
13. M. Taheri, et al, *Nonlinear optical response of gold/silicon nanocomposite prepared by consecutive laser ablation*, [Laser Phys.](#), **25**, 65901 (2015).
14. H. Nadjari, F. Hajiesmaeilbaigi, A. Motamedi, *Thermo optical response and optical limiting in Ag and Au nanocolloid prepared by laser ablation*, [Laser Phys.](#), **20**, 859–864 (2010).
15. M.R.J. Milani, F. Hajiesmaeilbaigi, A.S. Motamedi, *Investigation of nonlinear optical properties of Gold colloidal nanoparticles, Prepared by laser ablation*, [13th ICOP](#) (2007).

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

استناد به این مقاله

فرشته حاج اسماعیل بیگی، اسماء السادات معتمدی، افتخار سادات بستان‌دوست، رضا گودرزی (۱۴۰۰)، بررسی ضرایب غیرخطی نوری نانوذرات طلا به روش روبش Z- با استفاده از تپ‌های لیزری فمتوثانیه، ۹۷، ۷-۱

DOI: 10.24200/nst.2021.1290

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1290.html