

Optical limiting characteristics of platinum and gold nanoparticles based on thermal nonlinear refraction

Mina Esamifar*, Mohammad Eghbali, Mojtaba Mokari

Physics Department, Faculty of Science, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran

Received: 29.09.2021 Revised: 16.01.2022 Accepted: 08.02.2022

Doi link: [10.22055/jrmbms.2022.17414](https://doi.org/10.22055/jrmbms.2022.17414)

Abstract

In this study, the platinum and gold nanoparticles colloids are fabricated by 18 ns pulsed laser ablation of pure platinum and gold plates in the distilled water. The formation of the nanoparticles has been evidenced by taking the UV-Vis absorption spectrum and observing the surface plasmon absorption band of gold and platinum nanoparticles as well as by transmission of electron microscopy. The nonlinear optical properties of the platinum and gold nanoparticles in distilled water are measured by the closed-aperture Z-scan technique under exposure to a low-power continuous-wave laser at a wavelength of 532 nm. The observed asymmetric nature of the Z-scan measurements along with the fact that the laser light is CW suggests that the origin of the nonlinear refractive index is thermo-optic. The optical limiting performance of the platinum and gold nanoparticles is characterized by exposure to CW laser operating at a wavelength of 532 nm. The results show that the nonlinear self-defocusing effect increases the performance of the optical limiting. The engineering of the experimental geometry can accomplish the adjustability of the limiting threshold of optical limiters.

Keywords: Platinum nanoparticles, Gold nanoparticles, Thermal nonlinear refraction, Optical limiter

* Corresponding Author: eslamifar@bkatu.ac.ir

ویژگی‌های محدودکننده نوری نانوذرات پلاتین و طلا بر اساس شکست غیرخطی گرمایی

مینا اسلامی فر*، محمد اقبالی، مجتبی مکاری بهبهان

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء، بهبهان، ایران

دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۰۷ ویرایش نهائی: ۱۴۰۰/۱۰/۲۶ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۹

Doi link: [10.22055/jrmb.2022.17414](https://doi.org/10.22055/jrmb.2022.17414)

چکیده

در این مقاله، محلول‌های کلوئیدی نانوذرات طلا و پلاتین در آب مقطر با استفاده از روش کندگی لیزر پالس ۱۸ نانومتري ورق‌های طلا و پلاتین خالص ساخته می‌شوند. تشکیل نانوذرات با استفاده از طیف جذب UV-Vis و مشاهده پیک پلاسمونی ویژه نانوذرات طلا و پلاتین و همچنین با استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری تأیید می‌شود. پاسخ غیرخطی نوری محلول‌های نانوذرات طلا و پلاتین در آب تحت تابش لیزر پیوسته (CW) با طول موج ۵۳۲nm توسط تکنیک Z-جاروب روزنه بسته اندازه‌گیری می‌شوند. عدم تقارن منحنی‌های Z-جاروب حاصل، همراه با این حقیقت که تابش لیزر، پیوسته است، نشان می‌دهد که منشأ پاسخ غیرخطی نوری، گرمایی است. رفتار محدودکننده نوری محلول نانوذرات طلا و پلاتین در آب تحت تابش لیزر کم توان CW با طول موج ۵۳۲nm بررسی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که خودواگرایی غیرخطی می‌تواند رفتار محدودکننده نوری را افزایش دهد. می‌توان با مهندسی کردن هندسه آزمایش، آستانه محدودیت نوری را به‌حالت تنظیم درآورد.

کلیدواژگان: نانوذرات پلاتین، نانوذرات طلا، شکست غیرخطی گرمایی، محدودکننده نوری

مقدمه

[۱-۲]. یک ماده محدودکننده نوری ایده‌آل باید در تابش با توان عادی تراگیسل بالا ولی در تابش‌های نوری شدید در جهت محافظت از چشم و سنسورها، تراگیسل پایین نمایش دهد. تحقیق برای یافتن محدودکننده‌های نوری مفید منجر به مطالعه بر روی مواد مختلف شده است. گزارش‌ها نشان داده است که بسیاری از مواد همچون رنگ‌های صنعتی [۳]، فیتوسیانیین‌ها^۲ [۴]، کریستال‌های مایع [۵]، فروسول‌ها^۳ [۶]، نانوذرات In_2O_3 و نانوالماس‌ها [۱۵-۱۲]، به سبب داشتن ویژگی‌های شکست غیرخطی گرمایی، تحت

پدیده محدودکننده نوری در دهه‌های اخیر به‌خاطر کاربردهای گسترده به‌ویژه در زمینه محافظت از چشم در مقابل نور شدید لیزر، بسیار مورد تحقیق قرار گرفته است. به‌دنبال استفاده گسترده از لیزرهای موجی پیوسته^۱ (CW) در سطوح توانی میکرووات تا کیلووات با کاربردهای مختلف، تحقیقات برای یافتن مواد و دستگاه‌هایی که از سنسورها و چشم انسان در مقابل امواج نوری شدید، محافظت کند، توجه فراوانی را معطوف توسعه مواد محدودکننده نوری نموده است

* نویسنده مسئول: eslamifar@bkatu.ac.ir

¹ continuous wave

² phthalocyanines

³ ferrosols



است. در مطالعه اثرات نوری غیرخطی گرمایی روی مواد، ضریب شکست غیرخطی گرمایی کمیت فیزیکی مهمی است. بنابراین تحقیق ویژگی‌های نوری غیرخطی گرمایی نانوذرات فلزی ارزنده است. از طرف دیگر، بیشتر گزارش‌های ارائه شده در زمینه ویژگی‌های غیرخطی نوری گرمایی تحت تأثیر لیزر (CW)، بر روی ترکیبات نانوذرات فلزی مثل نانوذرات سولفید نقره^۲ [۸]، نانوکریستال‌های سولفید کادیوم^۳ [۲۷] و نانوذرات فسفات^۴ [۲۸] است تا خود نانوذرات فلزی؛ که این خود ضرورت تحقیق و مطالعه بر روی رفتارهای غیرخطی نوری گرمایی نانوذرات فلزی را می‌طلبد.

در این مقاله، ویژگی‌های غیرخطی نوری گرمایی محلول‌های نانوذرات طلا و پلاتین در آب تحت لیزر پیوسته با طول‌موج ۵۳۲ نانومتر مطالعه می‌شود. همچنین ویژگی‌های محدودکننده نوری محلول‌های نانوذرات طلا و پلاتین در آب با استفاده از تکنیک Z-جاروب روزنه بسته برای قطرهای مختلف دیافراگم و فواصل مختلف بین نمونه و دیافراگم مطالعه می‌شود. پروفایل‌های فضایی پرتو فرودی به محلول نانوذرات طلا و پرتو خروجی از آن توسط دوربین CCD روی یک پرده در میدان دور ثبت می‌شود. الگوی پراش به‌دست آمده برای پرتو فرودی با الگوی پراش پرتو خروجی از محیط غیرخطی نانوذرات مقایسه می‌شود. نشان داده می‌شود که آستانه محدودکنندگی، توان فرودی که در آن منحنی از خط راست منحرف می‌شود، با تغییر قطر دیافراگم و فاصله بین نمونه و دیافراگم قابل تنظیم است. وابستگی مقدار آستانه به‌اندازه دیافراگم و فاصله میان نمونه تا دیافراگم، این مواد را به گزینه‌ای مناسب برای بهینه‌سازی شدت آستانه محدودیت نوری تبدیل کرده است.

تابش لیزر کم‌توان، محدودکننده‌های نوری خوبی هستند. کاهش تراگسیل نوری یک ماده با افزایش شدت نور تابشی را محدودکردن نوری گویند [۲].

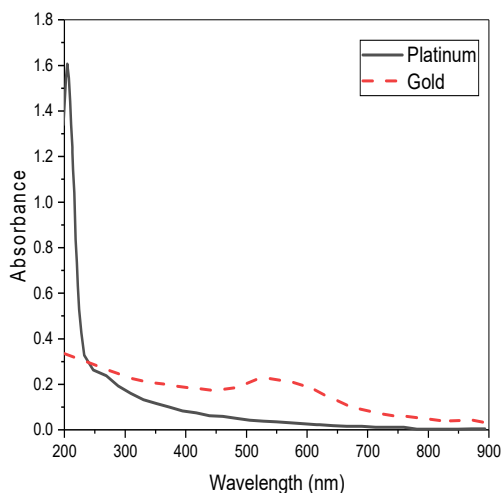
سازوکارهای محدودکننده نوری می‌تواند ناشی از برهم‌کنش غیرخطی ماده-نور، به‌خصوص جذب غیرخطی، شکست غیرخطی و پراکندگی غیرخطی باشد [۷]. رفتار محدودکنندگی نوری می‌تواند با ترکیب دو یا بیشتر این سازوکارها افزایش یابد. تحت تابش لیزر CW، ویژگی غیرخطی نوری القا شده در مواد عمدتاً به‌جای جذب، شکست غیرخطی است [۸]. از این رو، برای محدود کردن نور لیزر باید طرح‌های مناسبی براساس شکست غیرخطی مورد استفاده قرار گیرد.

مقالات زیادی وجود دارند که ضریب شکست غیرخطی نانوذرات فلزی را تحت تابش لیزرهای پالسی گزارش کرده‌اند. گانیو^۱ و همکاران ویژگی‌های غیرخطی محلول‌های کلئیدی نانوذرات طلا و پلاتین را با استفاده از تکنیک Z-جاروب تحت لیزر Nd:YAG با طول‌موج ۵۳۲ و ۱۰۶۴ نانومتر و طول پالس ۳۵ پیکوثانیه مطالعه کرده‌اند. آنها مقدار ضریب شکست غیرخطی محلول کلئیدی نانوذرات طلا را $10^{-14} \times 10^{-1} - 10^{-14}$ و $10^{-14} \times 10^{-6}$ سانتی‌متر مربع بر وات برای به‌ترتیب طول موج‌های ۱۰۶۴ و ۵۳۲ نانومتر گزارش کرده‌اند و آزمایشات آنها برای محلول نانوذرات پلاتین شکست غیرخطی ضعیف نشان داده است [۲۴].

در حالی که گزارش‌های زیادی در زمینه ویژگی‌های غیرخطی نوری کلئیدهای نانوذرات فلزی وجود دارد، تعداد کمی از آنها تحت تابش لیزر پیوسته تحقیق شده‌اند. ضریب شکست غیرخطی نانوذرات فلزی به‌طول پالس پرتو لیزر بسیار حساس است. نشان داده شده است که حتی برای پالس‌های نانوثانیه اثر گرمایی مؤثر

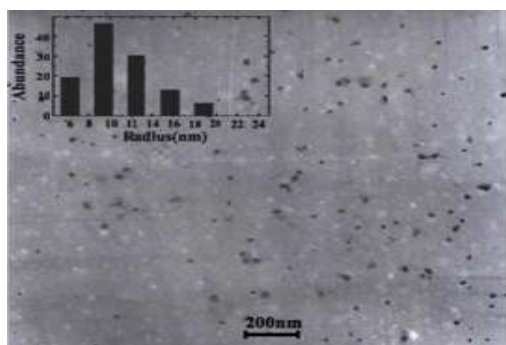
³ CdS⁴ PbS¹ Ganeev² Ag₂S

کارهای آزمایشگاهی



شکل ۱. طیف جذب کلئیدها.

شکل و توزیع اندازه نانوذرات به کمک میکروسکوپ الکترونی عبوری مورد مطالعه قرار گرفت اندازه‌گیری‌ها بلافاصله پس از کندگی لیزر انجام شد. شکل ۲، تصویر به دست آمده توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری و توزیع اندازه نانوذرات طلا و پلاتین در آب را نشان می‌دهد [۱۷]. نانوذرات کروی شکل با میانگین شعاع حدود 3 ± 9 نانومتر مشاهده شد. هر دو نمونه به شدت پایدار بودند.

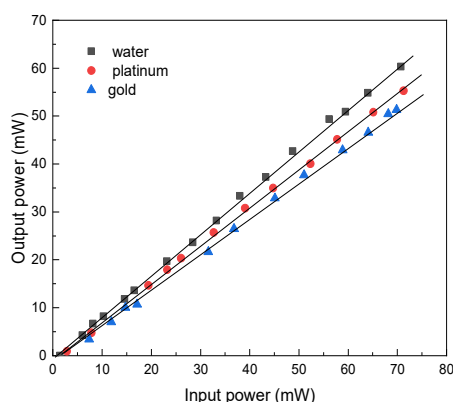


الف

کلئیدهای نانوذرات پلاتین و طلا با استفاده از روش کندگی لیزر [۹،۱۰] ورق‌های پلاتین و طلای خالص در آب مقطر تهیه شده‌اند. کندگی لیزری نمونه‌ها با استفاده از لیزر Q-switched Nd:YAG در طول موج پایه انجام شد. لیزر، پالس‌های ۱۸ نانوثانیه‌ای (پیک پهنای در نصف مقدار بیشینه) با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر و نرخ تکرار ۱ هرتز تولید کرد. پرتو لیزر توسط لنزی با فاصله کانونی ۵۰ سانتی‌متر، درون سلولی از جنس کوارتز به ضخامت ۱۰ میلی‌متر روی سطح ورق‌های طلا و پلاتین تابانده شد. نمونه‌ها برای حدود یک ساعت تحت تابش لیزری با سطح شدت 200 J/cm^2 قرار گرفتند. کسر حجمی نانوذرات پلاتین و طلای تولید شده به ترتیب 0.2×10^{-3} و 0.45×10^{-3} بود. برای تعیین توزیع اندازه و شکل نانوذرات، از میکروسکوپ الکترونی عبوری استفاده شد. جهت بررسی نانوذرات آماده‌شده پلاتین و طلا، از اسپکتروفوتومتر جذب نوری UV-Vis استفاده شد. با گرفتن طیف جذب UV-Vis در روزهای متوالی پس از تولید محلول‌ها، پایداری آنها مورد بررسی قرار گرفت. از لیزر موج پیوسته کم توان (۱۰۰ mW) پمپ شده با دیود Nd:YVO_4 در طول موج ۵۳۲ نانومتر برای اندازه‌گیری ضریب جذب خطی کلئیدها بهره گرفته شد.

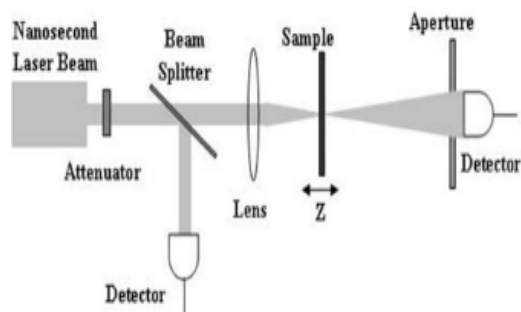
بحث و نتایج

شکل ۱ طیف جذبی UV-Vis کلئیدهای نانوذرات پلاتین و طلا تهیه شده با روش کندگی لیزری ورق‌های پلاتین و طلا در آب را نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که نانوذرات طلا و پلاتین، به ترتیب پیک جذب پلاسمون سطحی (SPA) معادل ۵۳۲ و ۲۳۷ نانومتر دارند [۱۶].

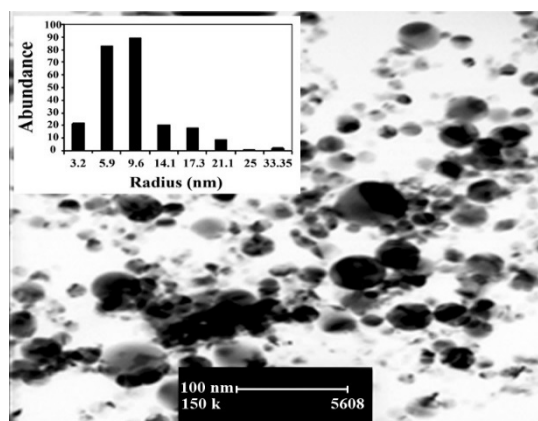


شکل ۳. اندازه‌گیری تراگسیل آب، نانوذرات پلاتین و نانوذرات طلا محلول در آب.

تکنیک Z- جاروب روزنه بسته (شکل ۴) امکان تعیین مقدار ضریب شکست غیرخطی گرمایی محلول شامل نانوذرات را فراهم می‌کند. داده‌های تجربی با حرکت تدریجی نمونه در امتداد محور انتشار (محور Z) پرتو گاوسی کانونی شده حول صفحه کانونی آن و اندازه‌گیری میزان تراگسیل نور از نمونه برای هر موقعیت Z ثبت می‌شوند. هنگامی که نمونه در موقعیت‌های مختلف شدت‌های متفاوت دریافت می‌کند، ثبت تراگسیل به‌عنوان تابعی از مختصه Z اطلاعات صحیحی در مورد حضور اثر شکست غیرخطی ارائه می‌دهد.



شکل ۴. چیدمان Z- جاروب دیافراگم بسته استفاده شده برای مشخص کردن رفتار محدودکنندگی نوری نمونه‌ها.



ب

شکل ۲. تصویر TEM و توزیع اندازه نانوذرات الف: پلاتین و ب: طلا محلول در آب.

شکل ۳ اندازه‌های تراگسیل آب (■)، کلئیدهای نانوذرات پلاتین (●) و کلئیدهای نانوذرات طلا (▲) را در مواجهه با لیزر کم توان در طول موج ۵۳۲ نانومتر نشان می‌دهد. منحنی‌های پیر، براساس فرضیه جذب خطی (قانون بیر) رسم شده‌اند و ضرایب جذب خطی آب، نانوذرات طلا و پلاتین در آب به‌ترتیب ۰٫۱۱، ۰٫۲۳ و ۰٫۱۶ cm^{-1} محاسبه شد. در این مطالعه همچنین جذب غیرخطی آب و کلئیدها به‌صورت تجربی، با استفاده از لیزر کم‌توان در طول موج ۵۳۲ نانومتر، به‌روش Z- جاروب روزنه باز مورد بررسی قرار گرفت. تا توان‌های بالا، حدود ۸۰ میلی‌وات هیچ‌گونه جذب غیرخطی در نمونه‌های مورد مطالعه، اندازه‌گیری نشد.

می‌کند که منشأ ضریب شکست غیرخطی، گرمایی است [۱].

منحنی‌های پر از برازش داده‌های تجربی با فرمول‌بندی مدل کاپو^۲ [۱۸] به دست آمده است. مقادیر ضریب شکست غیرخطی گرمایی محاسبه شده برای نانوذرات پلاتین و طلا محلول در آب با استفاده از این مدل به ترتیب برابر $-۰,۱ \times 10^{-9}$ و $-۴,۶ \times 10^{-9}$ سانتی‌متر مربع بر وات است. نانوذرات طلا در مقایسه با نانوذرات پلاتین شکست غیرخطی بزرگتری را نشان می‌دهند. در جدول ۱ مقادیر ضریب شکست غیرخطی گرمایی نانوذرات طلا و پلاتین محلول در آب با مقادیر ضریب شکست غیرخطی گرمایی گزارش شده برای برخی نانوذرات فلزی در حلال‌های مختلف [۲۳، ۲۹، ۳۰] مقایسه شده است.

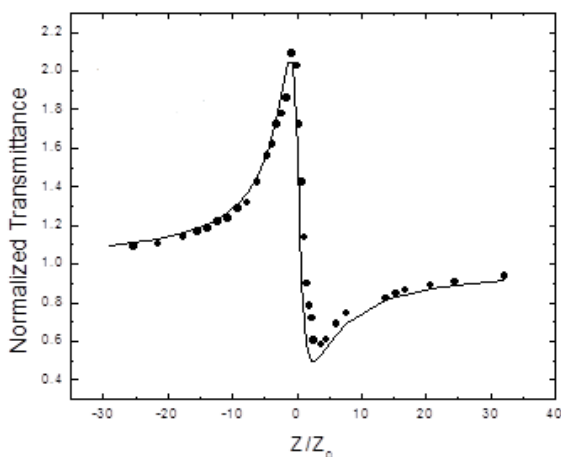
جدول ۱. مقایسه مقدار اندازه‌گیری شده ضریب شکست غیرخطی گرمایی نانوذرات طلا و پلاتین با مقادیر گزارش شده برای نانوذرات فلزی دیگر.

نمونه	n_2 (cm ² /W)
نانوذرات طلا در آب	$-۴,۶ \times 10^{-9}$
نانوذرات پلاتین در آب	$-۰,۱۰۸ \times 10^{-9}$
نانوذرات نقره در آب	$-۶,۶ \times 10^{-9}$
نانوذرات طلا در روغن کرچک	-۳۲×10^{-9}
نانوذرات طلا در پلی اتیلن گلیکول	-۸۲۰×10^{-9}
نانوذرات طلا در کیتوزان	-۳۴۰×10^{-9}

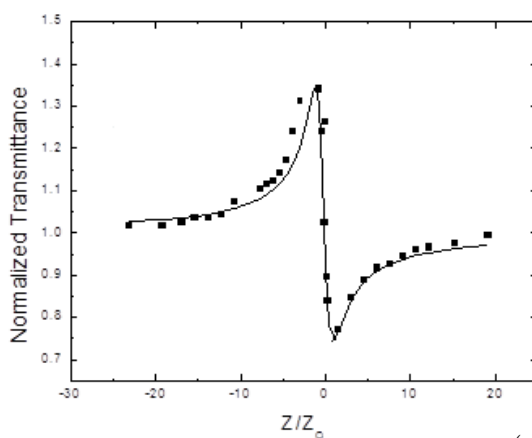
کسر حجمی نانوذرات نقره پراکنده در آب $۰,۲۹ \times 10^{-۵}$ و کسر حجمی نانوذرات طلا محلول در روغن کرچک، پلی اتیلن گلیکول و کیتوزان^۳ به ترتیب $۰,۱۱ \times 10^{-۵}$ ، $۰,۶۳ \times 10^{-۵}$ و $۰,۵۸ \times 10^{-۵}$ گزارش شده‌اند.

ویژگی‌های محدودکننده نوری نانوذرات پلاتین و طلا پراکنده در آب، با استفاده از لیزر کم‌توان CW در طول موج ۵۳۲ نانومتر مورد مطالعه قرار گرفت. چیدمان

شکل ۵ منحنی‌های تراگسیلندگی^۱ Z- جاروب روزنه بسته را به صورت تابعی از فاصله از کانون پرتو گاوسی در توان فرودی ۴۰ میلی‌وات برای نانوذرات پلاتین و طلا پراکنده شده در آب نشان می‌دهد.



الف)



ب)

شکل ۵. منحنی Z-جاروب روزنه بسته الف) نانوذرات پلاتین و ب) نانوذرات طلا محلول در آب تحت لیزر ۵۳۲ نانومتر با توان ۴۰ میلی‌وات.

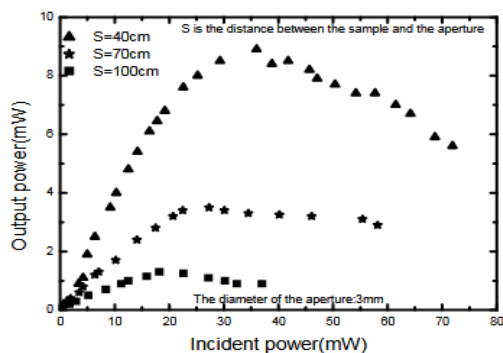
در منحنی تراگسیلندگی برحسب Z یک بیشینه که به‌طور نامتقارن با یک کمینه دنبال می‌شود، ظاهر می‌گردد. تصویر قله-دره در منحنی Z-جاروب نشان‌دهنده منفی بودن ضریب شکست غیرخطی نمونه است. عدم تقارن مشاهده شده در منحنی Z-جاروب همراه با این حقیقت که نور لیزر CW است، پیشنهاد

³ chitosan

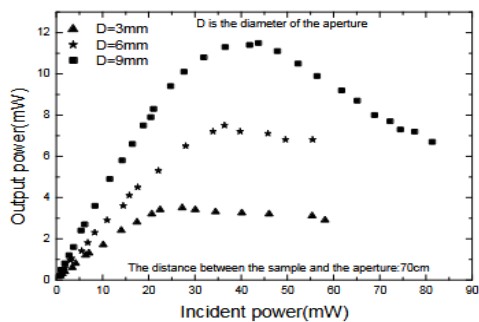
¹ Transmittance

² Cuppo

با توان تابشی (در محدوده کم‌توان) افزایش یافته و به حداکثر می‌رسد. هنگامی که توان تابشی بیشتر افزایش یابد، توان عبوری کاهش یافته و به مقداری ثابت نزدیک می‌شود. آستانه محدودیت به صورت حداکثر توان عبوری از دیافراگم با قطر و موقعیت ثابت، تعریف می‌شود.



(الف)



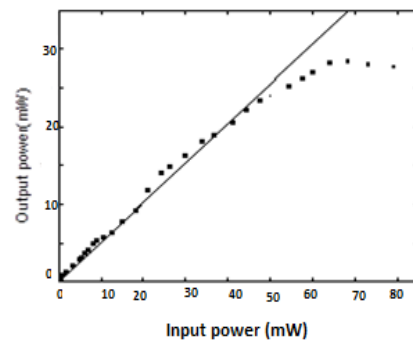
(ب)

شکل ۷. الف: ویژگی‌های محدودکننده نوری نانوذرات طلا پراکنده شده در آب برای موقعیت‌های مختلف دیافراگم ب: ویژگی‌های محدودکننده نوری نانوذرات طلا پراکنده شده در آب برای قطرهای مختلف دیافراگم.

نتایج نشان می‌دهد که آستانه محدودیت به صورت خطی با افزایش قطر دیافراگم افزایش می‌یابد، اما با افزایش فاصله میان نمونه و دیافراگم، به صورت خطی کاهش می‌یابد. این نتایج در شکل ۸ نشان داده شده است. بنابراین، با تغییر این دو پارامتر می‌توان به آستانه مطلوب دست یافت.

آزمایشگاهی استفاده شده در این کار در شکل ۴ نشان داده شده است.

برای مطالعه رفتار محدودکننده نوری نانوذرات پلاتین پراکنده شده در آب قطر دیافراگم ۳ میلی‌متر و فاصله بین نمونه و دیافراگم ۴۰ سانتی‌متر تنظیم شد. نمونه در یک سلول از جنس کوارتز به ضخامت ۵ میلی‌متر قرار داشت. به ازای هر توان فرودی، توان خروجی از نمونه ثبت شد. شکل ۶ نتایج تجربی محدودکننده نوری کلئیدهای نانوذرات پلاتین را نشان می‌دهد. براساس آنچه در این تصویر مشاهده می‌شود، در لیزرهای کم‌توان به کار رفته، خروجی متناسب با ورودی است. با افزایش توان ورودی بیش از یک حد معین، توان خروجی به حداکثر می‌رسد. متعاقباً با افزایش توان ورودی، خروجی رو به کاهش می‌گذارد و در یک مقدار ثابت باقی می‌ماند.



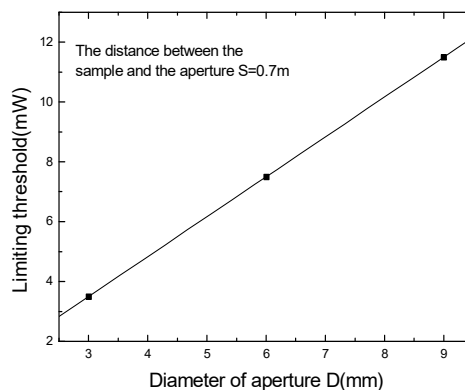
شکل ۶. ویژگی‌های محدودکننده نوری نانوذرات پلاتین پراکنده شده در آب.

با توجه به شکل ۶، آستانه محدودیت یا کمینه توان فرودی که در آن منحنی از خط راست منحرف می‌شود، دارای مقدار بالایی است به طوری که نمونه در توان بالای ۵۴/۵ میلی وات نور را مهار می‌کند.

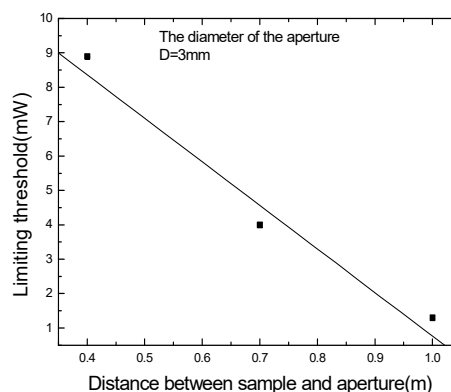
شکل ۷ نتایج تجربی محدودکننده نوری کلئیدهای نانوذرات طلا را نشان می‌دهد. براساس آنچه در این تصویر مشاهده می‌شود، توان عبوری به صورت خطی

زاویه واگرایی بزرگ و چندین حلقه پراش برای کلویدهای نانوذرات طلا اتفاق می‌افتد.

هنگامی که یک پرتو لیزر از درون ماده‌ای که دارای شکست غیرخطی نوری منفی است، عبور می‌کند واگرایی پرتو خروجی لیزر و حلقه‌های تداخلی مشخصه در میدان دور (اگر بیشینه تغییر فاز بزرگتر از 360° درجه باشد) به خاطر اثرات خود واگرایی^۱ رخ می‌دهد. برای توان فرودی پایین، قطر بیرونی‌ترین حلقه تداخلی کوچکتر از قطر دیافراگم است و همه اشعه‌های پرتو می‌توانند از دیافراگم عبور کنند به طوری که تغییر توان خروجی با توان فرودی خطی است. اما هنگامی که توان فرودی از یک مقدار بحرانی معین بیشتر می‌شود، قطر حلقه تداخلی بیرونی بزرگتر از قطر دیافراگم خواهد بود. از این رو فقط بخش مرکزی حلقه تداخلی (که با اندازه دیافراگم برابر است) می‌تواند از دیافراگم عبور کند. در آغاز رخ دادن اثر محدودکنندگی نوری، بیرونی‌ترین حلقه تداخلی، که بیشترین انرژی پرتو فرودی در آن جمع می‌شود، مسدود خواهد شد. بنابراین توان خروجی با افزایش توان فرودی کاهش می‌یابد. هنگامی که توان فرودی باز هم بالاتر می‌رود فقط مرکزی‌ترین بخش الگو (که توزیع شدت نسبتاً یکنواخت دارد) می‌تواند از دیافراگم عبور کند. این مشخصه همراه با افزایش اندازه حلقه‌های تداخلی با توان فرودی به رسیدن به حالت اشباع در توان‌های خیلی بالا منتج می‌شود.



الف)



ب)

شکل ۸ الف: افزایش آستانه محدودیت با افزایش قطر دیافراگم به طور خطی و ب: کاهش آستانه با افزایش فاصله بین نمونه و دیافراگم تقریباً به طور خطی.

سازوکار رفتار محدودکننده نوری رخ داده در محلول نانوذرات طلا در آب می‌تواند به سادگی بر اساس شکست غیرخطی در نمونه توضیح داده شود. شکل ۹ پروفایل فضایی پرتو فرودی به محلول کلوییدی نانو ذرات طلا و پرتو خروجی از محیط غیرخطی نانوذرات طلا را نشان می‌دهد. پروفایل‌ها توسط دوربین CCD روی یک پرده در میدان دور به فاصله حدود ۳ متر از نمونه ثبت شده‌اند. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود،

¹ self-defocusing

و

$$C_{eff} = C_s \phi_W + C_L (1 - \phi_W) \quad ۳$$

و

$$K_{eff} = K_L \left(1 + \frac{3(\gamma - 1)v}{(\gamma + 2) - (\gamma - 1)v} \right) \quad ۴$$

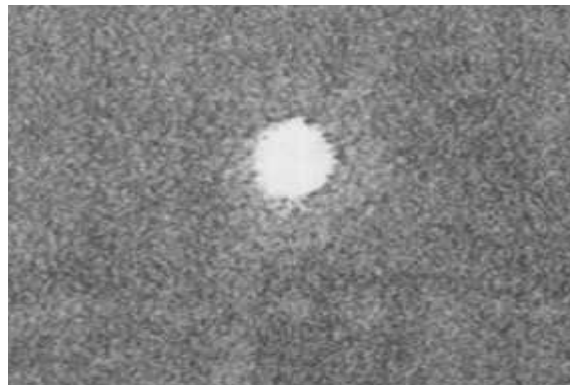
در اینجا، ρ_s چگالی توده ذرات، ρ_L چگالی مایع، C_s ظرفیت گرمایی ذرات، C_L ظرفیت گرمایی مایع، و ϕ_W کسر جرمی ذرات، K_L رسانندگی گرمایی مایع، K_s رسانندگی گرمایی توده ذرات، v کسر حجمی نانوذرات و $\gamma = K_s / K_L$ است. مقدار t یا زمان پاسخ عمل محدود کننده نوری به اثرات گرمایی برای کلئیدها در جدول ۲ فهرست شده است.

جدول ۲. مقایسه زمان پاسخ عمل محدود کننده نوری به اثرات گرمایی نانوذرات طلا و پلاتین و نقره.

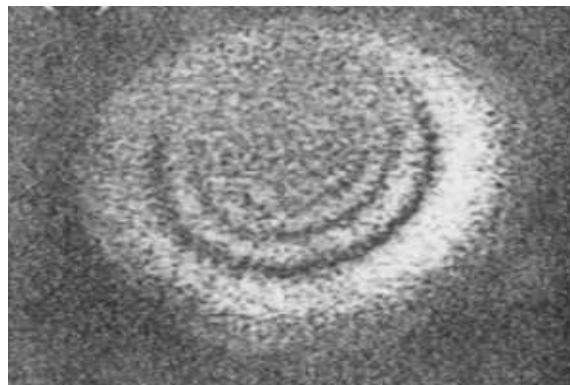
نمونه	نانوذرات طلا	نانوذرات پلاتین	نانوذرات نقره
t (ms)	۱۷	۲۶۷	۱۵

ویژگی‌های محدودکنندگی نوری نانوذرات نقره پراکنده در آب در مطالعه [۲۳] بررسی شده است.

زمان پاسخ عمل محدود کننده نوری به اثرات گرمایی نانوذرات طلا در مقایسه با نانوذرات پلاتین بسیار کوتاه و معادل ۱۷ میلی ثانیه است. براساس نتایج به دست آمده در بررسی‌های ما، نانوذرات طلا در آب در مقایسه با نانوذرات پلاتین رفتارهای محدودکننده نوری قویتری از خود نشان می‌دهند. برای مثال، برای این نانوذرات، در اندازه دیافراگم ۳ میلی‌متر، توان گسیل شده با افزایش توان ورودی به یک مقدار ثابت می‌رسد. در توان ورودی ۱۰ میلی‌وات، توان خروجی به حدود



(الف)



(ب)

شکل ۹. الف: الگوی پراش پرتو لیزر فرودی و ب: الگوی پرتو لیزر خروجی از محلول نانوذرات طلا روی پرده در میدان دور.

زمان پاسخ عمل محدودکننده نوری^۱ به اثرات گرمایی، یعنی t ، به کمک رابطه زیر به دست می‌آید [۱۹]:

$$t \approx \frac{(\rho_{eff} C_{eff}) \omega_0^2}{K_{eff}} \quad ۱$$

که در آن ω_0 شعاع کمر پرتو در نقطه کانون (نیم‌پهنا در $1/e^2$ شدت بیشینه) است. در این حالت می‌توان ρ_{eff} (چگالی جرم مؤثر)، C_{eff} (ظرفیت گرمایی مؤثر) K_{eff} (رسانندگی گرمایی مؤثر) کلئیدها را با استفاده از روابط زیر محاسبه نمود:

$$\rho_{eff} = \rho_s v + \rho_L (1 - v) \quad ۲$$

¹ optical limiting action response time

<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2004.12.005>

[2] K. Jamshidi-Ghalel, N. Mansour, Nonlinear absorption and optical limiting in Duran glass induced by 800 nm femtosecond laser pulses, *Journal of Physics D: Applied Physics* **40** (2007) 366-369. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/2/012>

[3] R.K. Rekha, A. Ramalingam, Nonlinear characteristic and optical limiting effect of oil red O azo dye in liquid and solid media, *Journal of Modern Optics* **56** (2009) 1096-1102. <https://doi.org/10.1080/09500340902944020>

[4] K. Sathiyamoorthy, C. Vijayan, M.P. Kothiyal, Low power optical limiting in CIAI-Phthalocyanine due to self-defocusing and self-phase modulation effects, *Optical Materials* **31** (2008) 79-86. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2008.01.013>

[5] I.C. Khoo, R.R. Michael, G.M. Finn, Self-phase modulation and optical limiting of a low power CO₂ laser with a nematic liquid-crystal film, *Applied Physics Letters* **52** (1988) 2108-2110. <https://doi.org/10.1063/1.99550>

[6] S. Pu, L. Yao, F. Guan, M. Liu, Threshold-tunable optical limiters based on nonlinear refraction in ferrosols, *Optics Communications* **282** (2009) 908-913. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2008.11.041>

[7] L.W. Tutt, T.F. Boggess, A review of optical limiting mechanisms and devices using organics, fullerenes, semiconductors and other materials, *Progress in Quantum Electronics* **17** (1993) 299-338. [https://doi.org/10.1016/0079-6727\(93\)90004-S](https://doi.org/10.1016/0079-6727(93)90004-S)

[8] R. Karimzadeh, H. Aleali, N. Mansour, Thermal nonlinear refraction properties of Ag₂S semiconductor nanocrystals with its application as a low power optical limiter,

۱/۸ میلی وات افت پیدا می‌کند. این نشانگر آن است که در این حالت، تراگسیل ۱۸٪ کاهش می‌یابد. به همین دلیل می‌توان از آنها برای مقاصد محدودکننده نوری بهره برد.

یکی از سازوکارهای غالب برای عملکرد مواد محدودکننده در لیزرهای کم توان، خودواگرایی غیرخطی ناشی از اثر گرمایی غیرموضعی است [۱۱ و ۱۵]. به نظر می‌رسد پراکندگی غیرخطی لیزر نوری می‌تواند نقش چشمگیری در محدودکردن پاسخ سیستم‌های کلوئیدی نانوذرات ایفا کند [۲۶-۲۵]. با این حال، جذب نوری نانوذرات می‌تواند منجر به گرمای موضعی، همرفت گرمایی و انتشار گرمایی شود [۲۱-۲۲]. نتایج تجربی مطالعه ما نشان داد که خودواگرایی غیرخطی نقش عمده‌ای در عملکرد محدودکردن نوری توسط نانوذرات طلا محلول در آب دارد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه ما ویژگی‌های نوری گرمایی غیرخطی و رفتار محدودکنندگی نوری کلوئیدهای حاوی نانوذرات طلا و پلاتین را مورد بررسی قرار دادیم. محلول‌های کلوئیدی با روش کندگی لیزرهای پالس نانوثانیه ورق‌های طلا و پلاتین در آب ساخته می‌شوند. اثر خودواگرایی مشاهده شده در نمونه‌ها را می‌توان برای ساخت محدودکننده‌های نوری مورد استفاده قرار داد. آستانه محدودیت را می‌توان با تغییر هندسه تجربی، یعنی تنظیم قطر دیافراگم و فاصله بین نمونه و دیافراگم بهبود بخشید.

مرجع‌ها

[1] K. Sendhil, C. Vijayan, M.P. Kothiyal, Low-threshold optical power limiting of cw laser illumination based on nonlinear refraction in zinc tetraphenyl porphrin, *Optics & Laser Technology* **38** (2006) 512-515.

- [16] A.V. Kabashin, M. Meunier, C. Kingston, J.H.T. Luong, Fabrication and characterization of gold nanoparticles by femtosecond laser ablation in an aqueous solution of cyclodextrins, *Journal of Physical Chemistry B* **107** (2003) 4527-4531. <https://doi.org/10.1021/jp034345q>
- [17] H. Aleali, L. Sarkhosh, M. Eslamifar, R. Karimzadeh, N. Mansour, Thermo-optical properties of colloids enhanced by gold nanoparticles, *Japanese Journal of Applied Physics* **49** (2010) 085002-085007. <https://doi.org/10.1143/JJAP.49.085002>
- [18] F. Cuppo, A.M. FigueiredoNeto, S.L. Gomez, P. Palffy-Muhoray, Thermal lens model compared with the Sheik-Bahae formalism in interpreting Z-scan experiments on lyotropic liquid crystals, *Journal of the Optical Society America B* **19** (2002) 1342-1348. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.19.001342>
- [19] R.W. Boyd, *Nonlinear optics*, Academics, New York, (2003).
- [20] X. Zhang, H. Gu, M. Fujii, Effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids containing spherical and cylindrical nanoparticles, *Experimental Thermal and Fluid Science* **3** (2007) 593-599. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2006.06.009>
- [21] R. Spill, W. Kohler, G. Lindenblatt, W. Schaertl, Thermal diffusion and soot feedback of gold-doped polyorganosiloxane nanospheres in toluene, *Physical Review E* **62** (2000) 8361-8369. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.62.8361>
- [22] W. Schaertl, C. Roos, Convection and thermodiffusion of colloidal gold tracers by laser light scattering, *Physical Review E* **60** (1999) 2020-2027. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.60.2020>
- [23] H. Aleali, N. Mansour, Nonlinear Responses and Optical Limiting Behavior of Ag Nanoparticle Suspension, *Journal of Sciences* **21** (2010) 273-278.
- Optics Communications* **284** (2011) 2370-2375. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2011.01.014>
- [9] P.V. Kazakevich, A.V. Simakin, V.V. Voronov, G.A. Shafeev, Laser induced synthesis of nanoparticles in liquids, *Applied Surface Science* **252** (2006) 4373-4380. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.06.059>
- [10] W.T. Nichols, T. Sasaki, N. Koshizaki, Laser ablation of platinum target in water. Laser ablation mechanisms, *Journal of Applied Physics* **100** (2006) 114911-114917. <https://doi.org/10.1063/1.2390640>
- [11] B. Yu, C. Zhu, F. Gan, Y. Huang, Optical limiting properties of In₂O₃ nanoparticles under cw laser illumination, *Optical Materials* **7** (1997) 103-107. [https://doi.org/10.1016/S0925-3467\(96\)00067-5](https://doi.org/10.1016/S0925-3467(96)00067-5)
- [12] O. Muller, V. Pichot, L. Merlat, D. Spitzer, Optical limiting properties of surface functionalized nanodiamonds probed by the Z-scan method, *Scientific reports* **9** (2019) 519-529-539. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36838-7>
- [13] K.G. Mikheev, et al., Optical limiting in suspension of detonation nanodiamonds in engine oil, *Journal of Nanophotonics* **11** (2017) 32502-32509. <https://doi.org/10.1117/1.JNP.11.032502>
- [14] O. Muller, V. Pichot, L. Merlat, D. Spitzer, Nonlinear optical behavior of porphyrin functionalized nanodiamonds: an efficient material for optical power limiting, *Applied Optics* **55** (2016) 3801-3807. <https://doi.org/10.1364/AO.55.003801>
- [15] V. Vanyukov, et al., Near-IR nonlinear optical filter for optical communication window, *Applied Optics* **54** (2015) 3290-3298. <https://doi.org/10.1364/AO.54.003290>

[24] R.A. Ganeev, M. Suzuki, M. Baba, M. Ichihara, H. Kuroda, Low- and high-order nonlinear optical properties of Au, Pt, Pd and Ru nanoparticles, *Journal of Applied Physics* **103** (2008) 063102-063109. <https://doi.org/10.1063/1.2887990>

[25] L. Francois, M. Mostafavi, J. Belloni, Optical limitation induced by gold clusters. 1. Size effect, *Journal of Physical Chemistry B* **104** (2000) 6133-6138. https://doi.org/10.1021/jp_9944482

[26] H. Pan, W. Chen, Y. Ping, W. Ji, Optical limiting properties of metal nanowires, *Applied Physics Letters* **88** (2006) 223106-223108. <https://doi.org/10.1063/1.2208549>

[27] Y.P. Rakovich, M.V. Artemyev, A.G. Rolo, M.I. Vasilevskiy, M.J.M. Gomes, Third-order optical nonlinearities in thin films of CdS nanocrystals, *Physica Status Solidi B* **224** (2001) 319-325. [https://doi.org/10.1002/15213951\(200103\)24:1<319::AID-PSSB319>3.0.CO;2-O](https://doi.org/10.1002/15213951(200103)24:1<319::AID-PSSB319>3.0.CO;2-O)

[28] B. Yu, Y. Gu, Y. Mao, C. Zhu, F. Gan, Nonlinear optical properties of PbS nanoparticles under CW laser illumination, *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials* **9** (2000) 117-123. <https://doi.org/10.1142/S021886350000011X>

[29] R.F. Souza, M.A.R.C. Alencar, E. Da Silva, M.R. Meneghetti, Nonlinear optical properties of Au nanoparticles colloidal system: local and nonlocal responses, *Applied Physics Letters* **92** (2008) 201902-201904. <https://doi.org/10.1063/1.2929385>

[30] M. Tajdidzadeh, A.B. Zakaria, Z. Abidin Talib, A.S. Gene, S. Shirzadi, Optical Nonlinear Properties of Gold Nanoparticles Synthesized by Laser Ablation in Polymer Solution, *Journal of Nanomaterials* **2017** (2017) 4803843-4803852. <https://doi.org/10.1155/2017/4803843>