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

اندازه‌گیری نمایه دما پیرامون ذرات میکرونی لایه‌نشانی شده، تحت تابش لیزر با استفاده از میکروسکوپ تداخلی

امین مرادی، احسان احدی اخلاقی و فائقه حاجی‌زاده

دانشکده فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان کد پستی ۴۵۱۹۵-۶۶۷۳۱
مرکز پژوهشی اپتیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان کد پستی ۴۵۱۹۵-۶۶۷۳۱

چکیده – ذرات فلزی هنگامی‌که تحت تابش امواج الکترومغناطیس قرار می‌گیرند، گرمای قابل ملاحظه‌ای تولید می‌کنند. در این مقاله با استفاده از میکروسکوپ تداخلی، گرادیان دما پیرامون ذرات میکرونی فلزی اندازه‌گیری شده است. در ابتدا با استفاده از روش لایه‌نشانی شیمیایی، ذرات میکرونی لایه‌نشانی شده با نقره تولید شد. برای اندازه‌گیری دمای اطراف این ذرات از میکروسکوپ تداخلی ماخ-زندر استفاده شده.. پس از داده‌برداری، توزیع فاز ناشی از اختلاف دما با تحلیل طرح تداخلی ثبت شده از روش‌های تحلیل طرح تداخلی فوریه و جابه‌جایی فاز اندازه‌گیری شد و با استفاده از انتگرال آبل، توزیع ضریب‌شکست پیرامون ذره تحت تابش محاسبه شد و در نهایت با توجه به رابطه بین دما و ضریب‌شکست، نمایه دمای پیرامون ذره تعیین شد.

کلید واژه- ذرات فلزی میکرونی، گرادیان دمایی، لایه‌نشانی، میکروسکوپ تداخلی.

Measurement of Temperature Gradient of Micro Metal Beads under Laser Irradiation Using Interferometry Microscope

Amin Moradi, Ehsan A. Akhlaghi, Faegheh Hajizadeh

Department of Physics, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan ۴۵۱۳۷-۶۶۷۳۱, Iran.
Optics Research Center, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan ۴۵۱۳۷-۶۶۷۳۱, Iran.

Abstract- Micro metal beads generate considerable heat under electromagnetic wave irradiation. In this paper, we measure the temperature gradient of these particles based on interferometry microscopy. Micro metal particles produced by using chemical coating method. For measuring the temperature of these particles under laser irradiation, Mach-Zehnder interferometry microscope have been applied. The phase of the transmitted beam from the particle environment obtained by analyzing interferometry fringes, using Fourier and phase shift fringes analyzing methods. Considering phase distribution and using Abel integral the distribution of refractive index around the particles has been calculated. Finally the temperature gradient determined by using the relation between the refractive index and temperature.

Keywords: Temperature Gradient, Micro Metal Beads, Coating, Interferometry microscopy

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-29]

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

۱- مقدمه

ذرات کوچک فلزی با جذب امواج الکترومغناطیسی گرمای زیادی تولید می‌کنند از این رو بهترین مبدل‌های انرژی در ابعاد بسیار کوچک هستند. گرمای تولید شده توسط این ذرات می‌تواند در حد دمای ذوب فلز باشد. تولید گرمای زیاد در ابعاد میکرون باعث شده تا این ذرات کاربرد گسترده‌ای در علم پزشکی بیابند. برهم‌کنش لیزر با ذرات طلا در محیط‌های بیولوژیکی برای تخریب سلول‌های سرطانی، باکتری‌ها، ویروس‌ها و مطالعه DNA به‌کار می‌رود[۱-۷]. هنگامی که یک ذره فلزی تحت تابش لیزر قرار می‌گیرد میدان الکتریکی لیزر سبب نوسان الکترون‌های آزاد سطح فلز می‌شود. افزایش نوسان الکترون‌ها به معنای افزایش انرژی جنبشی و بالا رفتن دما است. چنان‌چه بسامد فتون‌های فرودی به بسامد پلاسمون ذرات فلزی نزدیک باشد اثر افزایش دما به صورت قابل ملاحظه‌ای بیش‌تر می‌شود. بسامد پلاسمون ذرات فلزی به جنس، اندازه و شکل ذرات بستگی دارد که با تغییر آن‌ها می‌توان طول‌موج جذب، میزان جذب و در نتیجه گرمای تولیدی را تنظیم کرد با توجه به کوچک بودن اندازه ذرات فلزی تغییرات دمای ناشی از جذب امواج الکترومغناطیسی در ناحیه بسیار کوچکی اتفاق می‌افتد، به همین علت اندازه‌گیری دمای ذرات تحت تابش لیزر هنوز یک چالش بزرگ به حساب می‌آید. گرمای تولید شده توسط ذرات فلزی تحت تابش لیزر ابتدا به شبکه کریستالی ذره و از آن‌جا به محیط اطراف ذره منتقل می‌شود. انتقال گرما به محیط سبب بالا رفتن دمای آن و در نتیجه تغییر ضریب‌شکست محیط اطراف ذره می‌شود. این گرادیان ضریب‌شکست پیرامون ذره گرم شده باعث تغییر فاز نور عبوری از این محیط می‌شود. با روش‌های تداخل‌سنجی می‌توان تغییرات فاز نور را اندازه‌گیری کرد. با داشتن توزیع فاز و با استفاده از معکوس انتگرال آبل می‌توان توزیع ضریب‌شکست را در اطراف ذره فلزی محاسبه کرد. از آن‌جایی که ضریب‌شسکت مواد نسبت به دما تغییر می‌کند، هر ماده در یک دمای مشخص ضریب‌شسکت ویژه‌ای دارد. تغییرات ضریب‌شکست نسبت به دما با روش‌های مختلف قابل اندازه‌گیری است. هم‌چنین در بانک‌های اطلاعاتی معتبر تابع تغییرات ضریب‌شکست بسیاری از مواد موجود است. بنابراین با دانستن توزیع ضریب‌شکست در اطراف ذره می‌توان نمایه دما را در اطراف ذره به دست آورد.

۲- مباحث نظری و کارهای تجربی

چنان‌چه در محیطی که ذره در آن گرم می‌شود تغییر فاز ماده روی ندهد معادله کلی گرمای مبادله شده برابر،

$$\rho(r)C(r)\frac{\partial T(r,t)}{\partial t} = \Delta k(r)\Delta T(r,t) + Q(r,t) \text{ ,} \qquad (۱)$$

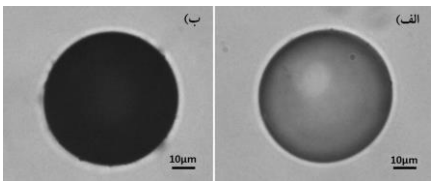
خواهد بود [۸]. در این رابطه، ρ چگالی ماده، C گرمای ویژه، k رسانندگی گرمایی و T دما است که تابعی از فاصله r و زمان t است. Q نیز گرمای ایجاد شده به علت جذب انرژی لیزر است. اگر رابطه (۱) را برای یک ذره با شعاع R_p که در یک محیط با رسانندگی گرمایی k_0 قرار گرفته است حل کنیم خواهیم داشت،

$$\Delta T(r) = \frac{V_P Q}{4\pi k_0}\frac{1}{r}(r < R_p) \cdot \qquad (۲)$$

که در آن Q مقدار گرمای تولید شده توسط ذره و V_P حجم ذره و r فاصله شعاعی است. با توجه به رابطه (۲) دما در اطراف ذره با نسبت عکس شعاع تغییر می‌کند.

۲-۱- ساخت نمونه

برای کاهش خطای اندازه‌گیری دمای سطح ذرات فلزی به هنگام تابش لیزر، لازم است گرادیان دمایی در اطراف ذره به شکل تقریبا متقارن تشکیل شود. از این رو به ذرات فلزی کروی نیاز است. از یک روش لایه‌نشانی شیمیایی برای تولید این ذرات استفاده شد که روشی کهن برای لایه‌نشانی نقره برای ساخت آینه بوده است که با بهینه‌سازی، از آن برای لایه‌نشانی نقره بر روی ذرات میکرونی شیشه‌ای استفاده شده است. در این روش ذرات میکرونی در محلول نیترات نقره آمونیومی غوطه‌ور می‌شوند و سپس گلوکز به عنوان احیاگر نقره به این محلول اضافه می‌شود. با اضافه شدن گلوکز، نقره از حالت یونی به مولکولی تغییر کرده و بر روی سطوح شیشه‌ای می‌نشینند. با استفاده از این روش ذرات میکرونی لایه‌نشانی شده با نقره در ابعاد ۲ الی ۶۰ میکرون تهیه شد. شکل ۱ تصویر این ذرات را قبل و بعد از لایه نشانی نمایش می‌دهد.

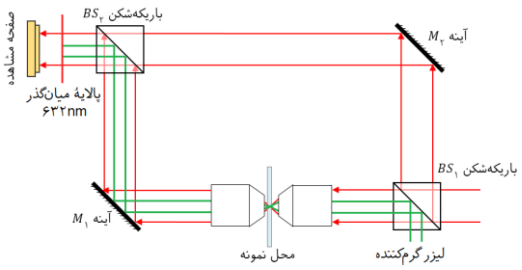


شکل ۱: الف) ذره میکرونی از جنس شیشه بدون پوشش نقره ب) ذره لایه نشانی شده با نقره

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-29]

۲-۲- روش اندازه‌گیری

برای اندازه‌گیری دما پیرامون ذره تحت تابش، از میکروسکوپ تداخلی ماخزندر استفاده شد. شکل ۲ طرح کلی از این میکروسکوپ را نمایش می‌دهد.

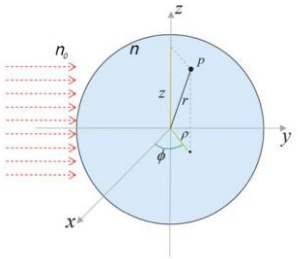


شکل ۲: طرح کلی از میکروسکوپ تداخلی ماخزندر

میکروسکوپ تداخلی ماخزندر در واقع یک تداخل‌سنج ماخزندر است که از یک میکروسکوپ در یکی از بازوهای آن استفاده شده است. شکل طرح کلی از میکروسکوپ تداخلی ماخزندر را نمایش می‌دهد. چنان‌چه در تصویر نیز مشخص است باریکه لیزر پس از عبور از باریکه‌شکن BS_1 به دو باریکه شکافته می‌شود. بر سر راه یکی از باریکه‌ها دو عدد عدسی شیئی قرار داده شده است. یکی از این عدسی‌ها به عنوان عدسی جمع کننده و دیگری به عنوان عدسی شیئی عمل می‌کند و تصویر بزرگ‌نمایی شده از نمونه را شکل می‌دهد. دو باریکه در محل باریکه‌شکن BS_2 به‌هم می‌رسند و در خروجی‌های تداخل‌سنج می‌توان طرح‌تداخلی را مشاهده کرد. برای گرم کردن ذره از یک لیزر دیودی با طول‌موج ۵۳۲ نانومتر استفاده شد. به منظور جلوگیری از ثبت شدت نور مربوط به لیزر گرم‌کننده، یک پالایه میان‌گذر ۶۳۲ نانومتر در مقابل آشکارساز قرار داده شد. در نهایت تداخل بین دو باریکه تداخل‌سنج توسط آشکارساز ثبت می‌شود و با تحلیل آن می‌توان توزیع فاز نور عبوری از نمونه را به دست آورد. داده‌برداری در دو حالت خاموش و روشن لیزر گرم‌کننده انجام شد. پس از ثبت طرح‌تداخلی، لازم است با تحلیل آن‌ها، نمایه دما پیرامون ذره به دست آید. با استفاده از روش جابه‌جایی فاز توزیع فاز نور عبوری از محیط ذره به دست آمد و با کم کردن توریع فاز حالتی که در آن لیزر گرم‌کننده روشن است از حالتی که لیزر خاموش است، اختلاف فاز مربوط به تغییر دما حاصل شد.

۲-۳- اندازه‌گیری ضریب‌شکست

هنگامی که یک ذره گرم می‌شود سبب گرم شدن محیط اطراف خود و ایجاد گرادیان ضریب‌شکست و تغییر فاز نور عبوری می‌شود (شکل ۳). اگر یک باریکه نور تخت از محیطی که دارای گرادیان ضریب‌شکست با تقارن کروی است عبور کند، راه‌نوری طی شده متناسب با انتگرال شریب‌شکست محیط خواهد بود. برای تعیین توزیع ضریب شکست در این گونه محیط‌ها می‌توان از معکوس انتگرال آبل استفاده کرد[۹].



شکل ۳: گرادیان ضریب‌شکست و دما در اطراف ذره گرم شده

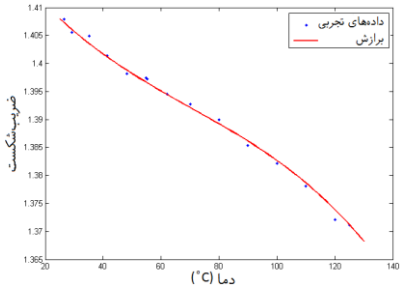
معکوس انتگرال آبل را برای فاز نور عبوری از چنین محیطی می‌توان به صورت زیر نوشت،

$$n(\rho,z)-n_0=\frac{-\lambda}{2\pi^2}\int_{\rho}^{R}\frac{\partial\varphi(x,z)}{\partial x}(\rho^2-x^2)^{-\frac{1}{2}}dx\cdot \qquad (۳)$$

که در آن n ضریب‌شکست، n_0 ضریب‌شکست محیط در بینهایت، λ طول موج، φ اختلاف فاز و R شعاع کره است. در نتیجه با داشتن فاز نور عبوری از محیط اطراف ذره و با مشتق‌گیری از آن و با استفاده از رابطه (۳) می‌توان نمایه ضریب‌شکست اطراف ذره را به دست آورد.

۲-۴- رابطه ضریب‌شکست با دما

برای کاهش اثر همرفت، از روغن سیلیکون با گران‌روی بالاتر از ۱۲۰۰۰ به عنوان ماده پیرامون ذرات استفاده شد. شکل ۴ تغییرات ضریب‌شکست روغن سیلیکون مورد استفاده را بر حسب دما نمایش می‌دهد.



شکل ۴: نمودار تغییرات ضریب‌شکست روغن سیلیکون مورد استفاده بر حسب دما

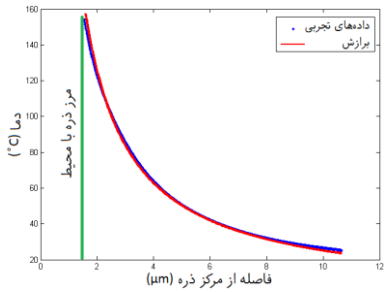
[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-29]

۳- نتایج

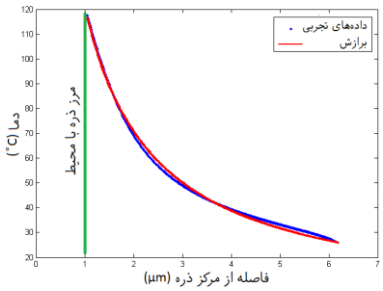
با استفاده از روش شرح داده شده. نمایه دما پیرامون ذرات لایه‌نشانی شده با نقره در اندازه‌های ۳/۲ و ۲/۱ میکرون تعیین شد. شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب نمایه دما پیرامون ذرات ۳/۲ و ۲/۱ میکرونی را نمایش می‌دهد. چنان‌چه در تصاویر نیز مشخص است، بیشینه دما در نزدیک‌ترین فاصله به سطح ذرات اتفاق می‌افتاد و بیشینه اختلاف دما برای ذره ۳/۲ میکرومتری ۱/۷±۱۵۴ درجه سیلسیوس و برای ذره ۲/۱ میکرومتری ۱/۸±۱۱۷ درجه سیلسیوس است. نمودار قرمز رنگ در این تصاویر تابع برازش شده است که با توجه به رابطه (۲) به صورت $\Delta T=a/r$ است، نمایش می‌دهد. این تابع با خطای جذر میانگین مربعی ۱/۱ درصد برای ذره ۳/۲ میکرونی و ۱/۲ درصد برای ذره ۲/۱ میکرونی بوده است. با توجه به آن‌چه گفته شد می‌توان دید دما در اطراف ذره گرم شده با رابطه معکوس فاصله تغییر می‌کند.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از روش تداخل‌سنجی میکروسکوپ ماخ-زندر گرادیان دما پیرامون ذرات میکرونی کروی اندازه‌گیری شد. بیشینه اختلاف دمای اندازه‌گیری شده برای ذره ۳/۲ میکرونی و ۲/۱ میکرونی به ترتیب برابر ۱۵۴ و ۱۱۷ درجه سیلسیوس به دست آمد. همچنین تابعیت دمای اندازه‌گیری شده با دقت خوبی با روابط نظری مطابقت دارد که نشان دهنده کاربردی بودن این روش برای تعیین گرادیان دما در ابعاد میکرون است.



شکل ۵: نمایه دما پیرامون ذره ۳/۲ میکرونی



شکل۶: نمایه دما پیرامون ذره ۲/۱ میکرونی

مراجع

[۱] Seol Y., Carpenter A., Perkins T., *Gold nanoparticles: enhanced optical trapping and sensitivity coupled with significant heating*, **Optical Society of America**, ۳۱(۲۰۰۶)۲٤۲۹-۲٤۳۱.

[۲] Cognet L., Tardin C., Boyer D., Choquet D., Tamarat P., Lounis B., *Single metallic nanoparticle imaging for protein detection in cells*, **National Acad Sciences.** ۱۰۰ (۲۰۰۳) ۱۱۳۵۰-۱۱۳۵۵.

[۳] Gobin A.M., O'Neal D.P., Watkins D.M., Halas N.J, Drezek R.A., West J.L., *Near infrared laser-tissue welding using nanoshells as an exogenous absorber*, **Lasers in surgery and medicine,** ۳۷(۲۰۰۵)۱۲۳-۱۲۹.

[٤] Skirtach A.G., Dejugnat C., Braun D., Susha A.S., Rogach A.L., Parak W.J., M{\"o}hwald H., Sukhorukov G.B., *The role of metal nanoparticles in remote release of encapsulated materials*, **Angewandte** ٥(۲۰۰٥)۱۳۷۱-۱۳۷۷.

[٥] Lee J., Govorov A.O., Kotov N.A., Nanoparticle assemblies with molecular springs: A nanoscale thermometer, **Wiley** ۱۱۷(۲۰۰٥)۷٦۰٥-۷٦۰۸.

[٦] Jain P.K., El-Sayed I.H., El-Sayed M.A., *Au nanoparticles target cancer*, **Nono Later** ۲(۲۰۰۷)۱۸-۲۹.

[۷] Numata T., Tatsuta H., Morita Y., Otani Y., Umeda, N., *Localized thermal processing with a laser-trapped and heated metal nanoparticle*, **IEEJ** ۲(۲۰۰)۳۹۸-٤۰۱.

[۸] Govorov A., Zhang W., Skeini T., Richardson H., Lee J., Kotov N.A., *Gold nanoparticle ensembles as heaters and actuators: melting and collective plasmon resonances*, **Nanoscale Research Letters,** ۱(۲۰۰٦)۸٤-۹۰.

[۹] C. J. Cramer and R.C. Birkebak, "Application of the Abel integral equation to spectrographic data," **Appl. Opt**. ٥, ۱۰٥۷-۱۰٦٤ (۱۹٦٦).

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-29]