بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ 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

نانوآلیاژهای طلا-آهن در میدان کانونی لیزر

ابراهیم مددی

مرکز آموزش عالی فنی و مهندسی بوئین زهرا، بوئین زهرا، قزوین

چکیده – تله اندازی ذرات پلاسمونی توسط انبرک نوری در زمینه‌های مختلف علمی و فناوری از اهمیت برخوردار است. ذرات پلاسمونی آلیاژی نسبت به ذرات طلا و نقره سطح مقطع خاموشی کمتری دارند که منجر به مقادیر متفاوتی در اندازه نیروی اعمالی می‌شود. در این مقاله تله‌اندازی ذرات آلیاژی طلا-آهن با درصد اتمی آهن متفاوت به طور نظری مورد مطالعه قرار گرفته است. در این بررسی نشان داده می‌شود که بیشینه‌ی نیروی تله اندازی با افزایش درصد اتمی آهن در طلا افزایش می‌یابد ولی با این افزایش قدرت تله کاهش پیدا می کند.

کلید واژه- انبرک نوری، تئوری لورنز- می، نانو ذرات آلیاژی.

Au-Fe nano-alloys in the tightly focused laser beam

Ebrahim Madadi

Department of Physics and Engineering Sciences

Buein Zahra Technical University, Buein Zahra, Qazvin

Abstract-Optical trapping of plasmonic nano-particles is important in many scientific and technological applications. Alloyed nano-particles have less extinction than pure Au and Ag nano-particles which cause different values for trapping forces. In this letter, optical trapping of Au-Fe nano-alloys with different atomic percent of Fe have been investigated theoretically. It has been shown that, maximum trapping force in the axial direction increases with atomic percent of Fe. In the contrary, stiffness reduces.

Keywords: Optical tweezers, Lorenz-Mie theory, nano-alloys.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

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

۱- مقدمه

انبرک نوری به سبب اعمال نیروهای غیرتماسی و غیر مخرب کاربردهای فراوانی در علوم مختلف همچون علوم زیستی، فیزیک و شیمی پیدا کرده است. تله‌اندازی ذرات دی‌الکتریک توسط انبرک نوری (باریکه لیزر شدیدا کانونی با نمایه گاوسی) برای نخستین بار در سال ۱۹۸۶ توسط اشکین گزارش شده است[۱] در حالیکه نخستین تله‌اندازی ذرات پلاسمونیک کروی طلا با قطر ۳۸ نانومتر در سال ۱۹۹۴ صورت گرفته است[۲]. نشان داده شده است که قدرت تله‌اندازی این ذرات تقریبا ۷ برابر قویتر از ذرات دی‌الکتریک هم اندازه آن است[۲]. محدوده قابل تله‌اندازی ذرات پلاسمونیک کروی نقره و طلا و قدرت تله آنها بصورت نظری و تجربی مطالعه شده است[۳-۵]. تله‌اندازی ذرات حفره‌دار طلا و نقره بر حسب اندازه حفره و برای عمق‌های مختلف بصورت نظری بررسی شده است[۶].

در دو دهه گذشته تله‌اندازی ذرات پلاسمونی بدلیل خواص اپتیکی آنها مورد توجه فراوانی است. در اثر برهم‌کنش ذره با میدان الکترومغناطیسی، الکترون‌های سطحی بطور جمعی به نوسان درآمده (که به تشدید پلاسمونی معروف است.) و خواص اپتیکی جالبی را رقم می‌زنند. در بین فلزات، طلا و نقره بیشترین سطح مقطع خاموشی را به خود اختصاص داده‌اند. سطح مقطع خاموشی مجموع سطح مقطع جذب و سطح مقطع پراکندگی است. سطح مقطع پراکندگی بالا منجر به آشکارسازی بهتر و سطح مقطع جذب میزان تبدیل انرژی به گرما را تعیین می‌کند. این دو خاصیت منجر به استفاده فراوان نانوذرات این فلزات در پزشکی برای درمان برخی از بیماری‌ها شده است[۷]. نشان داده شده است که این ذرات پلاسمونی در طول موج‌های بیشتر از طول موج تشدید پلاسمون قابلیت تله‌اندازی دارند[۸]. امروزه نانو آلیاژهای فلزاتی مانند آهن و فلزات نجیب مورد توجه قرار گرفته است[۹]. در این نانوآلیاژها میزان جذب اپتیکی برحسب درصد اتمی آهن در طلا مورد مطالعه نظری قرار گرفته است[۱۰]. جذب منجر به تضعیف تله‌اندازی این ذرات می‌گردد ولی بدلیل تقویت میدان الکتریکی در نزدیکی سطح ذرات پلاسمونی نیروهای تله‌اندازی تقویت می‌گردند.

در این مقاله تله اندازی نانو ذرات آلیاژی آهن- طلا با استفاده از روش لورنز- می تعمیم یافته مورد مطالعه قرار گرفته است. نشان داده می‌شود که با افزایش درصد اتمی آهن در ذرات کروی طلا با شعاع ۴۰نانومتر قدرت تله اندازی نسبت به نانوذرات طلا کاهش می‌یابد، درحالیکه نیروی فرار این ذرات بر حسب افزایش درصد اتمی افزایش می‌یابد. از طرفی مشاهده می‌گردد با افزایش زیاد درصد اتمی آهن، این ذرات تله اندازی نمی‌شوند.

۲- مدل تئوری

برای محاسبه نیروهای وارد شده بر ذره می‌توان از نیروی لورنتز و یا از تانسور تنش ماکسول استفاده شده است. در این مقاله از تانسور تنش ماکسول برای محاسبه‌ی نیروی وارده بر ذرات استفاده شده است[۱۱]:

$$\vec{F}_{rad}=\oint_S \langle \overleftrightarrow{T} \rangle \cdot \hat{n}\, da = \frac{1}{2}\varepsilon_0 \oint_S \mathrm{Re}\left[\vec{E}\cdot\vec{E}^{*}\hat{n}-\frac{1}{2}\vec{E}\cdot\vec{E}^{*}\hat{n}+c^2\vec{B}\cdot\vec{B}^{*}\hat{n}-\frac{1}{2}c^2\vec{B}\cdot\vec{B}^{*}\hat{n}\right] da \qquad (۱)$$

که $\vec{E}=\vec{E}_i+\vec{E}_s$ و $\vec{B}=\vec{B}_i+\vec{B}_s$ همه میدان‌های فرودی و پراکنده شده از ذره هستند. با استفاده از بسط میدان‌های فرودی و پراکنده شده بر حسب هماهنگ‌های کروی برداری و با کمک رابطه (۱) نیروی وارد شده بر ذره در جهت دلخواه $\hat{u}_\eta$ بدست می‌آید.

$$F_{Scat}^{\eta}=\frac{\varepsilon_0}{2k_0^2}\mathrm{Re}\sum_{plmp'l'm'}\omega_{lm}^{(p)*}A_{lm}^{(p)}\omega_{l'm'}^{(p')}A_{l'm'}^{(p')}I_{\eta,lml'm'}^{(pp')}$$

$$F_{Ext}^{\eta}=-\frac{\varepsilon_0}{2k_0^2}\mathrm{Re}\sum_{plmp'l'm'}\omega_{lm}^{(p)*}A_{lm}^{(p)}I_{\eta,lml'm'}^{(pp')} \qquad (۲)$$

$$F_{\eta}=F_{Scat}^{\eta}+F_{Ext}^{\eta}$$

که $\omega_{lm}^{(p)}$ ضرایب بسط میدان‌های فرودی و معلوم هستند. $A_{lm}^{(p)}$ ضرایب بسط میدان‌های پراکنده شده و با اعمال شرایط مرزی در سطح کره بدست می‌آیند[۱۲]. $I_{\eta,lml'm'}^{(pp')}$ ضریبی است که شامل جهت نیروی وارده بر ذره کروی است[۱۳]. $p=1,2$ بترتیب ممان‌های مغناطیسی و الکتریکی را نشان می‌دهند.

در انبرک نوری باریکه لیزر پس از عبور محیط‌های مختلف همچون عدسی شیئی، روغن غوطه‌وری و لامل در داخل نمونه کانونی می‌شود. با استفاده از روش طیف زاویه‌ای[۱۴] ضرایب بسط میدان‌های فرودی بصورت زیر بدست می‌آیند.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

$$\omega_{lm}^{(1,2)} = (2\pi E_0 \frac{k_1 f e^{-ik_1 f}}{\sqrt{n_1}})(i^{l+m} e^{-im\varphi_R} \gamma_{lm})$$

$$\int_0^{\alpha} d\theta_1 \sin\theta_1 \sqrt{\cos\theta_1}\, \exp[i(k_4 R\cos\theta_R \cos\theta_4)]$$

$$\exp[-id(k_1\cos\theta_1 - k_2\cos\theta_2)] \qquad (۳)$$

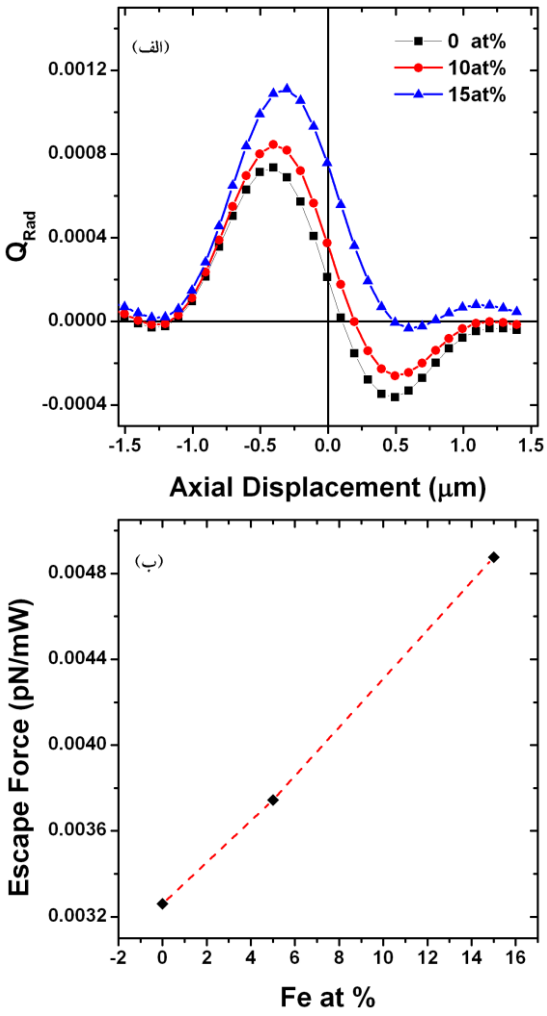
$$[\pm J_{m+1}(k_4 R\sin\theta_R \sin\theta_4) e^{-i\varphi_R} T_1$$

$$- J_{m-1}(k_4 R\sin\theta_R \sin\theta_4) e^{i\varphi_R} T_2]$$

که α نیم زاویه جمع کنندگی پرتوها توسط عدسی شیئی است. $f_O = w_0/(f\sin\alpha)$ ضریب پرکنندگی پشت عدسی شیئی، w_0 کمر باریکه در دهانه ورودی و f فاصله کانونی است. همچنین $\gamma_{lm} = \sqrt{\frac{2l+1}{4\pi(l+m)!(l-m)!}}$ و $P_{lm}(\cos\theta)$ است که علامت منفی و مثبت به ترتیب به اندیس‌های اول و دوم مربوط هستند. در رابطه (۳) نیز علامت‌های مثبت و منفی به ترتیب به اندیس‌های اول و دوم مربوط می‌شوند. τ^p و τ^s بترتیب ضرایب فرنل سطح جدایی برای قطبش‌های موازی و عمود بر صفحه فرود را نشان می‌دهند. d فاصله سطح عدسی شیئی تا محل ذره را نشان می‌دهند.

۳- تحلیل نتایج

در ذرات فلزی تشدید پلاسمون‌های سطحی بشدت به اندازه، شکل و ترکیب ذرات وابسته هستند. در این مقاله تاثیر ترکیب ذرات بر کیفیت تله مورد بررسی قرار گرفته است. ضریب خاموشی ذرات کروی طلا و آلیاژهای طلا-آهن با با افزایش درصد اتمی آهن در طول موج لیزر استفاده شده (۱۰۶۴ نانومتر) افزایش می‌یابد[۱۰]. در این مقاله شعاع ذرات ۴۰ نانومتر در نظر گرفته شده است و بررسی برای طلا و آلیاژهای طلا-آهن با درصد اتمی 5 و 15 صورت گرفته است. برای اینکه نتایج نظری با داده‌های موجود سازگار باشد گشودگی عددی عدسی شیئی ۱,۳ و ضریب پرکنندگی آن ۱ در نظر گرفته شده است.



شکل ۱: (الف) کیفیت محوری تله نوری بر حسب جابجایی محوری برای ذره طلای به شعاع ۴۰ نانومتر (نمودار مشکی)، آلیاژ طلا- آهن با درصد اتمی آهن ۵ درصد (نمودار قرمز) و درصد اتمی ۱۵ درصد (نمودار آبی). (ب) نمودار نیروی فرار ذرات تله‌اندازی شده در شکل الف. خط چین قرمز برای نمایش روند تغییرات خطی افزایش نیروی فرار بر حسب افزایش درصد اتمی آهن در ذره رسم شده است.

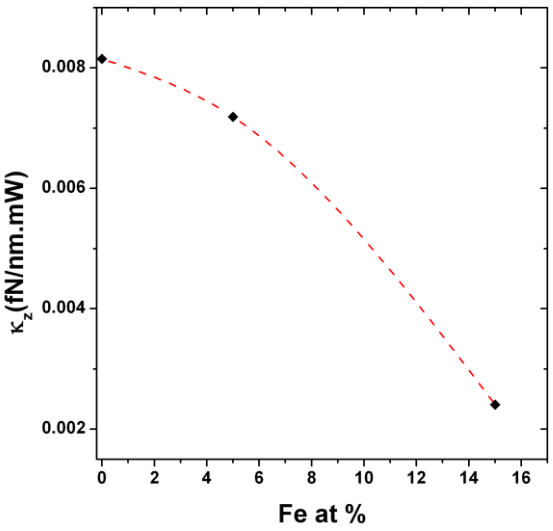
ضریب شکست طلا، آلیاژ طلا-آهن با درصد اتمی ۵ و ۱۵ در طول موج بکار رفته به ترتیب 0.2463+6.989i ، 0.8346+6.764i و 2.219+6.149i در نظر گرفته شده است[۱۰] و توان لیزر در محل تله ۱۰ میلی وات است.

نمودار شکل (۱الف) نشان می‌دهد که نیروی فرار این ذرات با افزایش درصد اتمی افزایش می‌یابد. همچنین بدلیل افزایش جذب اپتیکی محل تعادل ذره در راستای محوری منتقل شده است. همچنین شکل (۱ب) نشان می‌دهد که نیروی فرار بر حسب درصد اتمی تقریبا بطور خطی افزایش می‌یابد طوری که برای درصد اتمی ۱۵ درصد ای افزایش نسبت به طلا از مرتبه ۵۰ درصد است.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

شکل ۲ نمودار ضریب سختی تله را برای ذرات آلیاژی بر حسب درصد اتمی آهن در طلا نشان می‌دهد. این شکل گویای آن است که با افزایش درصد اتمی آهن ضریب سختی تله کاهش می‌یابد و این مقدار به حدود یک چهارم مقدار ضریب سختی طلا می‌رسد.



شکل 2: نمودار ضریب سختی تله بر حسب درصد اتمی آهن در طلا برای ذره به شعاع ۴۰ نانومتر در عمق ۲ میکرومتر(نقاط سیاه پر). خط چین قرمز برازش به تابع $y=0.008-9.74x-1.9x^2$ است تا رفتار تغییرات ضریب سختی بر حسب درصد اتمی آهن نمایان گردد.

۴- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر مقاله تله‌اندازی ذرات آلیاژی آهن– طلا بطور نظری مطالعه گردیده و با تله‌اندازی ذرات طلای خالص مقایسه شده است. نشان داده شد که با افزایش درصد اتمی آهن تا ۱۵ درصد اتمی در نانو ذرات طلا نیروی فرار ذرات از تله نسبت به ذره طلا حدود ۵۰ درصد افزایش می‌یابد (از ۰,۰۰۳۲ پیکونیوتن بر میلی وات به ۰,۰۰۴۸ پیکونیوتن به میلی وات افزایش یافته است.) که می‌توان آن را به توزیع میدان الکتریکی در نزدیکی سطح ذره نسبت داد. میدان الکتریکی در نزدیکی سطح ذرات پلاسمونی به شدت تقویت می‌شود. نشان داده شد که ضریب سختی تله محوری بر حسب درصد اتمی نسبت به ذره طلا بیشتر از ۱۰۰ درصد کاهش می‌یابد.

مراجع

[1] Ashkin A., Dziedzic J. M., Bjorkholm J. E., Chu S., Observation of a single-beam gradient force optical trap for *dielectric particles*, **Opt. Lett.,** 11 (1986) 288-290.

[2] Svoboda K., Block S. M., *Optical trapping of metallic Rayleigh particles*, **Opt. Lett.,** 19 (1994) 930-932.

[3] P. M. Hansen, V. K. Bhatia, N. Harrit, and L. B. Oddershede, *Expanding the optical trapping range of gold nanoparticles*, **Nano Lett.** 5, (2005) 1937–1942.

[4] L. Bosanac, T. Aabo, P. M. Bendix, and L. B. Oddershede, *Efficient optical trapping and visualization of silver nanoparticles*, **Nano Lett.,** 8, (2008) 1486–1491.

[5] Saija R., Denti P., Borghese F., Maragò O. M., Iatì M. A., *Optical trapping calculations for metal nanoparticles. Comparison with experimental data for Au and Ag spheres*, **Opt. Express,** 17 (2010) 10231-10241.

[6] E. Madadi, *Optical trapping calculations for hollow metallic nanoparticles*, **J. Opt. Soc. Am. B,** 33, (2016) 670-674.

[7] J. Tian, K. K. Wong, C. M. Ho, C. N. Lok, W. Y. Yu, C. M. Che, J. F. Chiu, and P. K. Tam, *Tropical delivery of silver nanoparticles promotes wound healing*, **ChemMedChem,** 2, (2007) 129–136.

[8] A. Lehmuskero, P. Johansson, H. Rubinsztein-Dunlop, L. Tong and M. Kall, *Laser Trapping of Colloidal Metal Nanoparticles*, **ACS Nano,** 9, (2015) 3453–3469.

[9] Y. P. Lee, Y. V. Kudryavtsev, V. V. Nemoshkalenko, R. Gontarz and J. Y. Rhee, *Magneto-optical and optical properties of Fe-rich Au-Fe alloy films near the fcc-bcc structural transformation region*, **Phys. Rev. B,** 67, (2003) 104424.

[10] V. Amendola, R. Saija, O. M. Maragò and M. A. Iatì, *Superior plasmon absorption in iron-doped gold nanoparticles*, **Nanoscale**, 7, (2015) 8782-8792.

[11] Jackson J. D., *Classical Electrodynamics*, 2d ed. (Wiley, New York, 1975).

[12] Bohren C. F., Huffman D. R., *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, (Wiley, New York, 1983).

[13] Borghese F., Denti P., Saija R., Iatì M. A., *Optical trapping of nonspherical particles in the T-matrix formalism*, **Opt. Express,** 15, (2007) 11984–11998.

[14] Richards B., Wolf E., *Electromagnetic diffraction in optical systems. II. Structure of the image field in an aplanatic system*, **Proc. R. Soc. London Ser. A,** 253 (1959) 358–379.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]