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

مطالعه نظری تله اندازی ذرات تو خالی طلا

ابراهیم مددی

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

چکیده – تله اندازی ذرات فلزی بخصوص طلا توسط انبرک نوری در مطالعه سلول‌های زیستی حائز اهمیت است. علارغم کیفیت تله‌اندازی بهتر نسبت به ذرات پلی‌استایرین، این ذرات بدلیل جذب بالا، حرارت زیادی تولید می‌کنند. برای کاهش حرارت تولید شده، استفاده از ذرات تو خالی راه مناسبی به نظر می‌رسد. در این مقاله تله‌اندازی ذرات تو خالی طلا بطور نظری مورد مطالعه قرار گرفته است. این مطالعه نشان می‌دهد، ضریب سختی محوری در تله اندازی این ذرات با کاهش ضخامت لایه طلا بطور قابل توجه‌ای افزایش می‌یابد.

کلید واژه- انبرک نوری، تئوری لورنز- می، ذرات تو خالی، نانو ذرات طلا.

Optical trapping of gold hollow spheres

Ebrahim Madadi

Buein Zahra Technical University, Buein Zahra, Qazvin

Abstract-Optical trapping of metal particles, especially gold nanoparticles is very important for investigation of living cells. Despite, better trapping of metals with respect to polystyrene beads, so much heat is created during trapping because of their high absorption. Using hollow spheres are adequate to decrease the created heat. In this letter, optical trapping of hollow gold nanoparticles have been investigated. It has been shown that, trapping stiffness in the axial direction increases with reduction of shell thickness, dramatically.

Keywords: Optical tweezers, Lorenz-Mie theory, hollow spheres, gold nanoparticles.

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

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

۱- مقدمه

پس از ابداع انبرک نوری توسط اشکین در سال ۱۹۸۶[۱]، این ابزار کاربردهای فراوانی در علوم مختلف از جمله فیزیک[۲] و علوم زیستی[۳] پیدا کرده است. انبرک نوری، باریکه لیزر با نیمرخ گاوسی است که توسط عدسی شیئی با گشودگی عددی بالا تا حد پراش کانونی شده است. ذراتی که ضریب شکست آنها در مقایسه با محیط بزرگتر است در تله انبرک نوری به دام می‌افتند و به آنها نیروی بازگرداننده‌ای از جنس نیروی فنر وارد می‌شود که قدرت آن با ضریب سختی‌اش (k) مشخص می‌شود. معمولا در این وسیله از ذرات پلی‌استایرین نانومتری و میکرومتری بعنوان دستگیره برای دستکاری در علوم مختلف استفاده می‌شود.

علاوه بر ذرات دی‌الکتریک از ذرات فلزی همچون نقره و طلا بعنوان وسیله‌ای برای میکرودستکاری در سلول‌های زنده استفاده می‌شود. پلاسمون‌های سطحی، تله‌اندازی ذرات فلزی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. اسوبدا و بلاک نشان دادند که قدرت تله‌اندازی ذرات نانومتری طلا تقریبا ۷ برابر ذرات پلی‌استارین هم سایز آن است[۴] که استفاده از این ذرات را پر اهمیت می‌کند. مشکل اساسی در این ذرات گرمای تولید شده در آنها و در محیط اطراف آنهاست که بدلیل جذب بالای امواج الکترومغناطیس رخ می‌دهد. گرمای تولید شده در این ذرات با کاهش سایز آنها کاهش می‌یابد. ولی بدلیل حرکت براونی شدید ذرات کوچک، تله‌اندازی آنها دشوار است[۶]. راه دیگری که می‌توان پیشنهاد کرد استفاده از ذرات کروی توخالی طلا است[۷] که پیش بینی می‌شود با کاهش حجم طلا در آن جذب نیز کاهش یابد. بنابراین از اینگونه ذرات می‌توان بعنوان جایگزین مناسبی در تله اندازی استفاده کرد.

در این مقاله تله اندازی نانو ذرات توخالی طلا با استفاده از روش لورنز- می تعمیم یافته مورد مطالعه قرار گرفته است. نشان داده می‌شود که با کاهش ضخامت لایه کروی طلا با شعاع کل ۶۰nm به ۱۰nm قدرت تله اندازی نسبت به کره توپر ۴۰ درصد افزایش می‌یابد، بعلاوه بیشینه‌ی نیروی وارده به ذرات توخالی نیز افزایش پیدا می‌کند.

۲- تئوری محاسبات

برای محاسبه نیروهای وارد شده بر ذره از تانسور تنش ماکسول استفاده شده است[۸]:

(۱)

$$\vec{F}_{rad} = r^2 \int d\Omega \langle \vec{T} \rangle . \hat{r}$$

$$\vec{T} = \frac{1}{2}\varepsilon_0 [n^2 \vec{E} \otimes \vec{E}^* + c^2 \vec{B} \otimes \vec{B}^* - \frac{\vec{I}}{2}(n^2 |E|^2 + c^2 |B|^2)]$$

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 رابطه (۱) نیروی وارد شده بر ذره در جهت دلخواه $\hat{u}_\eta$ بدست می‌آید.

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

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

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

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[۹]. $I_{\eta,lml'm'}^{(pp')}$ ضریبی است که شامل جهت نیروی وارده بر ذره کروی است[۱۰]. $p = 1,2$ بترتیب ممان‌های مغناطیسی و الکتریکی را نشان می‌دهند.

در انبرک نوری باریکه لیزر پس از عبور از عدسی شیئی، روغن غوطه‌وری و لامل در داخل نمونه کانونی می‌شود. با استفاده از روش طیف زاویه‌ای[۱۱] ضرایب بسط میدان‌های فرودی بصورت زیر بدست می‌آیند.

(۳)

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

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

$$\exp[-i(k_1(t_2+t_3+t_4)\cos\theta_1 - k_2 t_2 \cos\theta_2$$

$$- k_3 t_3 \cos\theta_3 - k_4 t_4 \cos\theta_4)]$$

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

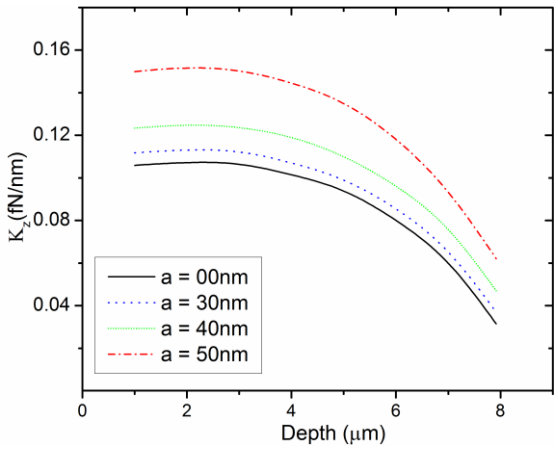
$$- J_{m-1}(k_4 R \sin\theta_R \sin\theta_4) e^{i\phi_R} T_2]$$

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

که α نیم زاویه جمع کنندگی پرتوها توسط عدسی شیئی است. $f_0 = w_0/(f\sin\alpha)$ ضریب پرکنندگی پشت عدسی شیئی، w_0 کمر باریکه در دهانه ورودی و f فاصله کانونی است. همچنین $\gamma_{lm} = \sqrt{\frac{2l+1}{4\pi l(l+1)}\frac{(l-m)!}{(l+m)!}}$ و $T_{1,2} = (\tau^{(p,s)}\pi_{lm}(\cos\theta_4) \mp \tau^{(s,p)}\tau_{lm}(\cos\theta_4))$ 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 سه سطح جدایی متوالی برای قطبش‌های موازی و عمود بر صفحه فرود را نشان می‌دهند. t_2، t_3 و t_4 بترتیب ضخامت لایه روغن غوطه‌وری، ضخامت لامل و فاصله سطح لامل تا محل ذره را نشان می‌دهند.

۳- تحلیل نتایج

در ذرات فلزی تشدید پلاسمون‌های سطحی بشدت به اندازه ذرات وابسته هستند. در این مقاله شعاع کل ذرات کروی ۶۰nm در نظر گرفته شده است. کره توپر طلا با این اندازه در طول موج لیزر استفاده شده (۱۰۶۴nm) ضریب خاموشی ناچیزی دارد[۵]. برای اینکه نتایج نظری با داده‌های موجود سازگار باشد گشودگی عددی عدسی شیئی ۱,۳، ضریب پرکنندگی آن ۱ و ضریب شکست روغن غوطه‌وری **۱,۵۴** انتخاب شده است. محاسبات برای کره توخالی به ضخامت لایه‌ی ۱۰nm، ۲۰nm، ۴۰nm، ۵۰nm و کره توپر تکرار شده است.

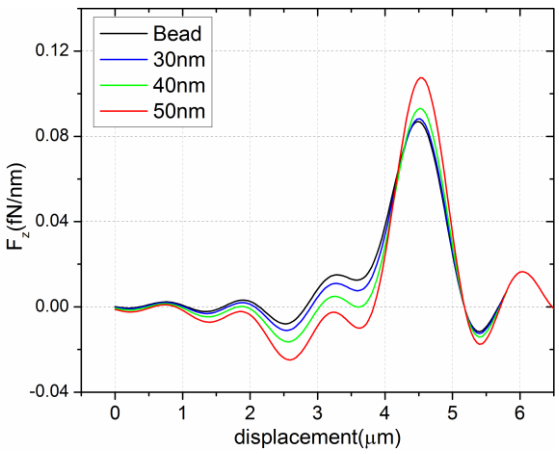


شکل ۱: ضریب سختی محوری تله بر حسب عمق ذرات طلای تو خالی به شعاع حفره ۵۰nm(قرمز)، ۴۰nm(سبز)، ۳۰nm (آبی) و کره توپر.

ضریب شکست طلا در طول موج بکار رفته حدود ۰,۴+۷,۴i [۶] در نظر گرفته شده است و توان لیزر در محل تله ۸mW است.

در ابتدا ضریب سختی تله انبرک نوری بر حسب عمق تله مورد بررسی قرار گرفته است. نمودار شکل ۱ نشان می‌دهد که برای تمام این ذرات با ضخامت لایه متفاوت عمق بهینه‌ای در حدود $2.45\mu m$ وجود دارد که ضریب سختی محوری تله در آن بیشینه است. علاوه بر این قدرت تله‌اندازی ذراتی که لایه نازک‌تری دارند در تمام عمق‌ها قویتر است بطوریکه این تقویت در عمق $2\mu m$ برای ذره طلا با ضخامت لایه‌ی ۱۰nm، حدود ۴۰ درصد نسبت به کره توپر بیشتر است. محاسبه تا عمق $8\mu m$ تکرار شده است. در عمق‌های بیشتر ذرات به تله‌اندازی نمی‌شوند.

شکل ۲ نمودار نیروی محوری وارد بر ذرات کروی توپر و توخالی با ضخامت‌های مختلف را بر حسب جابجایی نشان می‌دهند که در عمق بهینه انجام شده‌اند. همانگونه که در شکل دیده می‌شود علاوه بر اینکه شیب نمودار نیرو در ناحیه خطی برای کره‌های با حفره بزرگتر بیشتر است، بیشترین نیروی وارده نیز برای این ذرات بزرگتر است. بعنوان نمونه برای حفره شعاع ۵۰nm نسبت به کره توپر، نیروی بیشینه از ۰.۰۹fN/nm به حدود ۰,۱۱fN/nm رسیده است. دلیل این پدیده جذب کمتر این ذرات و در نتیجه کاهش نیروی پراکندگی است که در جهت خارج ساختن ذره از تله بر آن وارد می‌شود.

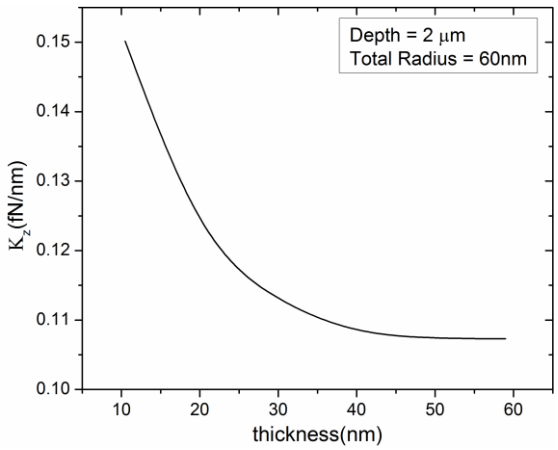


شکل ۲: نمودار نیروی محوری واره شده بر ذره طلای توپر و توخالی با شعاع‌های مختلف بر حسب جابجایی در عمق ۲ میکرومتر.

در ادامه نمودار ضریب سختی محوری بر حسب ضخامت لایه طلا رسم شده است(شکل ۳). نمودار نشان می‌دهد

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

که ضریب سختی تله با افزایش ضخامت لایه به وضوح کاهش می‌یابد و همانگونه که اشاره شد بدلیل کم شدن نیروی پراکندگی است.



شکل ۳ : نمودار ضریب سختی تله بر حسب ضخامت لایه طلا در عمق $2\mu m$.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله تله اندازی ذرات توخالی طلا بطور نظری مطالعه گردیده و با ذرات طلای توپر مقایسه شده است. نشان داده شد که با افزایش شعاع حفره ضریب سختی تله و بیشینه‌ی نیروی وارده بر ذره افزایش می‌یابد که می‌توان آن را به کاهش نیروی پراکندگی نسبت داد. بطور کمی نشان داده شد که کیفیت تله برای ذره با حفره به شعاع ۵۰nm حدود ۴۰ درصد نسبت به ذره طلای توپر بهبود می‌یابد.

مراجع

[۱] Ashkin A., Dziedzic J. M., Bjorkholm J. E., Chu S., Observation of a single-beam gradient force optical trap for *dielectric particles*, **Opt. Lett.,** ۱۱ (۱۹۸٦) ۲۸۸-۲۹۰.

[۲] Friese M. E. J., Nieminen T. A., Heckenberg N. R., Rubinsztein-Dunlop H., *Optical torque controlled by elliptical polarization*, **Opt. Lett.,** ۲۳ (۱۹۹۸) ۱-۳.

[۳] Hansen T. M., Reihani S.N.S., Oddershede L.B., Sørensen **M. A., Proc. Natl. Acad. Sci. USA,** ۱۰٤ (۲۰۰۷) ٥۸۳۰.

[٤] Svoboda K., Block S. M., *Optical trapping of metallic Rayleigh particles*, **Opt. Lett.,** ۱۹ (۱۹۹٤) ۹۳۰-۹۳۲.

[٥] 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,** ۱۷ (۲۰۱۰) ۱۰۲۳۱-۱۰۲٤۱.

[٦] Hajizadeh F., Reihani S.N.S., *Optimized optical trapping of gold Nanoparticles*, **Opt. Express,** ۱۸ (۲۰۱۰) ٥٥۱-٥٥۹.

[۷] Liang H. P., Wan L. J., Bai C. L., Jiang L., *Gold Hollow Nanospheres: Tunable Surface Plasmon Resonance Controlled by Interior-Cavity Sizes*, **J. Phys. Chem. B,** ۱۰۹ (۲۰۰٥) ۷۷۹٥-۷۸۰۰.

[۸] Jackson J. D., *Classical Electrodynamics*, ۲d ed. (Wiley, New York, ۱۹۷٥).

[۹] Bohren C. F., Huffman D. R., *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, (Wiley, New York, ۱۹۸۳).

[۱۰] Borghese F., Denti P., Saija R., Iatì M. A., *Optical trapping of nonspherical particles in the T-matrix formalism*, **Opt. Express,** ۱٥, (۲۰۰۷) ۱۱۹۸٤–۱۱۹۹۸.

[۱۱] 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,** ۲٥۳ (۱۹٥۹) ۳٥۸–۳۷۹.

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