



عوامل مؤثر بر رشد و یا کاهش سرعت دمای نانوکرات پلاسمایی ناشی از اندرکنش امواج همدوس الکترومغناطیسی با پروفایل گاوی

فاطمه خسروی^{*}، بهرام جزی، عباس عبدالآراني، سعیده گلهرانی

گروه لیزر و فوتونیک، دانشکده فیزیک، دانشگاه کاشان، کاشان

کلید واژه: گرم شوندگی پلاسمایی، نانو کره‌ی پلاسمایی، پرتولوگی

چکیده

در این مقاله، به منظور تخریب بافت‌های سرطانی، گرم شوندگی نانوکرات پلاسمایی از طریق ورود امواج الکترومغناطیسی به داخل نانوکرات مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در این راستا، نرخ تغییر دمای نانوکره‌ی پلاسمایی بررسی خواهد شد که دمای پلاسمایی در اثر برهمن-کنش پرتولوگی لیزر با مشخصات گاوی با نانوکره تغییر می‌یابد. نمودارهای تغییرات دما نسبت به زمان در آن بر حسب دمای الکترون‌ها، فاصله‌ی خروج بیم لیزر از مولد تا مرکز نانوکره پلاسمایی در راستای محور z فرکانس پلاسمایی و طول موج تابشی ارائه خواهد گردید. این محاسبات برای پلاسمایی در تقریب برخورده انجام خواهد شد.

The effective factors on growth or reduction of temperature rate of the plasma nano-sphere due to the interaction of coherent electromagnetic waves with Gaussian profiles

Fatemeh Khosravi^{*}, Bahram Jazi, Abbas Abdoli Arani, Saeedeh Golharani

Department of Laser and Photonics, Faculty of Physics, University of Kashan, Kashan

jaziada@kashanu.ac.ir abdoliabbas@kashanu.ac.ir saeedeh.golharani@yahoo.com

*corresponding e-mail: Fatemeh.Khosravi1384@gmail.com

Abstract

In this paper, in order to destroy cancerous tissues, the heating of the plasma nanoparticles is studied due to the injection of electromagnetic waves into nanoparticles. In this regard, the rate of variations of temperature of the plasma nano-sphere will be investigated. The plasma temperature will change via interaction of the laser beam with Gaussian profile with nano-sphere. Diagrams of growth rate of temperature will be presented in terms of the temperature of the electrons, the distance of exit point of the beam from laser cavity generator to the center of the plasma nanosphere along the z-axis, the plasma frequency, and the wavelength of the radiation wave. These calculations will be performed for the plasma in the collisional approximation.

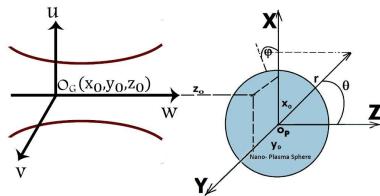
Keywords: Plasma heating, Plasma nano-sphere, Gaussian laser beam

مقدمه

های سالم بمباران می‌شوند. مطالعه‌ی حاضر نشان می‌دهد که نظریه‌ی ارائه شده در این مقاله جهت دستکاری سلول بسیار جامع می‌باشد.

به منظور گرم کردن پلاسماهای دو روش وجود دارد. تکنیک اول بر اساس تزریق باریکه‌ای از ذرات خنثی با انرژی بالا به پلاسمایی است. از آنجا که ذرات باریکه در پلاسمایی بونیزه می‌شوند، لذا از طریق برخوردهای کولنی انرژی خود را به یون‌ها و الکترون‌ها

کاربرد انبرک‌های نوری به منظور تخریب بافت‌های سرطانی و یا انتقال دارو به آن‌ها حائز اهمیت فراوانی است [۱-۴]. این موتورهای بیولوژیکی به عنوان مسئول حرکات مکانیکی سلول بسیار مورد توجه می‌باشند. در این راستا، نانوکرات پلاسمایی که توسط پرتولوهای نوری به موقعیت مطلوب هدایت می‌شوند، می‌توانند استفاده گردد. سلول‌های سرطانی با گرم شدن نانوکرات پلاسمایی و انفجار دیواره‌های آن‌ها بدون آسیب رساندن به سلول



شکل ۱: پیکربندی هندسی

از آنجا که منبع خارجی تولید میدان در یک محیط، به دلیل برهمکنش میدان الکترومغناطیسی با منبع، به طور طبیعی انرژی را تغییر می‌دهد از این رو کار انجام شده توسط میدان الکتریکی بر روی منبع خارجی با تغییر در انرژی میدان تعیین می‌گردد [۵]:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{1}{4\pi} \int_V dr \left(\mathbf{B} \cdot \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \mathbf{E} \cdot \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \quad (1)$$

که \mathbf{E} میدان الکتریکی، \mathbf{B} القای مغناطیسی و \mathbf{D} بردار جابجایی الکتریکی است. اگر القای مغناطیسی \mathbf{B} و بردار جابجایی الکتریکی \mathbf{D} به طور مداوم در محیط تغییر کنند، می‌توان عبارتی را برای مقدار گرمای آزاد شده در پلاسمای از معادله فوق استخراج کرد:

$$Q = \frac{dW}{dt} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \int_V dr i \omega \epsilon_0 [\epsilon_{ij}^*(\omega, \mathbf{k}) - \epsilon_{ji}(\omega, \mathbf{k})] E_i E_j^* \quad (2)$$

که در آن E_i مؤلفه میدان الکتریکی امواج داخل نانوکرهای پلاسمایی و $\epsilon_{ji}(\omega, \mathbf{k})$ عنصر تانسور گذرهای الکتریکی هستند و ϵ_{ij}^* به ترتیب مزدوج آن‌ها می‌باشند.

در این راستا، چنان‌چه جذب میدان الکترومغناطیسی در محیط مورد نظر باشد، وجود یک بخش پادهرمیتی در تانسور گذرهای الکتریک ضروری است [۵]. بنابراین نانوکرهای پلاسمایی مورد بررسی در تقریب برخورده در نظر گرفته می‌شود و تانسور گذرهای دی الکتریک آن بدین صورت خواهد بود:

$$\tilde{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{bmatrix}, \quad \epsilon_{11} = \epsilon_{22} = \epsilon_{33} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\nu)} \quad (3)$$

در اینجا، ω فرکانس موج تابشی، ν فرکانس برخورد الکترون‌ها در پلاسمایی و ω_p فرکانس پلاسمایی الکترون هستند که $\omega_p = \sqrt{\frac{n_0 e^2}{\epsilon_0 m_e}}$ باشد و ϵ_0, n_0, m_e, e به ترتیب بار الکترون،

متقل می‌کنند. روش دوم بر مبنای ورود امواج الکترومغناطیسی به داخل پلاسمایی و ایجاد شرایط مناسب جهت میرایی امواج توسط یون‌ها و یا الکترون‌ها است [۹-۵].

چنان‌چه محیط پلاسمایی تحت تابش لیزر قرار گیرد و نرخ تغییرات دما برای آن منفی گردد، با توجه به معادلات میدان‌ها در هر لحظه به نظر می‌رسد میدان‌های الکترومغناطیسی در فضای خارج از محیط پلاسمایی قوی‌تر می‌شوند و ذرات در محیط پلاسمایی گرم و انرژی جنبشی خود را به امواج پراکنده شده در فضای خارج از محیط پلاسمایی می‌دهند. لذا با تابش لیزر به نانوکرهای پلاسمایی می‌توان دمای آن را کاهش داد. بنابراین، در برخی تراکم‌ها گرم شدگی و در بعضی تراکم‌ها سرد شدن محیط پلاسمایی مشاهده می‌گردد. جهت بررسی مکانیسم گرم شدگی نانوکرات فلزی از نظریه‌ی دروده استفاده می‌شود.

در این مقاله مقدمه به عنوان بخش اول ارائه شد. پیکربندی هندسی و الگوی ریاضی حاکم بر پروفایل میدان‌های الکتریکی داخل نانوکرهای پلاسمایی و نیز نرخ تغییر دمای پلاسمایی در اثر برهم-کنش امواج با پلاسمایی در بخش دوم معرفی خواهد گردید. در بخش سوم نمودارهای نرخ رشد دما در نانوکرات پلاسمایی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. جمع بندی و نتیجه‌گیری به عنوان بخش چهارم ارائه خواهد شد.

پیکربندی هندسی و محاسبات و معادلات حاکم

موج تابشی در پیکربندی مورد بررسی، یک موج گاووسی می‌باشد که مطابق با شکل ۱ در سیستم مختصات دکارتی O_Guvw فرض می‌شود. O_G در مرکز کمره پرتو قرار دارد و محور O_Gw پرتو است. این موج در یک نانوکرهای پلاسمایی که به صورت یک محیط خطی، ایزوتروپیک، غیرجاذب با گذرهای ϵ و تراوایی μ در نظر گرفته می‌شود، انتشار می‌یابد. مرکز نانوکره در نقطه O_P سیستم مختصات دکارتی O_{pxyz} است. مختصات O_G در سیستم $(O_{pxyz}, (x_0, y_0, z_0))$ می‌باشد. پرتو در امتداد مثبت w انتشار می‌یابد و مؤلفه میدان الکتریکی در صفحه (uO_Gw) در حال ارتعاش است.

$g_{n,TE}^{'''}$ ضرایب شکل پرتو نامیده می‌شوند و تنها به ساختار پرتو تحت مطالعه با شکل دلخواه بستگی دارند.

از سوی دیگر، برای پلاسمای پلیمری در تقریب گازی، که در آن متوسط انرژی پتانسیل ذرات از میانگین انرژی جنبشی آن‌ها کوچک‌تر باشد و یا متوسط فاصله ذرات باردار در پلاسمای کمتر از طول دبای باشد، پلاسمای مانند یک گاز ایده‌آل رفتار می‌کند که در آن:

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} = \frac{3}{2} K_B N_e \frac{dT}{dt} \quad (10)$$

که در آن N_e تعداد الکترون‌ها در پلاسمای پلیمری و $\frac{dT}{dt}$ نرخ تغییرات دمای پلاسمای پلیمری است. با توجه به معادله (۲)، نرخ تغییر دمای پلاسمای پلیمری در اثر برهم‌کنش امواج با پلاسمای پلیمری بدست می‌آید:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{-4\epsilon_0^2 \omega_p^2 V}{3K_B N_e (\omega^2 + \nu^2)} \times \int_0^{r(\text{radius})} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} r^2 \sin\theta dr d\theta d\varphi [E_r^* E_r + E_\theta^* E_\theta + E_\varphi^* E_\varphi] \quad (11)$$

نتایج عددی

در این مقاله، نمودارهای نرخ رشد دما در نانوکرات پلاسمایی با شعاع‌های ۸۰, ۹۰, ۱۰۰ nm مورد بررسی قرار می‌گیرند. نانوکره در مرکز یک سیستم مختصات کروی با مرکز O_p واقع شده است. ابتدا پرتو گاوسی با طول موج 100\AA و شعاع کمره پرتو $1\mu\text{m}$ در محیط متشر می‌گردد. لیزر مورد استفاده در این مقاله، لیزر الکترون آزاد با توان 100 mw می‌باشد. مختصات O_G در سیستم مختصات کروی متصل به نانوکره به صورت $(0, 0, 500\text{nm})$ فرض می‌شود. شکل ۲ منحنی تغییرات نرخ رشد دما را نسبت به دمای الکترونها نمایش می‌دهد. چنان‌که مشاهده می‌گردد با افزایش دما، نرخ رشد دما هم بزرگتر می‌شود و هر چه شعاع بزرگتر باشد، میزان تغییرات دما نسبت به زمان بیشتر است.

شکل ۳ اثر تغییر z_0 یعنی فاصله بین O_G در سیستم مختصات دکارتی متصل به پرتو و O_p در سیستم مختصات دکارتی متصل به ذره را بر نرخ رشد دما نشان می‌دهد که با افزایش z_0 ، نرخ رشد دما افزایش یافته است. چنان‌که مشاهده می‌گردد میزان تغییرات دما برای شعاع 80 nm کوچک‌تر و برای شعاع 100 nm بزرگ‌تر می‌باشد.

جرم الکترون، تراکم پلاسمای پلیمری و گذردهی دیالکتریک در خلاصه استند.

اکنون آنچه حائز اهمیت می‌باشد یافتن میدان‌های الکتریکی داخل نانوکره پلاسمایی است. به این منظور، از نظریه‌ی تعمیم یافته‌ی لورنتس - مای (*GLMTs*) استفاده گردید. این نظریه‌ی جهت تعیین اندرکنش بین پرتوهای الکترومغناطیسی با شکل دلخواه و ذرات منظم کاربرد دارد که با استفاده از روش بروموجیک بنا نهاده شده است [۱۰]. در نتیجه، میدان‌های الکتریکی در داخل کره پلاسمایی به این ترتیب حاصل می‌شوند:

$$E_r = k E_0 \sum_{n=1}^{n_{\max}} \sum_{m=-n}^n c_n^{pw} C_n^m \times [\psi_n''(k_{sp}r) + \psi_n(k_{sp}r)] P_n^{|m|}(\cos\theta) \exp(im\varphi) \quad (4)$$

$$E_\theta = \frac{E_0}{r} \frac{k}{k_{sp}} \sum_{n=1}^{n_{\max}} \sum_{m=-n}^n c_n^{pw} \exp(im\varphi) \times \left\{ C_n^m \psi'_n(k_{sp}r) \tau_n^{|m|}(\cos\theta) + \frac{\mu_{sp}}{\mu} \frac{k}{k_{sp}} m D_n^m \psi_n(k_{sp}r) \pi_n^{|m|}(\cos\theta) \right\} \quad (5)$$

$$E_\varphi = \frac{i E_0}{r} \frac{k}{k_{sp}} \sum_{n=1}^{n_{\max}} \sum_{m=-n}^n c_n^{pw} \exp(im\varphi) \times \left\{ m C_n^m \psi'_n(k_{sp}r) \pi_n^{|m|}(\cos\theta) + \frac{\mu_{sp}}{\mu} \frac{k}{k_{sp}} D_n^m \psi_n(k_{sp}r) \tau_n^{|m|}(\cos\theta) \right\} \quad (6)$$

که در آن E_0 دامنه‌ی میدان، k و k_{sp} به ترتیب عدد موج فضای آزاد و ماده‌ی داخل کره، μ و μ_{sp} به ترتیب ضرایب تراوایی فضای آزاد و ماده‌ی داخل کره، ψ_n تابع ریکاتی - بسل و $(x)_n$ و $\psi_n''(x)$ مشتقات اول و دوم ψ_n نسبت به آرگومان داخل پرانتر، $P_n^{|m|}$ تابع لزاندر وابسته می‌باشند. ضرایب c_n^{pw} و همچنین $\tau_n^m(\cos\theta)$ و $\pi_n^m(\cos\theta)$ نیز بدین صورت تعریف می‌شوند:

$$c_n^{pw} = \frac{1}{ik} (-i)^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad \text{and} \quad -n < m < n \quad (7)$$

$$\tau_n^m(\cos\theta) = \frac{d}{d\theta} P_n^m(\cos\theta) \quad (8)$$

$$\pi_n^m(\cos\theta) = \frac{P_n^m(\cos\theta)}{\sin\theta} \quad (9)$$

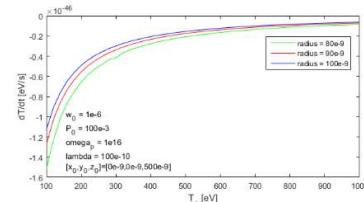
C_n^m , D_n^m ضرایب مجھولی از $g_{n,TE}^{wm}$ و $g_{n,TM}^{wm}$ ها هستند که با اعمال شرایط مرزی روی سطح کره محاسبه می‌گردند. ضرایب $g_{n,TM}^{wm}$ و

در این راستا، شدت میدان الکتریکی داخل نانوکره پلاسمایی محاسبه شد و نمودارهای تغییرات دما نسبت به زمان در آن بر حسب دمای الکترون‌ها، فاصله مرکز نانوکره پلاسمایی از محل تابش لیزر در راستای محور سه فرکانس پلاسمایی و طول موج تابشی ارائه گردید. چنان‌که ملاحظه شد می‌توان با تابش لیزر به نانوکره پلاسمایی، دمای آن را کاهش داد. در این حالت، ذرات در محیط پلاسمایی گرمایشی و انرژی جنبشی خود را به امواج پراکنده شده در فضای خارج از محیط پلاسمایی داده در نتیجه میدان‌های الکترومغناطیسی در فضای بیرون قوی‌تر می‌گردند. بنابراین سرد شدن گی محیط پلاسمایی مشاهده گردید.

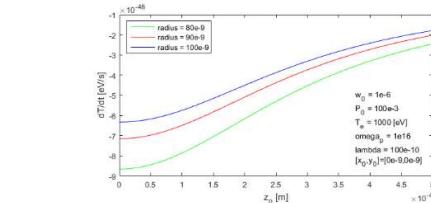
منابع

- [۱] Huang H. et. al. (2020). Recent Advances on the Model, Measurement Technique, and Application of Single Cell Mechanics. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(17), 6248.
- [۲] Amiri, I. S., Ali, J. (2013). Nano Optical Tweezers Generation Used for Heat Surgery of a Human Tissue Cancer Cells Using Add/Drop Interferometer System. *Quantum Matter*, 2(6), 489-493(5).
- [۳] Tan Y., Leung A. Y.H., Wang K., ; Fung T., Sun D. (2011). Optical Tweezer Technology. *IEEE Nanotechnology Magazine*, 5(1),17-21.
- [۴] Hong-Lian G. et. al. (2004). Mechanical Properties of Breast Cancer Cell Membrane Studied with Optical Tweezers. *Chinese Physics Letters*, 21(12), 2543.
- [۵] Rukhadze A. A., Alexandrov A. F., Bogdankevich L. S. (2013). Principles of Plasma Electrodynamics, 2nd Edition. Moscow: Urss.
- [۶] Nicholas A.K. (1973). Principles of Plasma Physics. McGraw-Hill.
- [۷] Golant V.E., Zhilinsky A.P., Sakharov I.E., Brown S. C. (1980). editor of the English language ed.; translated from the Russian by K.Z. Vedenyeva and V.F. Agranat, Fundamentals of plasma physics, New York, J. Wiley
- [۸] Akhiezer A.I. (2013). Plasma Electrodynamics: Linear Theory. Pergamon.
- [۹] Kazakov Y., Eester D. V., Ongena J. (2015). Plasma heating in present-day and future fusion machines. 12th Carolus Magnus Summer School on Plasma and Fusion Energy Physics.
- [۱۰] Gouesbet G., Gréhan G. (2011). *Generalized Lorenz-Mie Theories*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

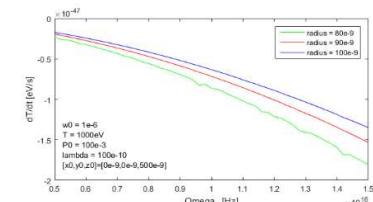
شکل ۴ منحنی نرخ رشد دما نسبت به فرکانس پلاسمایی و تأثیر تغییر شعاع کره را نمایش می‌دهد. برای شعاع‌های مورد بررسی، با افزایش فرکانس پلاسمایی، نرخ تغییرات دما روند کاهشی دارد و برای نانوکره با شعاع nm 80 این شب دمای روند نزولی تری دارد. شکل ۵ تأثیر تغییر طول موج پرتو گاوسی تابشی بر منحنی نرخ رشد دما را نمایش می‌دهد. با افزایش طول موج، میزان تغییرات دما به زمان منفی‌تر می‌شود. همچنین ملاحظه می‌شود که در محدوده طول موجی مورد نظر، شب دما با کاهش شعاع نانوکره پلاسمایی، کاهش می‌یابد.



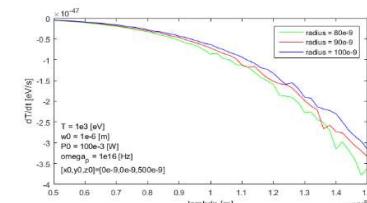
شکل ۲. نرخ رشد دما نسبت به دمای الکترونها



شکل ۳. نرخ رشد دما نسبت به فاصله مرکز نانوکره پلاسمایی از محل تابش لیزر در راستای محور z



شکل ۴. نرخ رشد دما نسبت به فرکانس پلاسمایی



شکل ۵. نرخ رشد دما نسبت به طول موج تابشی

نتیجه‌گیری

در این مقاله، نرخ تغییر دمای نانوکره پلاسمایی در اثر برهم-کنش پرتوی لیزر با پروفایل گاوسی با آن مورد بررسی قرار گرفت.