بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۶-۱۵ بهمن ۱۳۹۸

بررسی قطر کمر باریکه لیزر در پلاسمای الکترون –حفره

داود، کلهر[۱]؛ مجتبی، هاشم زاده[۲]

[۱]دانشکده فیزیک، دانشگاه دامغان، دامغان

[۲]دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

[1]Kalhor@du.ac.ir, [2]Hashemzade@gmail.com

چکیده – در این مقاله، قطر کمر باریکه لیزر با قطبش خطی با پلا سمایی از نانوذرات نیم ر سانا شامل الکترون و حفره مورد برر سی قرار می‌گیرد. باریکه لیزر با پروفایل گاو سی در نظر گرفته شده ا ست. با در نظر گرفتن نظریه اختلال و یک روش ا ستاندارد، معادله قطر کمر باریکه لیزر به دست آمد و جواب‌های آن به صورت تحلیلی مطالعه شد. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش چگالی حامل‌ها، قطر کمر باریکه لیزر کم می شود.

کلید واژه- قطر کمر ، باریکه لیزر، الکترون، حفره، نیم‌رسانا

Investigation of Beam Waist of Laser in Electron-Hole Plasma

Davood, Kalhor[1]; Mojtaba, Hashemzadeh[2]

School of Physics, University of Damghan, Damghan

Faculty of Physics, Sharood University of Technology, Sharood

Abstract- In this paper, the beam waist of laser with linear polarization is investigated by electron hole semiconductor nanoparticles plasma. Laser beam is assumed to be with Gaussian profile. Considering the perturbation theory and a standard method, the beam waist equation is obtained and their answers are studied analytically. Calculations show that as the carrier density increases, the laser beam waist diameter decreases.

Keywords: Beam Waist, Laser Beam, Electron, Hole, Semiconductor

مقدمه

مطالعه نانو ذرات به دلیل رفتار غیرخطی فلزات در نواحی فرکانسی تشدید پلاسمونی، همواره مورد توجه محققین بوده است [۱]. برهم‌کنش پرتو لیزر پرشدت با پلاسما منجر به اثرات غیرخطی فراوانی می‌شود. برخی از این اثرات عبارتند از خودکانونی، نیروی پاندروموتیو، تغییر در چگالی پلاسما و... [۲-۵]. باید در نظر داشت که خود کانونی به علت تغییر غیرخطی در ضریب شکست پلاسما در برهم-کنش آن با باریکه لیزر به وجود می‌آید [۶و۵]. بررسی پدیده خودکانونی در نیمه هادی‌ها یکی از مباحث جالب و در عین حال جدید می‌باشد. این مطلب که نیمه هادی‌ها را می‌توان به عنوان پلاسما در نظر گرفت و به وسیله آن برخی از پدیده‌ها را توصیف کرد، بسیار حائز اهمیت است. در این مقاله برهم‌کنش پرتو لیزر با قطبش خطی با نانو ذرات نیم رسانا مورد بررسی قرار گرفته است. با درنظر گرفتن تاثیر چگالی حامل‌ها بر پدیده خودکانونی، چند چگالی مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است.

معادلات اصلی

انتشار یک پرتو لیزر در راستای محور z داخل پلاسمای شامل نانوذرات الکترون-حفره را در نظر بگیرید. شعاع نانوذرات r_c و چگالی آنها N و پارامتر شبکه d می باشد. در شرایط تعادلی چگالی الکترون و حفره نانوذرات n_{0e} و n_{0h} در نظر گرفته می‌شود. یون‌ها به علت سنگینی ساکن فرض شده و تحت تاثیر امواج الکترومغناطیسی باریکه لیزر حرکت نمی‌کنند و تنها ابر الکترونی و حفره‌ی نانوذرات با میدان-های الکترومغناطیسی ناشی از پرتو لیزر برهم‌کنش دارند. در این مقاله از روش اختلالی برای محاسبات استفاده شده و کمیت‌های فیزیکی به صورت $x= x_0+ x_1+ x_2$ در نظر گرفته می‌شود. میدان الکتریکی لیزر را به صورت زیر در نظر بگیرید:

$$\vec{E}_L = \vec{E}^{(1)} = \hat{E}\hat{x}\cos\varphi \qquad (۱)$$

در اینجا $\varphi = (kz - \omega t)$ فاز موج، Ê دامنه میدان الکتریکی و ω و k به ترتیب بسامد و عدد موج پرتو لیزر می‌باشد. درضمن، قطبش لیزر نیز خطی است. در رابطه (۱) اندیس بالا بصورت (۱) اختلال مرتبه اول را نمایش می‌دهد. با استفاده از معادله القای فارادی مولفه میدان مغناطیسی به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\vec{B}_L = \vec{B}^{(1)} = \frac{kc}{\omega}\hat{B}\hat{y}\cos\varphi \qquad (۲)$$

معادله‌ای که برهم‌کنش میدان‌های الکترومغناطیسی پرتو لیزر با حامل‌های بار الکتریکی را توصیف می‌کند به صورت زیر است [۳]

$$\frac{d\vec{V}}{dt} + \frac{\omega_{pe,h}^2}{3}\vec{r} = \mp\frac{e}{m_{e,h}}\{\vec{E}(0) + (\vec{r}.\vec{\nabla})\vec{E}(0) + \frac{1}{c}\vec{V}\times[\vec{B}(0) + (\vec{r}.\vec{\nabla})\vec{B}(0)]\} \qquad (۳)$$

در اینجا $\vec{V}$ سرعت حامل‌ها، $\vec{r}$، e و $m_{e,h}$ به ترتیب بردار جابجایی حامل‌ها از حالت تعادل، اندازه بار الکتریکی و جرم الکترون و حفره و $\omega_{pe,h}^2 = 4\pi n_{0e,h}e^2/m_{e,h}$ فرکانس پلاسمایی است. $\vec{E}(0)$ و $\vec{B}(0)$ مقادیر میدان‌های الکترومغناطیسی در مرکز توزیع حامل بار الکتریکی می‌باشند. در رابطه (۳) عبارت $(\omega_{pe,h}^2/3)\vec{r}$ نیروی بازگرداننده القایی حامل‌های بار الکتریکی نسبت به نقطه تعادل آن‌ها است. اکنون برای حل معادله (۳) برای کمیت-های $\vec{V}$ و $\vec{r}$ از روش اختلالی استفاده می‌کنیم. با در نظر گرفتن اختلال مرتبه اول، معادله (۳) به صورت زیر ساده می‌شود.

$$\frac{dV_x^{(1)}}{dt} + \omega_{e,h}^2 x^{(1)} = \mp\frac{e}{m_{e,h}}\hat{E}\cos(\varphi) \qquad (۴)$$

که $\omega_{pe,h}^2/3 = \omega_{e,h}^2$. با توجه به اینکه $V_x^{(1)} = dx_x^{(1)}/dt$، پس $V_x^{(1)}, x_x^{(1)}$ به راحتی و با اندکی محاسبات ساده بدست می‌آیند. از طرفی با در نظر گرفتن اختلال مرتبه دوم، معادله (۳) بصورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{d\vec{V}^{(2)}}{dt} + \omega_{e,h}^2\vec{r}^{(2)} = \pm\frac{e}{m_{e,h}c}\vec{V}^{(1)}\times\vec{B}^{(1)}(0) \qquad (۵)$$

که مولفه z سرعت به صورت زیر به دست می‌آید.

$$V_{ze,h}^{(2)} = \frac{\mp a^2c^2k\omega^3}{(\omega^2 - \omega_{e,h}^2)(4\omega^2 - \omega_{e,h}^2)}\cos(2\varphi) \qquad (۶)$$

معادله (۶) سرعت حامل‌های بار الکتریکی در جهت z را

توصیف می‌کند که از دیدگاه ماکروسکوپی چنین سرعتی می‌تواند یک چگالی الکترون و حفره را ایجاد کند. برای دستیابی به چگالی مرتبه دوم، از معادله پیوستگی برای الکترون‌ها و حفره‌ها شروع می‌کنیم:

$$\frac{4\pi l}{3}\left(\frac{\partial n_{e,h}^{(2)}}{\partial t}+n_{0e,h}\vec{\nabla}.\vec{V}_{e,h}^{(2)}\right)=0 \qquad (۷)$$

که در رابطه بالا $l=(r_c/d)^3$ است. با جایگذاری $V_{ze,h}^{(2)}$ از رابطه ۶ در رابطه ۷، $n_{e,h}^{(2)}$ به صورت زیر به دست می‌آید.

$$n_{e,h}^{(2)}=\frac{-a^2c^2k^2\omega^2}{(\omega^2-\omega_{e,h}^2)(4\omega^2-\omega_{e,h}^2)}n_{0e,h}\cos(2\varphi) \qquad (۸)$$

برای قطبش خطی باریکه لیزر، این چگالی منجر به تولید یک میدان الکتریکی بار-فضای مرتبه دوم می شود که با استفاده از معادله پواسون $\vec{\nabla}.\vec{E}^{(2)}=-4\pi e(n_e^{(2)}-n_h^{(2)})$ به دست می‌آید.

$$E_z^{(2)}=\frac{\pm 2\pi e a^2 k c^2\omega^2 n_{0e,h}}{(\omega^2-\omega_{e,h}^2)(4\omega^2-\omega_{e,h}^2)}\sin(2\varphi) \qquad (۹)$$

به طور مشابه مولفه‌های مرتبه سوم مکان و سرعت نیز به صورت زیر می‌باشد.

$$\vec{r}_{e,h}^{(3)}=\frac{-a^3c\omega^7}{2(\omega^2-\omega_{e,h}^2)^4}\hat{x}\cos(\varphi) \qquad (۱۰)$$

$$\vec{V}_{e,h}^{(3)}=\frac{\pm a^3c\omega^8}{2(\omega^2-\omega_{e,h}^2)^4}\left[\hat{x}\sin(\varphi)\right] \qquad (۱۱)$$

با ترکیب معادلات ماکسول، معادله موج به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\nabla^2E-\vec{\nabla}(\vec{\nabla}.\vec{E})=\frac{4\pi}{c^2}\frac{\partial\vec{J}}{\partial t}+\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2} \qquad (۱۲)$$

که چگالی جریان $\vec{J}=\vec{J}_e+\vec{J}_h$ بصورت زیر است:

$$\vec{J}_{e,h}=\mp\left(\frac{4\pi e l}{3}\right)\left(n_{0e,h}+n_{e,h}^{(2)}\right)\left(\vec{V}_{e,h}^{(1)}+\vec{V}_{e,h}^{(2)}+\vec{V}_{e,h}^{(2)}\right) \qquad (۱۳)$$

با استفاده از روش استاندارد شناخته شده بسط وابسته چشمه (SDE)، می توانیم معادلات فوق را حل می‌کنیم. روش فوق الذکر بدین صورت است که دامنه بهنجار شده را به صورت زیر در نظر می‌گیریم [۳]:

$$a(r,z)=\sum_m\hat{a}_mL_m(\chi)\exp(-(1-i\alpha_s)\chi/2),m=0,1,2 \qquad (۱۴)$$

که $\hat{a}_m(z)$ دامنه میدان مختلط بهنجار شده، $\chi=2r^2/r_s^2$، $r_s(z)$ قطر کمر باریکه، $\alpha_s(z)=kr_s^2/2R_c$ ، R_c شعاع انحنای جبهه موج، $L_m(\chi)$ چند جمله‌ای‌های لاگر از مرتبه m است. با فرض آن‌که $\hat{a}_0=a_s\exp(i\theta_s)$ و با جداسازی قسمت‌های حقیقی و موهومی، معادله زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial^2 r_s}{\partial z^2}=\frac{4}{k^2r_s^3}\left[1-\frac{a^2r_0^2}{8}\left(k_{pe}^2N_{Le}+k_{ph}^2N_{Lh}\right)\right] \qquad (۱۵)$$

که $k_{pe,h}=\sqrt{4\pi/3}(\omega_{pe,h}/c)$ و

$$N_{Le,h}=\frac{3l\omega^4}{4(\omega^2-\omega_{pe,h}^2)^2}\left[\frac{\omega^4}{2(\omega^2-\omega_{pe,h}^2)}-\frac{k^2c^2}{4(\omega^2-\omega_{pe,h}^2)}\right] \qquad (۱۶)$$

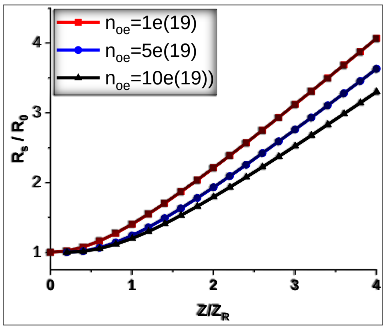
با حل معادله (۱۵)، قطر کمر باریکه به صورت تابعی از z به دست می‌آید:

$$\left(\frac{r_s}{r_0}\right)^2=1+\left(1-\frac{P}{P_{ce}}-\frac{P}{P_{ch}}\right)\frac{z^2}{z_R^2} \qquad (۱۷)$$

در رابطه بالا $P_{ce,h}$ به صورت $P_{ce,h}=2\pi^2c^5m_{e,h}^2/k_{pe,h}^2\lambda^2e^2N_{Le,h}$ و $P/P_{ce,h}=k_{pe,h}^2a_0^2r_0^2N_{Le,h}/8$ است.

تحلیل عددی

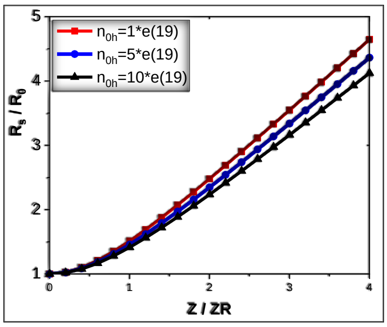
با رسم معادله (۱۷)، قطر کمر باریکه برحسب z به دست می‌آید. به همین منظور لیزری با شدتی در حدود $10^{17}W/cm^2$ $(a_0=0.271)$ در نظر می‌گیریم. همچنین قطر نانو ذرات ۳۰ نانومتر، ثابت شبکه ۶۰ نانومتر و قطر بهنجارشده لکه پرتو لیزر واحد فرض شده است.



شکل۱ تغییرات قطر نسبی کمر باریکه لیزر برحسب فاصله نسبی برای چند چگالی مختلف الکترون برای نانو ذرات نیم‌رسانا

در شکل (۱) تغییرات نسبی قطر کمر باریکه لیزر (نسبت به قطر اولیه آن) بر حسب فاصله بدون بعد z/z_R رسم شده است. در این شکل تغییرات نسبی قطر کمر باریکه لیزر برای

چگالی الکترون $n_{0e}=1\times10^{20},5\times10^{19},1\times10^{19}cm^{-3}$ در نظر گرفته شده است. همچنین چگالی حفره $n_{0h}=1\times10^{19}cm^{-3}$ در نظر گرفته شده است. نمودار نشان می‌دهد که با افزایش چگالی الکترونی اثر خودکانونی افزایش می‌یابد.



شکل ۲ تغییرات قطر نسبی کمر باریکه لیزر برحسب فاصله نسبی برای چند چگالی مختلف حفره‌ها برای نانو ذرات نیم رسانا

همانگونه که از معادله (۱۵) دیده می‌شود این معادله یک معادله غیرخطی است. در پدیده‌های خطی (که غالبا از معادلات خطی به دست می‌آید)، پارامترهای فیزیکی مانند چگالی تاثیری روی دامنه موج ندارند و تنها باعث تغییر نوسانات میدان می‌شوند. با توجه به معادله (۸)، با افزایش چگالی اولیه، مقدار چگالی (غیرخطی) مرتبه دوم دستشخوش تغییر می‌شود. از طرفی با توجه به معادله موج، تغییر چگالی غیر خطی منجر به تغییر بر روی میدان الکتریکی می‌شود از آنجایی که چگالی مرتبه دوم خود وابسته به شدت است، دوباره تغییر کرده و به همین صورت این دور ادامه خواهد داشت. نتیجه نهایی این که قطر کمر باریکه لیزر کاهش می‌یابد و در نتیجه پدیده خودکانونی راحت‌تر انجام می‌شود. همچنین در شکل (۲) تغییرات نسبی قطر کمر باریکه لیزر بر حسب فاصله بدون بعد z/z_R رسم شده است. در شکل (۲) چگالی حفره‌ها برابر با $n_{0h}=1\times10^{20},5\times10^{19},1\times10^{19}cm^{-3}$ می‌باشد. این نمودار نیز نشان می‌دهد که با افزایش چگالی حفره‌ها اثر خودکانونی افزایش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان از نسبت $P/P_{ce,h}$ به دست آورد. با افزایش چگالی حفره‌ها، $k_{pe,h}$ نیز افزایش یافته و در نتیجه $N_{Le,h}$ کاهش می‌یابد. چون $k_p\propto\omega_p^2$ و $N_L\propto1/\left(\omega^2-\omega_p^2\right)^3$، پس کمیت N_L غالب بوده و در نتیجه $P/P_{ce,h}$ کاهش می‌یابد. این بدان معناست که باید از توان یا شدت بالاتری استفاده کنیم تا بتوانیم پدیده خودکانونی را مشاهده کنیم. نتایج تجربی پدیده خودکانونی نیز موید این مهم است که با افزایش شدت پرتو لیزر خودکانونی افزایش می‌یابد [۵]. با توجه به روابط (۱۵-۱۷)، چون چگالی و شدت پرتو لیزر رفتار مشابه هستند (افزایش در این دو پارامتر نتیجه یکسانی به دست می‌آورد) نتیجه می‌گیریم که کار تجربی این نتایج را تایید می‌کنند.

نتیجه گیری

در این پژوهش، برهم‌کنش پرتو لیزر با پلاسمایی شامل الکترون - حفره مطالعه شده است. تغییرات قطر کمر پرتو لیزر با قطبش خطی با پلاسمایی از نانو ذرات نیم‌رسانا مورد بررسی قرار گرفته است. پرتو لیزر با پروفایل گاوسی در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن اختلال و یک روش استاندارد (SDE)، معادله قطر کمر باریکه لیزر به دست آمده و جواب‌های آن به صورت تحلیلی مطالعه شده است. نمودار قطر کمر باریکه لیزر برای مقادیر مختلف چگالی الکترون و حفره رسم شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش چگالی حامل‌های بار، قطر کمر باریکه لیزر کم می‌شود.

مرجع‌ها

[1] M. S. Sodha and S. C. Kaushik, “Self-Focusing of Electromagnetic Waves in a Degenerate Electron-Hole Plasma”, Appl. Phys., Vol. 3, pp. 141-148, 1974.

[2] M. Hashemzadeh, “Self-focusing and defocusing of Gaussian laser beams in collisional inhomogeneous plasmas with linear density and temperature ramps”, Phys. Plasmas, Vol. 25, pp. 012309, 2018.

[3] N. Sepehri Javan, “Self-focusing of an intense laser pulse interacting with a periodic lattice of metallic nanoparticle”, Phys. Plasmas, Vol. 22, pp. 093116, 2015.

[4] P. Qi, L. Zhang, L. Lin, N. Zhang, Y. Wang, W. Liu, “Critical power for self-focusing of optical beam in absorbing media”, Laser Laser Phys. Vol. 28, pp. 045407, 2018.

[5] Y. Choi, J. H. Park, M. R. Kim, and W. Jhe, “Direct observation of self-focusing near the diffraction limit in polycrystalline silicon film”, Appl. Phys. Lett., Vol. 78, pp. 856-858, 2001.