



بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه ۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز



افزایش گستره دمایی خودکانونی نسبیتی پرتو لیزر با استفاده از پلاسما با چگالی بالارونده

بنت الهدی بکائی^۱، محمد رضا جعفری میلانی^۲ و علیرضا نیکنام^۱

^۱ پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

^۲ پژوهشکده فیزیک پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران

چکیده - در این کار انتشار باریکه لیزری گاوسی در پلاسماهای غیر برخورداردی با تابع چگالی بالارونده در حضور اثرات غیر خطی نسبیتی و پاندروموتیو مورد مطالعه قرار گرفته است. خودکانونی و واکانونی حرارتی پرتو لیزر در پلاسماهای غیر برخورداردی و در رژیم پخش دوقطبی، در دمای الکترونی $10-160 \text{ keV}$ بررسی شده است. معادله خودکانونی پرتو به صورت عددی حل شده و اثر چگالی بالارونده بر بازه دمایی خودکانونی پرتو لیزر مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از چگالی بالارونده باعث افزایش بازه دمایی خودکانونی شده و افزایش شیب چگالی بالارونده پلاسما، این گستره را وسیع تر می‌نماید. هم چنین نتایج حاکی از آن است که تابع چگالی بالارونده بر نقطه بازگشتی دمایی اثری ندارد و مقدار دمایی این نقطه در حالت استفاده از پلاسما با چگالی بالارونده در قیاس با پلاسماهای همگن تغییری نمی‌کند.

کلید واژه - خودکانونی حرارتی، پلاسماهای ضعیف نسبیتی، نیروی پاندروموتیو، چگالی بالارونده پلاسما

Increasing the temperature interval of relativistic self focusing of a laser beam by using an upward plasma-density ramp

Bentolhoda Bokaei¹, Mohamad Reza Jafari Milani², Ali Reza Niknam¹

¹ Laser and Plasma Research Institute, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran

² NSRT, Tehran, Iran

Abstract- In this work, the propagation characteristics of Gaussian laser beam in upward plasma-density ramp are investigated by considering the ponderomotive and relativistic nonlinearities. The thermal self-focusing and defocusing of a laser beam are studied in ambipolar diffusion regime and in the 10-160 keV electron temperature interval. The second-order differential equation of dimensionless beam width parameter is solved numerically, taking into account the effect of plasma-density ramp. Our results show that the self-focusing temperature interval will be wider by using the upward plasma-density ramp and higher slope value of density-ramp results in wider temperature interval. In addition, the results represent that the plasma density-ramp cannot influence on the existence of a "turning point temperature" and its numerical value in comparison to homogeneous plasma density.

Keywords: Thermal self focusing, weakly relativistic plasma, ponderomotive force, plasma-density ramp

۱- مقدمه

انتشار نور لیزر در پلاسما در دهه های اخیر به دلیل کاربرد فراوان آن در همجواری هسته‌ای، تولید هارمونیکهای بالا، لیزر اشعه ایکس و شتابدهنده‌های پلاسمایی نظر بسیاری از محققین را به خود جلب کرده است [1,2]. در تمامی این کاربردها لازم است که پرتو لیزر به اندازه چندین برابر طول ریلی در پلاسما انتشار پیدا کند و این در حالی است که پرتو لیزر در حالت معمول پس از یک طول ریلی شدت خود را از دست می‌دهد. بنابراین بررسی هدایت نوری در پلاسما و عوامل موثر بر شدت آن در حضور اثرات غیر خطی از اهمیت فراوانی برخوردار است [3]. مهمترین این اثرات در شدتهای بالا اثرهای غیر خطی نسبتی و پاندروموتیو است. در واقع با بالا رفتن شدت سرعت نوسان الکترونها به سرعت نور نزدیک می‌شود. در این حالت تصحیحات نسبیتی جرم الکترون، موجب کاهش فرکانس موثر پلاسما و در نتیجه افزایش ضریب دی الکتریک پلاسما در مرکز پرتو نسبت به لبه‌ها خواهد شد. از طرفی با افزایش شدت اثر ترمهای غیرخطی معادله ممنتوم، موسوم به نیروی پاندروموتیو، مشهود می‌شود. این نیرو متناسب و خلاف جهت گرادیان شدت پرتو بوده و در نتیجه باعث رانده شدن الکترون‌ها از مرکز پرتو و افزایش ضریب شکست محیط در ناحیه مرکزی می‌شود. با این دو اثر غیر خطی، پلاسما مانند عدسی عمل می‌کند و پرتو را کانونی کرده و موجبات هدایت نوری در پلاسما را تا فواصلی بیشتر از طول ریلی فراهم می‌کند. در کار گذشته [4]، ما نشان دادیم که در رژیم پخش دوقطبی و برای پلاسما با چگالی ثابت، پرتو لیزر باشدت و فرکانس ثابت، بسته به چگالی اولیه پلاسما، فقط در گستره‌ای از دما متحمل پدیده خودکانونی می‌شود. همچنین دیده شد که در این گستره پدیده خودکانونی در قبال دما رفتاری دوگانه دارد. در واقع در این گستره نقطه‌ای موسوم به نقطه بازگشتی دما مشاهده شد که قبل از این نقطه اثر خودکانونی با افزایش دما تقویت و پس از این نقطه با افزایش دما تضعیف می‌گردد. در این مقاله اثر استفاده از پلاسما با چگالی بالا رونده بر گستره دمایی خودکانونی پرتو لیزر در رژیم پخش دوقطبی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.

۲- معادلات اساسی

یک پرتو گاوسی به طور عمودی بر یک بره پلاسما فرود می‌آید. در این صورت نیروی پاندروموتیو آن باعث رانده شدن الکترونها از مرکز خواهد شد.

$$F_p = -m_0 c^2 \nabla(\gamma - 1) \quad (1)$$

در رژیم پخش دو قطبی و در حالت مانا این نیرو با گرادیان فشار الکترونها خنثی شده و تابع چگالی پلاسما به شکل زیر بدست می‌آید [4].

$$n = n_0 \exp\left[-\frac{m_0 c^2}{T_e} (\sqrt{1+|A|^2} - 1)\right] \quad (2)$$

$$A^2 = \frac{A_{00}^2}{f^2} \exp\left(-\frac{r^2}{n_0^2 f^2}\right) \quad (3)$$

که در آن A^2 شدت نرمال شده پرتو بر اساس شدت نرمال شده اولیه لیزر (A_{00}^2) و فاکتور بدون بعد پهنای پرتو (f) می‌باشد. از طرفی تابع دی الکتریک در یک پلاسما سرد غیر برخورداری به صورت زیر است.

$$\varepsilon = 1 - \frac{\omega_{p0}^2(z) n}{\gamma \omega^2 n_0} \quad (4)$$

که در آن $\gamma = \sqrt{1+A^2}$ فاکتور نسبیتی لورنتس می‌باشد. با جایگذاری چگالی از معادله (۲) در (۴) و بسط ضریب دی الکتریک حول r^2 در تقریب پیرا محوری ($r^2 \ll n_0^2 f^2$) خواهیم داشت:

$$\varepsilon_{r0}(z) = 1 - \frac{\omega_{p0}^2(z)}{\omega^2 \sqrt{1 + \frac{A_{00}^2}{f^2}}} \exp\left[-\frac{m_0 c^2}{T_e} \left(\sqrt{1 + \frac{A_{00}^2}{f^2}} - 1\right)\right] \quad (5)$$

$$\varepsilon_{r2}(z) = \frac{A_{00}^2 \omega_{pe0}^2(z)}{f^4 \omega^2} \exp\left[-\frac{m_0 c^2}{T_e} \left(\sqrt{1 + \frac{A_{00}^2}{f^2}} - 1\right)\right] \times \left[\frac{m_0 c^2}{2T_e \left(1 + \frac{A_{00}^2}{f^2}\right)} + \frac{1}{2\left(1 + \frac{A_{00}^2}{f^2}\right)^{3/2}} \right] \quad (6)$$

برای بررسی تحول اندازه لکه، میدان الکتریکی داخل پلاسما را به صورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$E = A(r, z) \exp(i\omega t - \int ik(z) dz) \quad (7)$$

$$k(z) = \frac{\sqrt{\varepsilon_{r0}(z)} \omega}{c} \quad (8)$$

معادله با روش رانگ کوتا مرتبه چهار حل شده است. موج را در ابتدا تخت می‌گیریم، در نتیجه شرایط مرزی برای چنین موجی در $\xi = 0$ ، به صورت $f = 1$ و $df/d\xi = 0$ می‌باشد. فرکانس لیزر $\nu = 3.75 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ، شدت نرمال شده اولیه لیزر $A_{00}^2 = 0.15$ و چگالی اولیه پلاسما $n = 2.6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ انتخاب شده است. در کار یک پلاسما به طول ثابت $L = 10 \times R_d$ و فرم چگالی بالا رونده به صورت زیر در نظر گرفته شده است [5].

$$n = n_0 \left(1 + \tan \frac{\xi}{d}\right) \quad (16)$$

در این جا مقدار d نمایانگر شیب چگالی بالا رونده است و بدیهی است که هرچه میزان آن کمتر باشد شیب چگالی بیشتر است. در شکل ۱ نمودار تغییرات پهنای لکه بر حسب طول انتشار برای دمای الکترونی ۱۰ تا ۴۰ کیلو الکترون ولت در پلاسما با شیب بالا رونده ($d=40$) ترسیم شده است. لازم به ذکر است که برای بررسی و مقایسه اثر چگالی بالا رونده، این پارامترها مانند پارامترهای مربوط به شکل‌های ۵ و ۶ کار قبل [4] (در حالت پلاسما با چگالی ثابت) انتخاب شده است. در این شکل می‌بینیم که بازه خودکانونی تقریباً از همان دمای ۲۰ کیلو الکترون ولت آغاز می‌شود و تا دمای ۴۰ کیلو الکترون ولت با افزایش دما قدرت خودکانونی بیشتر می‌شود، لیکن در شکل ۲ ملاحظه می‌شود با افزایش دما از حدود ۵۰ تا ۱۴۵ کیلو الکترون ولت، افزایش دما منجر به کاهش قدرت خودکانونی می‌شود و در حدود ۱۲۰ کیلو الکترون ولت گستره دمایی خودکانونی به انتها رسیده و بعد از این دما اثر پراش بر خودکانونی غلبه می‌کند. با مقایسه این دو شکل با شکل‌های ۵ و ۶ مرجع [4] می‌توان دریافت که با استفاده از چگالی بالا رونده هم چنان وجود گستره دمایی برای پدیده خودکانونی مشهود است. این گستره در پلاسما همگن با چگالی اولیه ذکر شده در حدود 104-20 کیلو الکترون ولت بوده [4] در حالی که در مورد پلاسما با چگالی بالا رونده، گستره دمایی تا ۱۲۵ کیلو-الکترون ولت افزایش پیدا کرده است. هم چنین با مقایسه شکل‌ها می‌توان دریافت که رفتار خودکانونی در قبال افزایش دما هنوز رفتاری دوگانه است و مقدار عددی نقطه بازگشتی دمایی در حضور و عدم حضور چگالی بالا رونده تغییری نکرده و معادل ۴۰ کیلو الکترون ولت

می‌توان دامنه مختلط $A(r,z)$ میدان را به صورت زیر نوشت.

$$A = A_0(r,z) \exp[-ik(z)S(r,z)] \quad (9)$$

$$A_0^2 = \frac{A_{00}^2}{f^2} \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2 f^2}\right) \quad (10)$$

که در این صورت تابع $A_0(r,z), k(z), S(r,z)$ تابعی حقیقی هستند و A_{00}^2 شدت نرمال شده اولیه پرتو لیزر است. با جایگذاری میدان در معادله موج با احتساب تقریب WKB و جداسازی قسمت موهومی و حقیقی معادله داریم:

$$\frac{1}{k^2 A_0} \left(\frac{\partial^2 A_0}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A_0}{\partial r} \right) - \frac{r^2}{r_0^2} \frac{\epsilon_r}{\epsilon_0} = 2 \frac{\partial S}{\partial z} + \left(\frac{\partial S}{\partial r} \right)^2 + \frac{2S}{k} \frac{\partial k}{\partial z} \quad (11)$$

$$\frac{\partial A_0^2}{\partial z} + A_0^2 \left(\frac{\partial^2 S}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial S}{\partial r} \right) + \frac{\partial A_0^2}{\partial r} \frac{\partial S}{\partial r} = A_0^2 \left(-\frac{1}{k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) \quad (12)$$

می‌توان تابع آیکونال S را حول r^2 بسط داد.

$$S(r,z) = S_{r0}(z) + r^2 S_{r2}(z) \quad (13)$$

در این صورت معادلات کوپل شده (۱۱) و (۱۲) در صورتی جواب خواهند داشت که داشته باشیم:

$$S_{r2}(z) = \frac{1}{2f} \frac{\partial f}{\partial z} \quad (14)$$

پارمتر S_{r2}^{-1} را می‌توان به شعاع انحنا پرتو نسبت داد. با جایگذاری معادله (۱۴) در (۱۱) و تساوی ضرائب r^2 در طرفین و هم چنین تغییر متغیر $\xi = z/R_d$ که در آن $R_d = r_0^2 \omega/c$ و معیار طول ریلی است، به معادله تحول اندازه لکه خواهیم رسید.

$$\epsilon_0(\xi) \frac{\partial^2 f}{\partial \xi^2} = \frac{1}{f^3} - \epsilon_r(\xi) \rho^2 f - \frac{1}{2} \frac{\partial \epsilon_0(\xi)}{\partial \xi} \frac{\partial f}{\partial \xi} \quad (15)$$

که در آن r_0 پهنای اولیه لکه لیزر و معادل $20 \mu\text{m}$ در نظر گرفته شده است.

۳- نتایج

معادله (۱۵) به معادله خودکانونی معروف است. جمله اول عبارت سمت راست این معادله معرف پراش و جمله دوم آن عامل خودکانونی شدن پرتو می‌باشد. در این کار این

است.

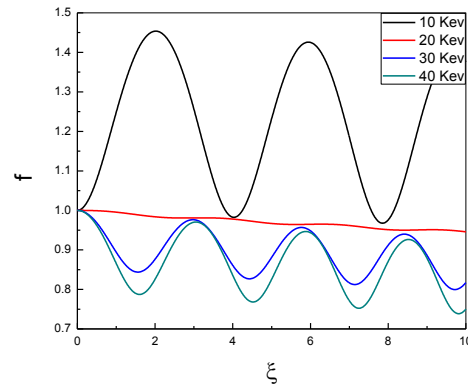
الکترون ولت بالاتر رفته است که این امر نشان می دهد که با افزایش شیب چگالی بالارونده پلاسما، می توان گستره دمایی خودکانونی را وسیعتر کرد.

۴- نتیجه گیری

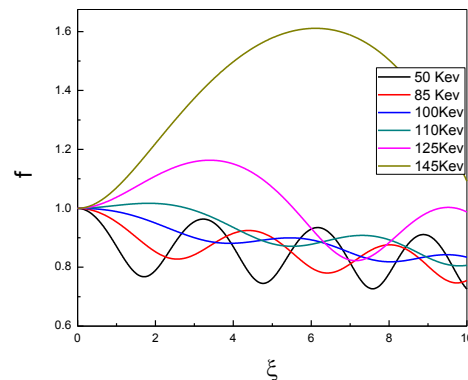
در این کار به بررسی خودکانونی پرتو لیزر در پلاسما با شکل چگالی بالارونده با احتساب اثرات غیر خطی پاندرومتیو و نسبیته پرداخته ایم. نتایج نشان داد که استفاده از پلاسما با تابع چگالی بالا رونده می تواند در افزایش بازه دمایی الکترون که در آن پدیده خودکانونی رخ می دهد موثر باشد. هم چنین دیده شد که با افزایش شیب چگالی بالا رونده می توان این گستره را وسیع تر کرد. رفتار خودکانونی به طور کلی در قبال افزایش دما مانند مورد پلاسما همگن رفتاری دوگانه بود به نحوی که تا نقطه بازگشتی دما، پدیده خودکانونی با افزایش دما تقویت و پس از این نقطه با افزایش دما تضعیف می شود. هم چنین تغییری در مقدار عددی نقطه بازگشتی دما در حالت استفاده از پلاسما با چگالی بالارونده نسبت به پلاسما همگن مشاهده نشد.

مراجع

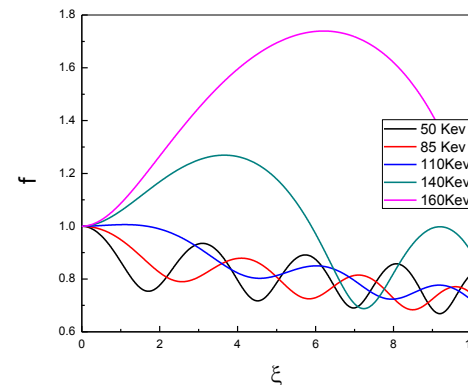
- [1] H.Hora, "Laser fusion with nonlinear force driven plasma blocks: thresholds and dielectric effects" **Laser Part. Beams** 27,(2009) 207-222
- [2] P.Zhang, J.T.He, D.B.Chen, Z.H.Li, Y.Zhang, W. Lan "X-ray emission from ultra intense-ultra short laser irradiation." **Phys. Rev. E** 57(1998), 3746-3752
- [3] W.B.Mori, C.Joshi, J.M.Dawson and D.W.Forslund; "Evolution of self-focusing of intense electromagnetic waves in plasma."; **Phys.Rev.Lett** 60, (1988) 1298-1301
- [4] H.bokaei, A.R.Niknam, M.R.Jafari Milani "Turning point temperature and competition between relativistic and ponderomotive effects in self-focusing of laser beam in plasma" **Phys. Plasmas** 20, (2013) 103107
- [5] D.N.Gupta and H.Suk. "Enhanced thermal self-focusing of a Gaussian laser beam in a collisionless plasma." **Physics of Plasmas** 18(12) (2011): 124501-124501.



شکل ۱: تحول اندازه لکه لیزری در طول انتشار در پلاسما با چگالی بالارونده در حالت $d=40$ برای دماهای الکترونی 10-40 کیلو الکترون ولت.



شکل ۲: تحول اندازه لکه لیزری در طول انتشار در پلاسما با چگالی بالارونده در حالت $d=40$ برای دماهای الکترونی 50-145 کیلو الکترون ولت.



شکل ۳: تحول اندازه لکه لیزری در طول انتشار در پلاسما با چگالی بالارونده در حالت $d=20$ برای دماهای الکترونی 50-145 کیلو الکترون ولت.

در شکل ۳ تغییرات پهنای لکه لیزری بر حسب طول انتشار برای پلاسما با شیب بالارونده بیشتر ($d=20$) ترسیم شده است. در این شکل ملاحظه می شود که گستره دمایی خودکانونی تا حدود دمای ۱۴۰ کیلو