

بررسی اثر چیرپ بر خودهمگرایی باریکه گاوسی در پلاسمای سرد مغناطیده

احسان قلی پور^۱، رضا فلاح^۱، سید محمد خراشادی زاده^۱ و علیرضا نیکنام^۲^۱ دانشگاه بیرجند، گروه فیزیک^۲ دانشگاه شهید بهشتی تهران، پژوهشکده لیزر و پلاسما*آدرس رایانامه نویسنده مسئول: ehsan.gholipoor@birjand.ac.ir

کلید واژه: برهمکنش لیزر-پلاسما، خودهمگرایی، پالس چیرپ، پلاسمای مغناطیده، باریکه قطبیده

چکیده

در این مقاله، اثر چیرپ بر خودهمگرایی یک باریکه گاوسی با قطبش دایروی راستگرد در یک پلاسمای سرد مغناطیده بررسی شده است. برای این هدف، با استفاده از معادلات ماکسول، معادله‌ی انتشار باریکه در پلاسمای مغناطیده را بدست آورده و سپس با استفاده از روش WKB، معادله‌ی تغییرات شعاع باریکه در پلاسما محاسبه شده است. در ادامه با در نظر گرفتن دو نوع چیرپ خطی و غیرخطی و استفاده از روش عددی رانگ-کوتا، تاثیر پارامتر چیرپ، چگالی پلاسما و بزرگی میدان مغناطیسی خارجی بر میزان خودهمگرایی باریکه قطبیده دایروی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد افزایش میدان مغناطیسی تا یک مقدار معینی، سبب تقویت خودهمگرایی باریکه قطبیده راستگرد شده و با تقویت بیشتر میدان مغناطیسی از این حد، از میزان خودهمگرایی باریکه کاسته می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد نوع چیرپ و چگالی پلاسما بر میزان خودهمگرایی باریکه تاثیرگذار بوده و با انتخاب مناسب پارامترهای مربوط به آن‌ها، می‌توان خودهمگرایی باریکه را کنترل کرد. مقایسه نتایج نشان می‌دهد خودهمگرایی باریکه چیرپ شده غیرخطی در طول انتشاری کمتری نسبت به باریکه چیرپ شده خطی اتفاق می‌افتد.

Investigation of the chirp effect on the self-focusing of Gaussian beam in cold magnetized plasma

Ehsan gholipoor¹, Reza Fallah¹, Seyed Mohammad Khorashadizadeh¹, Ali Reza Niknam²¹ Department of Physics, University of Birjand, Iran.² Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Iran.*corresponding e-mail: ehsan.gholipoor@birjand.ac.ir

Abstract

In this paper, the effect of chirp on the self-focusing of a Gaussian beams with the right circular polarization in a cold magnetized plasma is investigated. For this purpose, using Maxwell's equations, the beam propagation equation in the magnetized plasma is obtained. By using the WKB method, the equation of the changes of the beam radius is calculated. Then, by considering two types of linear and nonlinear chirps and using the Rang-Kuta numerical method, the effect of chirp parameter, the plasma density and the magnitude of the external magnetic field on the self-focusing of the circular polarized beam is investigated. The results show that increasing the magnetic field to a certain extent, enhances the self-focusing of the polarized beam, and by increasing the magnitude of the magnetic field more than this value, the rate of self-focusing decreases. The results also show that the type of chirp and the plasma density affect the self-focusing of the beam and selecting them properly, the self-focusing can be controlled. Comparison of the results shows that the self-focusing of the beam with nonlinear chirp occurs at a shorter propagation distance than the other beam.

Keywords: Laser-plasma interaction; Plasma; Self-focusing; Chirped pulse, Magnetized plasma, polarized beam

اندرکنش لیزر با پلاسما یک فرآیند است که در آن عوامل بسیاری

دخالت دارد. یکی از عوامل مهم در برهمکنش لیزر با پلاسما ویژگی

مقدمه



در این رابطه $\Phi_{\pm}(EE^*)$ قسمت غیرخطی ثابت دی الکتریک را مشخص می کند که طبق رابطه زیر داده می شود:

$$\Phi_{\pm} = \frac{\omega_p^2}{\omega_1^2} \left[1 - \frac{\omega_c}{\omega_1} \right] \left[1 - \exp\left(-\frac{\alpha_0^2 \left(1 - \frac{\omega_c}{2\omega_1}\right) EE^*}{(1 - \frac{\omega_c}{\omega_1})^2}\right) \right] \quad (6)$$

در روابط بالا ω_p فرکانس پلاسما، $\omega_c = \frac{eB_0}{m}$ فرکانس سیکلوترونی می باشد. با جایگذاری رابطه (۱) در رابطه (۴) و انجام محاسبات و همچنین استفاده از تقریب WKB رابطه زیر بدست می آید:

$$-2ik_{1\pm} \frac{\partial A}{\partial z} + \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\epsilon_{0\pm}}{\epsilon_{0zz}} \right] \nabla_{\perp}^2 A + \frac{\omega_p^2}{c^2} \Phi_{\pm}(EE^*) A = 0 \quad (7)$$

در ادامه، دامنه A را به صورت $A(r, z) = A_0(r, z) \exp(ik_{1\pm}(z)S(r, z))$ در نظر گرفته و آنرا در رابطه (۷) جایگذاری می کنیم و پس از انجام محاسبات، قسمت حقیقی رابطه بالا به صورت زیر بدست می آید:

$$2 \frac{\partial S}{\partial z} + \delta_{\pm} \left(\frac{\partial S}{\partial r} \right)^2 + \frac{2S}{k_{1\pm}} \frac{\partial k_{1\pm}}{\partial z} = \frac{\delta_{\pm}}{k_{1\pm}^2 A_0} \nabla_{\perp}^2 A_0 + \frac{1}{k_{1\pm}^2 c} \frac{\omega_p^2}{\left[1 + \frac{\omega_c}{\omega_0} \right]} \left[1 - \exp\left(-\frac{\alpha_0 A_0^2 \left(1 + \frac{\omega_c}{2\omega_0}\right)}{\left(1 + \frac{\omega_c}{\omega_0}\right)^2}\right) \right] \quad (8)$$

برای بررسی خودهمگرایی باریکه چیرپ در پلاسما مغناطیده، باید رابطه ای برای پارامتر توصیف کننده پهنای باریکه $(W_{\pm})$ بدست آورد. بدین منظور روابط زیر تعریف می شوند [۲]:

$$A_0 = \frac{A_{00}}{W_{\pm}} \exp\left[-\frac{r^2}{2r_0^2 W_{\pm}^2}\right] \quad (9)$$

$$S = \frac{r^2}{2} \beta_0(z) + \varphi_0(z) \quad (10)$$

$$\beta_0(z) = \frac{2}{(1 + \frac{\epsilon_{0\pm}}{\epsilon_{0zz}}) W_{\pm}} \frac{1}{dz} \quad (11)$$

با جایگذاری روابط (۹-۱۱) در رابطه (۸) و انجام ساده سازی در نهایت معادله ای برای توصیف خودهمگرایی باریکه چیرپ شده در پلاسما مغناطیده به صورت زیر بدست می آید:

$$\frac{d^2 W_{\pm}}{d\xi^2} = \frac{\delta_{\pm}^2}{W_{\pm}^3} - \frac{1}{k_{1\pm}} \frac{dk_{1\pm}}{d\xi} \frac{dW_{\pm}}{d\xi} - \frac{\omega_p^2 r_0^2}{c^2} \frac{\delta_{\pm} \left(1 + \frac{\omega_c}{2\omega_1}\right)}{W_{\pm}^3 \left(1 + \frac{\omega_c}{\omega_1}\right)^3} \times \alpha_0 A_{00}^2 \exp\left(-\frac{\alpha_0 \left(1 + \frac{\omega_c}{2\omega_1}\right) A_{00}^2}{W_{\pm}^2 \left(1 + \frac{\omega_c}{\omega_1}\right)^2}\right) \quad (12)$$

برای بررسی خودهمگرایی باریکه دو نوع چیرپ خطی و غیر خطی زیر استفاده می شود [۳]:

$$\omega_1 = \omega_0 + \omega_0 \alpha \xi \quad (13)$$

های لیزر ورودی به پلاسما است. با اختراع تکنیک CPA، تقویت پالس های لیزر به بخش مهمی از برهمکنش لیزر با پلاسما تبدیل شد. پالس های چیرپ شده، پالس هایی هستند که فرکانس آنها در راستای انتشار متغیر می باشد، ضمن اینکه این تغییرات فرکانس می تواند خطی یا غیرخطی باشد. بنابراین در حالت کلی چیرپ را به دو دسته خطی و غیرخطی تقسیم می کنند. پالس های چیرپ منشأ اثرات مهمی در برهمکنش لیزر با پلاسما هستند، به عنوان مثال برای شتاب دهی ذرات [۱] از این پالس ها استفاده می شود، همچنین برهمکنش باریکه با پلاسما می تواند اثر خودهمگرایی آن را تقویت کند [۲]. در این مقاله برهمکنش باریکه قطبیده چیرپ با دو نوع چیرپ خطی و غیر خطی با پلاسما مغناطیده مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج با هم مقایسه شده است.

روابط اصلی

برای بررسی تاثیر چیرپ شدگی باریکه بر میزان خودهمگرایی باید معادله ای حاکم بر انتشار باریکه در پلاسما بدست آورده شود. برای این منظور، باریکه ای گاوسی به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$\vec{E} = \hat{t} A \exp(i(\omega_1 t - k_{1\pm} z)) \quad (1)$$

که در آن A دامنه ی اولیه ی باریکه، ω_1 فرکانس باریکه فرودی به پلاسما و $k_{1\pm}$ عدد موج می باشد که به صورت زیر تعریف می شود:

$$k_{1\pm} = \frac{\omega_1}{c} \sqrt{\epsilon_{0\pm}} \quad (2)$$

$$\epsilon_{0\pm} = \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega_1^2 \left(1 + \frac{\omega_c}{\omega_1}\right)} \right) \quad (3)$$

در این رابطه c سرعت نور و $\epsilon_{0\pm}$ قسمت خطی ثابت دی الکتریک پلاسما مغناطیده برای انتشار باریکه قطبیده راستگرد و چپگرد می باشد. با استفاده از معادلات ماکسول، صورت کلی معادله ی میدان الکتریکی که انتشار باریکه قطبیده گاوسی در پلاسما را توصیف می کند به صورت زیر بدست می آید:

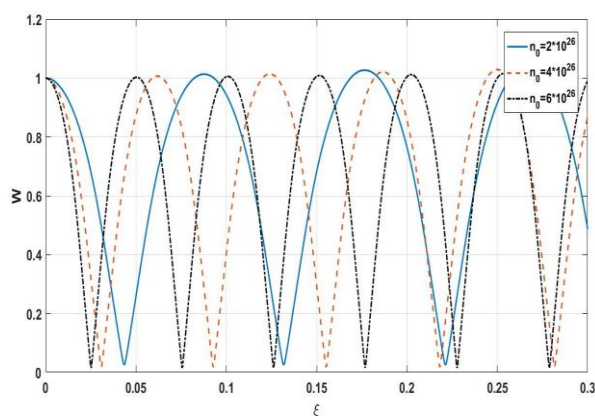
$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} + \delta_{\pm} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial r^2} \right) \vec{E} + \frac{\omega_1^2}{c^2} \epsilon_{\pm} \vec{E} = 0 \quad (4)$$

$\epsilon_{\pm}$ ثابت دی الکتریک در پلاسما مغناطیده می باشد که در تقریب پیرامحوری به صورت زیر تعریف می شود:

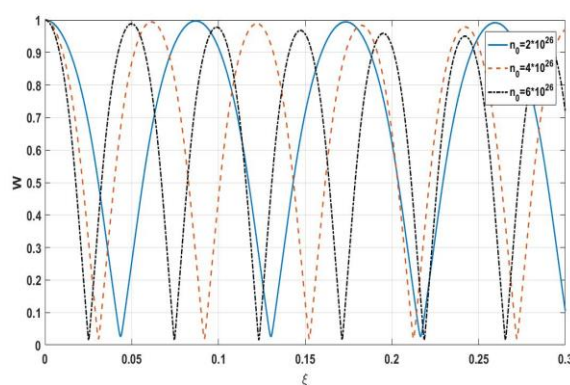
$$\epsilon_{\pm} = \epsilon_{0\pm} + \Phi_{\pm}(EE^*) \quad (5)$$

می توان از میدان مغناطیسی به عنوان یک عامل مهم در تقویت خودهمگرایی باریکه استفاده کرد.

(الف)

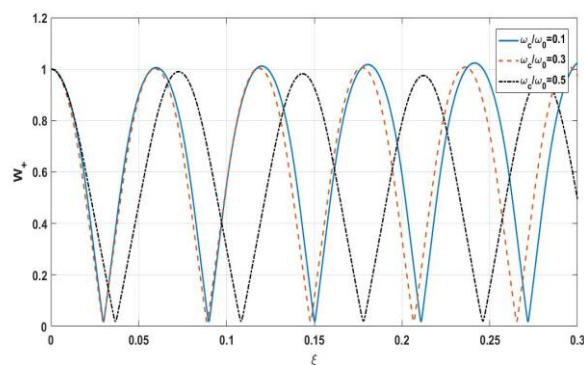


(ب)



شکل (۱) تاثیر چگالی اولیه بر خودهمگرایی باریکه چیرپ (الف) خطی و (ب) سینوسی برای پارامتر چیرپ $\alpha = 0.26$

(الف)



$$\omega_1 = \omega_0 + \omega_0 \alpha \sin(\beta \xi + \varphi) \quad (14)$$

که ω_0 فرکانس قبل از ورود باریکه به پلاسما، α و β پارامتر چیرپ و $\xi = \frac{z}{kr_0^2}$ پارامتر بدون بعد راستای انتشار است.

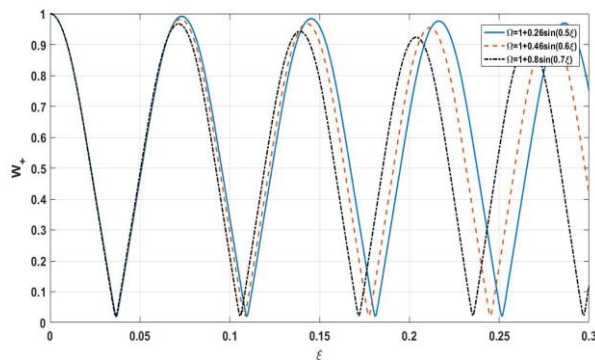
بحث عددی و نتایج

به منظور تحلیل عددی انتشار باریکه گاوسی چیرپ شده در پلاسمای مغناطیسه، رابطه (۱۲) برای دو چیرپ معرفی شده با استفاده از روش رانگ-کوتا مرتبه ۴ حل می شود. در حل عددی پارامترهای موثر به صورت زیر انتخاب شده است:

$$\alpha_0 A_{00}^2 = 0.6 \quad \omega_0 = 1.778 \times 10^{15} (\text{rad/s})$$

در شکل (۱) تاثیر چگالی پلاسما بر میزان خودهمگرایی باریکه قطبیده راستگرد نشان داده شده و تغییرات $W_{\pm}$ در راستای انتشار برای هر دو چیرپ انتخاب شده و چگالی های اولیه $n_0 = 2 \times 10^{26}, 4 \times 10^{26}, 6 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$ با در نظر گرفتن $\omega_c = 0$ رسم شده است. منحنی های این شکل نشان می دهند که برای هر دو نوع باریکه چیرپ شده، افزایش چگالی پلاسما سبب می شود که خودهمگرایی باریکه در پلاسمای مغناطیسه دچار تغییر شود، به گونه ای که برای چیرپ خطی و سینوسی، افزایش چگالی پلاسما از $2 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$ به $6 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$ میزان خودهمگرایی باریکه افزایش یافته و در طول انتشاری کمتری می توان این پدیده را مشاهده کرد. در شکل (۲) تاثیر میدان مغناطیسی خارجی بر خودهمگرایی باریکه های چیرپ قطبیده دایروی راستگرد بررسی شده است. برای این منظور برای هر دو حالت چیرپ، چگالی پلاسما $n_0 = 4 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$ و سایر پارامترها مطابق پارامترهای شکل (۱) اختیار شده است، همچنین برای میدان مغناطیسی $\frac{\omega_c}{\omega_1}$ محدوده ۰/۱ تا ۰/۵ در نظر گرفته شده است.

از بررسی منحنی های ۲- الف و ۲- ب مشاهده می شود که برای هر دو نوع چیرپ انتخاب شده خطی و غیر خطی، افزایش میدان مغناطیسی خارجی می تواند سبب تقویت خودهمگرایی باریکه شده و خودهمگرایی در فاصله انتشاری کوتاهتری اتفاق می افتد. بنابراین



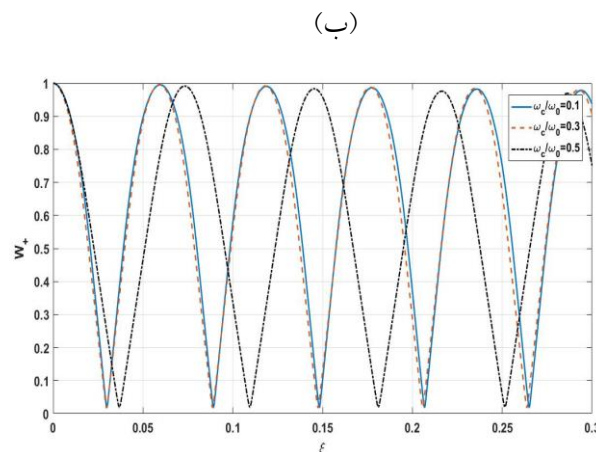
شکل (۳) تاثیر پارامتر چیرپ بر خودهمگرایی باریکه چیرپ شده (الف) خطی و (ب) سینوسی

نتیجه گیری

در این مقاله، تاثیر چیرپ شدگی بر میزان خودهمگرایی باریکه قطبیده دایروی در پلاسمای سرد همگن مغناطیده برای دو نوع چیرپ خطی و غیرخطی مورد بررسی قرار گرفت. برای تحلیل عددی این برهمکنش، از روش رانگ-کوتا استفاده شد. نتایج عددی نشان می‌دهد که برای دو چیرپ خطی و غیرخطی سینوسی، چگالی پلاسما و بزرگی میدان مغناطیسی خارجی، تاثیر مهمی بر میزان خودهمگرایی باریکه دارند، به طوری که افزایش چگالی سبب تقویت خودهمگرایی باریکه می‌شود و افزایش قدرت میدان مغناطیسی و به تبع آن $\frac{\omega_c}{\omega}$ از 0.1 تا 0.3 بر خودهمگرایی باریکه تاثیری مثبت داشته و با افزایش بیشتر $\frac{\omega_c}{\omega}$ از 0.3 تا 0.5 ، خودهمگرایی این باریکه‌های چیرپ شده تضعیف شده و در فاصله انتشاری طولانی‌تر نسبت به قبل، خودهمگرایی باریکه مشاهده می‌شود. در آخر، تاثیر پارامتر چیرپ بر خودهمگرایی باریکه بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که با انتخاب دقیق پارامترهای چیرپ، می‌توان میزان خودهمگرایی باریکه را کنترل کرد.

مراجع

- [1] Kalmykov, S. Y., Gorbunov, L. M., Mora, P., & Shvets, G. (2006). Injection, trapping, and acceleration of electrons in a three-dimensional nonlinear laser wakefield. *Physics of Plasmas*, 13(11), 113102.
- [2] Akhmanov, S. A., Sukhorukov, A. P., & Khokhlov, R. (1968). Self-focusing and diffraction of light in a nonlinear medium. *Soviet physics USPEKHI*, 10(5), 609
- [3] Afhami, S., & Eslami, E. (2014). Effect of nonlinear chirped Gaussian laser pulse on plasma wake field generation. *AIP Advances*, 4(8), 087142.



شکل (۲) تاثیر میدان مغناطیسی بر خودهمگرایی باریکه چیرپ شده (الف) خطی و (ب) سینوسی راستگرد W_+

در شکل (۳) تاثیر مقدار ضرایب چیرپ بر خودهمگرایی باریکه قطبیده راستگرد نشان داده شده است. برای رسم منحنی‌های این شکل، پارامترها به صورت $n_0 = 4 \times 10^{26} m^{-3}$ و $\alpha_0 A_{00}^2 = 0.6$ در نظر گرفته شده است. برای این منظور در محاسبات، ضریب چیرپ خطی $0.26, 0.46, 0.8$ و ضرایب چیرپ غیرخطی $\alpha = 0.2, 0.4, 0.8$ و $\beta = 0.5, 0.6, 0.7$ در نظر گرفته شده است. منحنی‌های الف و ب در این شکل نشان می‌دهند که پارامتر چیرپ نقش مهمی در خودهمگرایی باریکه دارد و با انتخاب مقادیر مناسب برای آن، می‌توان میزان خودهمگرایی باریکه را کنترل کرد، همچنین از این شکل مشاهده می‌شود که این تاثیر با افزایش طول انتشار باریکه افزایش می‌یابد.

(الف)

