



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



بررسی اثرات نیروی پاندرموتیو در برهمکنش لیزرپر شدت با پلاسمای کم چگال اتلافی

لیلا رجایی^۱ و مریم جعفری^۲

۱ و ۲ دانشکده علوم پایه، دانشگاه قم، قم، ایران

چکیده:

نیروی پاندرموتیو یک مفهوم مهم در فیزیک پلازما است که نقش مهمی در بسیاری از جنبه های تئوری برهمکنش لیزر پلازما شامل مسائل موجود در شتاب میدان عقبه ای و تقویت رامان را ایفا می کند. این نیروی غیر خطی به دلیل میدان الکترومغناطیسی با شدت بالا در تعامل با پلازما ایجاد می شود. این مقاله نتایج مربوط به برهمکنش لیزر شدید با پلاسمای کم چگال اتلافی است. هدف اصلی ما بررسی تغییرات پروفایل میدان الکتریکی و چگالی پلازما به دلیل نیروی پاندرموتیو در حضور برخورد ذرات است. کلید واژه: پلاسمای کم چگال اتلافی، لیزر پر شدت، نیروی پاندرموتیو.

Investigation of the effects of pondermotive force in the interaction intense laser with dissipative under dense plasma

Leila Rajaei¹ and Maryam Jafari²

1 and 2 Physics department, University of Qom, Qom, Iran

Abstract:

The pondermotive force is an important concept in plasma physics and, in particular, plays an important role in many aspects of the theory of laser-plasma interactions including current concerns like wakefield acceleration and Raman amplification. This nonlinear force is raised due to a high-intensity electromagnetic field interacting with plasma. This article results in the interaction of intense laser with dissipative underdense plasma. Our main aim is to present the variation of the profile of the electric field of laser and density of plasma due to the pondermotive force in the presence of a collision of particle

Key word: dissipative under dense plasma, intense laser, pondermotive force.

مقدمه:

پرتو نور یک موج الکترومغناطیسی است که میدان الکتریکی آن در حال نوسان است. با در نظر گرفتن برخوردها در پلاسما، معادلات خطی شده حاکم عبارتند از:

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} = -\frac{e}{m} \mathbf{E} - v\mathbf{V} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \frac{4\pi n_{e0}(z)e\mathbf{V}}{c} \quad (3)$$

در روابط فوق V, E, B, c بترتیب سرعت الکترون، میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی و سرعت نور است. از آنجاییکه پلاسما ناهمگن است چگالی تعادلی الکترون به Z بستگی دارد ($n_{e0}(Z)$) و نهایتاً عبارت آخر در معادله اول نشان دهنده ترم اتلافی است و v فرکانس برخورد است. با استفاده از معادلات ماکسول معادله میدان الکتریکی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\frac{d^2 \mathbf{E}}{dz^2} + \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \left(1 - \frac{4\pi n_e(z)e^2}{m\omega(i\omega - v)}\right) \mathbf{E} = 0 \quad (4)$$

با در نظر گرفتن تعادل بین گرادیان فشار پلاسما و نیروی پاندروموتیو خواهیم داشت:

$$\frac{1}{n_e} \frac{dn_e}{dz} = -\frac{e^2}{mT_e\omega^2} \frac{dE^2}{dz} \quad (5)$$

با انتگرال گیری از معادله (۵) در محیط پلاسمای ناهمگن :

$$n_e(z, E^2) = n_{e0}(z) \exp\left(\frac{e^2 E^2}{mT_e\omega^2}\right) \quad (6)$$

که ضریب گذردهی محیط پلاسما از رابطه‌ی زیر بدست می آید:

$$\varepsilon = 1 - \frac{(\omega_p)^2}{\omega(i+v/\omega)} \quad (7)$$

همراه با پیدایش فن آوری تقویت پالس چریپ ، لیزرهای فمتوثانیه که دارای پالس‌های فوق العاده شدید و میدان‌های الکتریکی فوق العاده بالا هستند پیشرفت چشمگیری داشتند [۱]. برهمکنش لیزرهای پرشدت با پلاسما عامل ایجاد فرایندهای غیر خطی می‌باشد [۲]. یکی از عوامل ایجاد این فرایندهای غیر خطی نیروی پاندروموتیو است [۳]. پدیده‌های غیرخطی بسیاری در برهم‌کنش موج الکترومغناطیسی فرکانس بالا با پلاسما در ارتباط با نیروی پاندروموتیو هستند. به طور کلی نیروی پاندروموتیو یک نیروی ذره باردار در پلاسما است [۴]. این نیرو باعث ایجاد پدیده‌های مختلفی شامل (۱) خودکانونی و رشته سازی پرتو لیزر (۲) تغییر پروفایل چگالی لیزر و شکل‌گیری سالیتون‌ها (۳) ناپایداری پارامتریک (۴) تولید میدان مغناطیسی و (۵) تولید هارمونیک دوم می‌باشد [۵]. برخی نویسندگان تحقیقاتی در زمینه‌های مختلف پلاسمای ناهمگن و نیروی پاندروموتیو انجام داده‌اند. به عنوان مثال: تاثیر نیروی پاندروموتیو روی پلاسمای کم چگال با پروفایل چگالی خطی [۶] و اثر میدان مغناطیسی خارجی روی توزیع چگالی و میدان‌های الکترومغناطیسی در برهم‌کنش لیزر فوق شدید با پلاسمای کم چگال غیر برخوردی [۷].

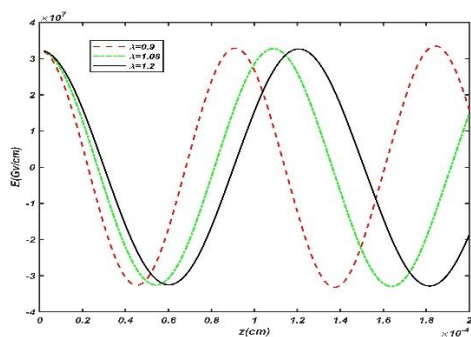
برخورد بین ذرات یکی از عوامل اتلاف انرژی در سیستم‌های سیالی است. این اثرات اتلافی در انتشار امواج از محیط‌های پلاسمایی نیز اثر می‌گذارند. هدف ما در این مقاله بررسی اثرات برخورد در انتشار نور لیزر در یک محیط باردار پلاسمایی است. بنابراین برای بررسی اثرات برخورد روی انتشار موج الکترومغناطیس از یک پلاسمای اتلافی، چگونگی تغییرات پروفایل میدان الکتریکی و پروفایل چگالی الکترون‌ها را مورد بررسی قرار خواهیم داد.

معادلات حاکم:

برحسب فاصله است مطابق این نمودار با افزایش طول موج نور لیزر طول موج میدان الکتریکی منتشر شده در پلاسما کوتاهتر میگردد. قابل ذکر است که در حالت غیر اتلافی این نمودار قبلاً محاسبه شده است [۶].

برای بررسی اثرات اتلافی در یک طول موج خاص میدان الکتریکی برای فرکانسهای برخورد مختلف در شکل (۲) رسم شده است. همانگونه که دیده میشود با اثرات اتلافی فقط باعث تغییر در طول موج میدان الکتریکی میشود و همانگونه که از نمودار معلوم است طول موج میدان الکتریکی به مکان وابسته می شود.

نهایتاً با استفاده از رابطه (۶) تغییرات چگالی برحسب فاصله برای فرکانسهای برخورد متفاوت در شکل (۳) رسم شده است مطابق این شکل با پیشرفت موج لیزر درون پلاسما تاثیر فرکانس برخورد بیشتر دیده می شود و با افزایش فرکانس برخورد چگالی نواحی پلاسما افزایش میابد.



شکل (۱) میدان الکتریکی در حالت غیر اتلافی برای طول موج های مختلف

(نقطه خط) $\lambda=1.08$ و (خط چین) $\lambda=0.9$ (خط سیاه) $\lambda=1.2$

در این رابطه $\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m}}$ فرکانس پلاسما می باشد.

با جایگذاری معادله (۶) در معادلات برای گذردهی دی الکتریک پلاسما رابطه زیر بدست می آید:

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{\omega p_0}{\omega}\right)^2 \frac{1}{(i+v/\omega)} \exp\left(\frac{e^2 E^2}{m T_e \omega^2}\right) \quad (8)$$

و در آخر با استفاده از ضریب گذردهی ε و جایگذاری در رابطه (۴) معادله ی میدان الکتریکی به صورت مقابل محاسبه می شود:

$$\frac{d^2 E}{dz^2} + \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \left(1 - \left(\frac{\omega p_0}{\omega}\right)^2 \frac{1}{(i+v/\omega)} \exp\left(\frac{e^2 E^2}{m T_e \omega^2}\right)\right) E = 0 \quad (9)$$

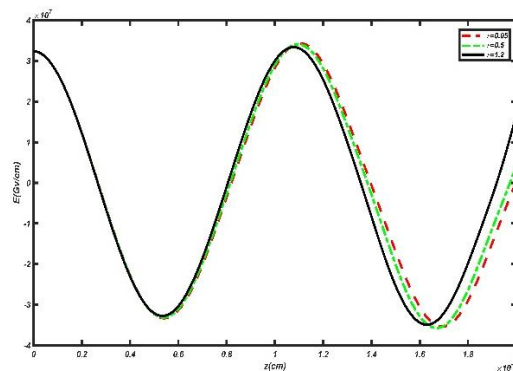
نتایج محاسبات عددی:

با بررسی برهمکنش لیزر شدت بالا با پلاسما کم چگال ناهمگن در بخش قبل دیدیم که معادله ی (۹) بدست آمده به شدت غیر خطی است و بنابراین برای حل آن و محاسبه میدان الکتریکی از روش عددی رانگ کوتا مرتبه چهار استفاده کردیم با استفاده از نرم افزار متلب نمودارهای میدان الکتریکی و چگالی الکترون ها را برای حالت اتلافی و غیر اتلافی رسم کردیم. پارامترهای لیزر و پلاسما استفاده شده در این مقاله $L=2\mu\text{m}$

$I=5 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$ هستند.

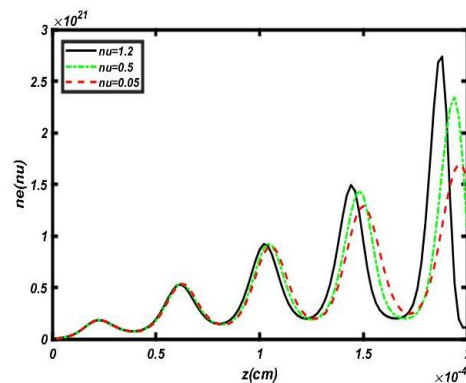
ابتدا تغییرات میدان الکتریکی را بر حسب تغییر طول موج لیزر تابیده شده و در دو حالت اتلافی و بدون اتلافی بررسی می نماییم از آنجاییکه معادله میدان الکتریکی (معادله (۹)) غیر خطی است ما مجبور هستیم این معادله را بصورت عددی حل نماییم نتایج حل عددی در شکل (۱) نشان داده شده است. نتایج حاصله نشان دهنده تغییرات میدان الکتریکی

شدت اولیه لیزر را $I=5 \times 10^{17} W/cm^2$ در نظر گرفتیم. همانطور که دیدیم با افزایش طول موج لیزر پروفایل میدان الکتریکی پهن میشود. و برای فرکانس های برخورد مختلف مشاهده کردیم که با افزایش فرکانس برخوردی میدان الکتریکی تغییر چندانی نخواهد کرد. همچنین با افزایش فرکانس برخوردی پلاسما چگالی الکترون افزایش می یابد و طول موج نوسانات کاهش می یابد.



شکل ۲) میدان الکتریکی در حالت اتلافی برای فرکانس های برخورد مختلف:

$\nu = 0.05$ (خط چین) و $\nu = 0.5$ (نقطه خط) و $\nu = 1.2$ (خط سیاه)



شکل ۳) چگالی الکترون برای فرکانس های برخورد مختلف

$\nu = 0.05$ (خط چین) و $\nu = 0.5$ (نقطه خط) و $\nu = 1.2$ (خط سیاه)

References:

- [1] Eliezer, Shalom, and Kunioki Mima, eds. *Applications of laser-plasma interactions*, CRC press, (2008).
- [2] Hora, Heinrich. *Plasmas at high temperature and density: applications and implications of laser-plasma interaction*. Vol. 1. Springer Science & Business Media, (2008).
- [3] Burton, D.A., Cairns, R.A., Ersfeld, B., Noble, A., Yoffe, S. and Jaroszynski, D.A., Vol 10234, International Society for Optics and Photonics, (2017).
- [4] Shokri, B., and A. R. Niknam. *Physics of plasmas*, sss **13**, **11** (2006).
- [5] Eliezer, Shalom. *The interaction of high-power lasers with plasmas*. CRC press, (2002).
- [6] Niknam, Ali Reza, Mojtaba Hashemzadeh, and Mohammad Mahdi Montazeri. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **38**, **9** (2010).
- [7] Mahmoodi-Darian, Masoomeh, Mehdi Etehadi-Abari, and Mahsa Sedaghat. *Journal of Theoretical and Applied Physics*, **10**, **1** (2016).

نتیجه گیری:

در این مقاله، انتشار یک موج الکترومغناطیسی پر شدت را از یک پلاسما ناهمگن مورد بررسی قرار دادیم. همانطور که بیان شد نیروی پاندرموتیو باعث تغییر در چگالی الکترون ها و میدان لیزر می شود. با حل معادله موج و با استفاده از برنامه رانگ کوتا در نرم افزار متلب نمودارهای میدان الکتریکی و چگالی الکترون را برای دو حالت اتلافی و غیر اتلافی رسم کردیم.