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]

۱و۲ دانشکده علوم پایه، دانشگاه قم، قم، ایران

چکیده:

نیروی پاندرموتیو یک مفهوم مهم در فیزیک پلاسما است که نقش مهمی در بسیاری از جنبه های تئوری برهمکنش لیزر پلاسما شامل مسائل موجود در شتاب میدان عقبه‌ای و تقویت رامان را ایفا می‌کند.این نیروی غیر خطی به دلیل میدان الکترومغناطیسی با شدت بالا در تعامل با پلاسما ایجاد می‌شود. این مقاله نتایج مربوط به برهم‌کنش لیزر شدید با پلاسمای کم چگال اتلافی است. هدف اصلی ما بررسی تغییرات پروفایل میدان الکتریکی و چگالی پلاسما به دلیل نیروی پاندرموتیو در حضور برخورد ذرات است.

کلید واژه: پلاسمای کم چگال اتلافی، لیزر پرشدت، نیروی پاندرموتیو.

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

Leila Rajaei[1] and Maryam Jafari[2]

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

Abstract:

The ponderomotive 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.

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]

مقدمه:

همراه با پیدایش فن‌آوری تقویت پالس چریپ ، لیزرهای فمتوثانیه که دارای پالس‌های فوق العاده شدید و میدان های 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 غیرخطی نیروی پاندرموتیو است[۳]. پدیده‌های غیرخطی بسیاری در برهم‌کنش موج الکترومغناطیسی فرکانس بالا با پلاسما در ارتباط با نیروی پاندرموتیو هستند. به طور کلی نیروی پاندرموتیو یک نیرو روی ذره باردار در پلاسما است[۴]. این نیرو باعث ایجاد پدیده های 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 پاندرموتیو انجام داده‌اند. به عنوان مثال: تاثیر نیروی پاندرموتیو 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 می گذارند. هدف ما در این مقاله بررسی اثرات برخورد در انتشار نور لیزر در یک محیط باردار پلاسمایی است. بنابراین برای بررسی اثرات برخورد روی انشار موج الکترومغناطیس از یک پلاسمای اتلافی، چگونگی تغییرات پروفایل میدان الکتریکی و پروفایل چگالی الکترون ها را مورد بررسی قرار خواهیم داد.

معادلات حاکم:

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:

$$\frac{\partial \boldsymbol{V}}{\partial t} = -\frac{e}{m}\boldsymbol{E} - \upsilon \boldsymbol{V} \qquad (۱)$$

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{1}{c}\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \qquad (۲)$$

$$\nabla \times \boldsymbol{B} = -\frac{1}{c}\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} - \frac{4\pi n_{e0}(z) e \boldsymbol{V}}{c} \qquad (۳)$$

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

$$\frac{d^2\boldsymbol{E}}{dz^2} + \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \left(1 - \frac{4\pi n_e(z) e^2}{m\omega(i\omega - \upsilon)}\right)\boldsymbol{E} = 0 \qquad (۴)$$

با در نظر گرفتن تعادل بین گرادیان فشار پلاسما ونیروی پاندرموتیو خواهیم داشت:

$$\frac{1}{n_e}\frac{dn_e}{dz} = -\frac{e^2}{mT_e\omega^2}\frac{dE^2}{dz} \qquad (۵)$$

با انتگرال‌گیری از معادله (۵) در محیط پلاسمای ناهمگن :

$$n_e(z, E^2) = n_{e0}(z)\exp\left(\frac{e^2E^2}{mT_e\omega^2}\right) \qquad (۶)$$

که ضریب گذردهی محیط پلاسما از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2 \frac{1}{(i+\upsilon/\omega)} \qquad (۷)$$

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]

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

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

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{\omega p_0}{\omega}\right)^2 \frac{1}{(i+\upsilon/\omega)} \exp\left(\frac{e^2E^2}{mT_e\omega^2}\right) \qquad (۸)$$

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

$$\frac{d^2\boldsymbol{E}}{d^2z} + \left(\frac{\omega}{c}\right)^2\left(1 - \left(\frac{\boldsymbol{\omega_{p0}}}{\boldsymbol{\omega}}\right)^2 \frac{1}{(i+\upsilon/\omega)} \exp\left(\frac{e^2E^2}{mT_e\omega^2}\right)\right)\boldsymbol{E} = 0 \qquad (۹)$$

نتایج محاسبات عددی:

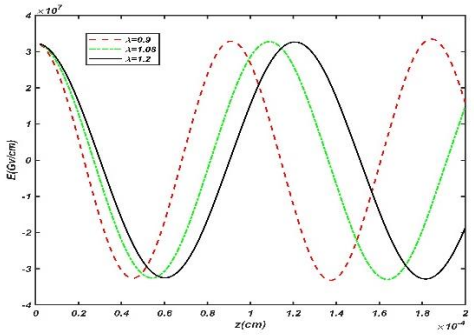
با بررسی برهمکنش لیزر شدت بالا با پلاسمای کم چگال ناهمگن در بخش قبل دیدیم که معادله ی (۹) بدست آمده به شدت غیر خطی است و بنابراین برای حل آن و محاسبه میدان الکتریکی از روش عددی رانگ کوتا مرتبه چهار استفاده کردیم با استفاده از نرم افزار متلب نمودارهای میدان الکتریکی وچگالی الکترون ها را برای حالت اتلافی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

$\mathbf{I}=5\times10^{17}\,{}^{w}/_{cm^2}$ 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)) غیرخطی 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 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 قبلا 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.

نهایتا 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.

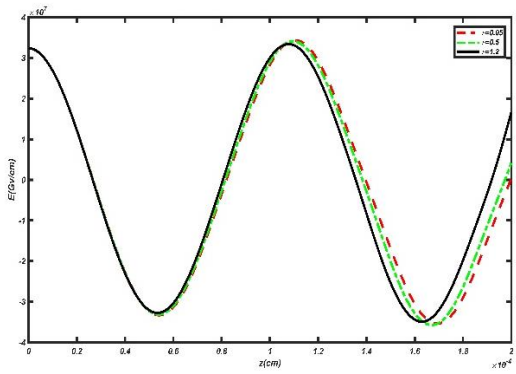


شکل۱) میدان الکتریکی درحالت غیر اتلافی برای طول موج های مختلف

(نقطه خط) λ=1.08 و (خط چین) λ=0.9 (خط سیاه)λ=1.2

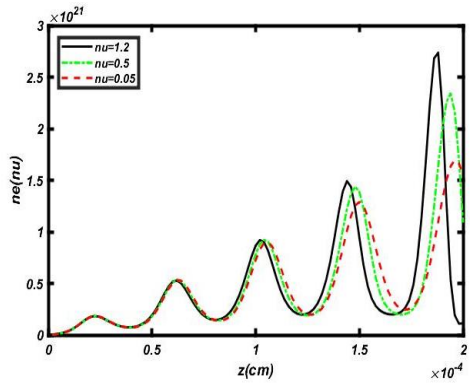
این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]



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

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



شکل ۳) چگالی الکترون برای فرکانس های برخورد مختلف

$\upsilon = 0.05$ *(خط چین)* $\upsilon = 0.5$ *(نقطه خط)* $\upsilon = 1.2$ *(خط سیاه)*

نتیجه گیری:

در این مقاله، انتشار یک موج الکترومغناطیسی پر شدت را از یک پلاسمای 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 ازبرنامه رانگ کوتا درنرم افزار متلب نمودارهای میدان الکتریکی و چگالی الکترون را برای دو حالت اتلافی و غیر اتلافی رسم کردیم.

شدت اولیه لیزر را $\mathbf{I}=5 \times 10^{17}\, W/cm^2$ در نظر گرفتیم .همانطور که دیدیم با افزایش طول موج لیزر پروفایل میدان الکتریکی پهن میشود.وبرای 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.

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 Ettehadi-Abari, and Mahsa Sedaghat. *Journal of Theoretical and Applied Physics*, **10, 1** (2016).

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]