

بررسی اثر تغییرات چگالی گاز هیدروژن بر طیف انرژی الکترون‌ها، در پلاسمای حاصل از یونش میدانی

زهره دهقانی، الناز خلیل زاده*، سمیه رضایی، محمد جعفر جعفری، امیر چخماچی

۱. سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای

چکیده:

در این مقاله، اثر تغییرات چگالی بر روی طیف انرژی الکترون‌ها در برهمکنش پالس قوی لیزر با اتم‌های هیدروژن در دو حالت پلاسمای حاصل از یونش میدانی و پلاسمای پیش فرض، با استفاده از کد شبیه‌سازی ذره در سلول بررسی شده است. پالس لیزر به طول ۳۰۰ فمتو ثانیه و با شدت نسبی در نظر گرفته شده و چگالی پلاسمای تشکیل شده زیر بحرانی است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد برای پالس‌های با زمان خیزش کوتاه، در هر دو حالت پلاسمای حاصل از یونش و پلاسمای پیش فرض، با افزایش چگالی پهنای باند تابع توزیع انرژی گسترده شده و حداکثر انرژی الکترون‌ها افزایش می‌یابد. در مقابل، برای پالس لیزر با زمان خیزش بلندتر، با افزایش چگالی، رفتار تابع توزیع انرژی الکترون‌ها در چگال‌های مختلف برای این دو حالت تغییر می‌کند. وقتی چگالی به $0.03 n_{cr}$ می‌رسد، سازوکار برهم‌کنش تغییر می‌کند.

کلیدواژه‌ها: انرژی الکترون‌ها، برهمکنش لیزر با گاز، تابع توزیع، یونش میدانی

Investigation of the electron density variation effect on electron energy spectrum in plasma resulting from field ionization

Z. Dehghani¹, E. Khalilzadeh^{1*}, S. Rezaei¹, M. J. Jafari¹, A. Chakhmachi¹

1. Plasma and Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.BOX: 14395-836, Tehran, Iran

Abstract

In this paper, the effect of the density variation on the electron energy distribution are studied and compared for the field-ionized plasma and pre-plasma cases. The laser pulse length is 300 femtoseconds with a relative intensity and the density of the plasma formed is under critical. The results show that for pulses with short rise times, in both field ionization plasma and default plasma states, with increasing density, the bandwidth of the energy distribution function expands and the maximum energy of the electrons increases. In contrast, for a laser pulse with a longer rise time, as the density increases, the behavior of the energy distribution function of the electrons at different densities for these two modes changes. When the density reaches to $0.03 n_{cr}$, the interaction mechanism changes.

Keywords: Electron energy, Interaction between laser and gas, Electron energy distribution function, Field-ionized plasma.

Email : elinaz_kh61@yahoo.com

۱. مقدمه

یکی از جالبترین ویژگی‌ها در فیزیک لیزر - پلاسما، توانایی برهم‌کنش تابش شدید لیزر با پلاسما در تولید الکترونهای بسیار پرانرژی است که امروزه به دلیل کاربردهای زیادی از جمله شتاب یونی، تولید اشعه ایکس و تولید پوزیترون، توجهات زیادی را به سمت خود جلب کرده‌اند [۱-۳]. در این برهم‌کنش، سازوکارهای مختلفی مانند شتاب میدان عقبه، شتاب لیزر مستقیم و گرمایش تصادفی برای توصیف شتاب الکترون‌ها در این سیستم وجود دارد. این موضوع، تاکنون در بسیاری از کارها به صورت تحلیل، عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. در میان این سازوکارها، گرمایش تصادفی نقش اساسی در شتابدهی الکترون‌ها در پلاسما دارد.

در بسیاری از مطالعات مربوط به برهم‌کنش پالس قوی لیزر (پالس‌های کوتاه نانو و پیکو ثانیه) با پلاسما، به دلیل اینکه در ابتدای پالس لیزر و قبل از رسیدن بخش اصلی پالس یونش اتفاق می‌افتد، مرحله یونش و تشکیل پلاسما بواسطه برخورد لیزر با ماده جامد یا گاز در نظر گرفته نمی‌شود [۴]. در حالی که در این بررسی‌ها، نشان داده شده است که اثرات پیش‌پالس و انرژی که صرف یونش میدانی می‌شود، نیز می‌تواند بر روی شدت انتشار پالس اصلی، تاثیرگذار باشد. ویژگی میدان‌های عقبه، که توسط پالس‌های لیزر در پلاسماهای یونیزه شده با میدان لیزر، تولید شده‌اند، به صورت تحلیلی و عددی در کارهای قبلی مورد بررسی قرار گرفته است.

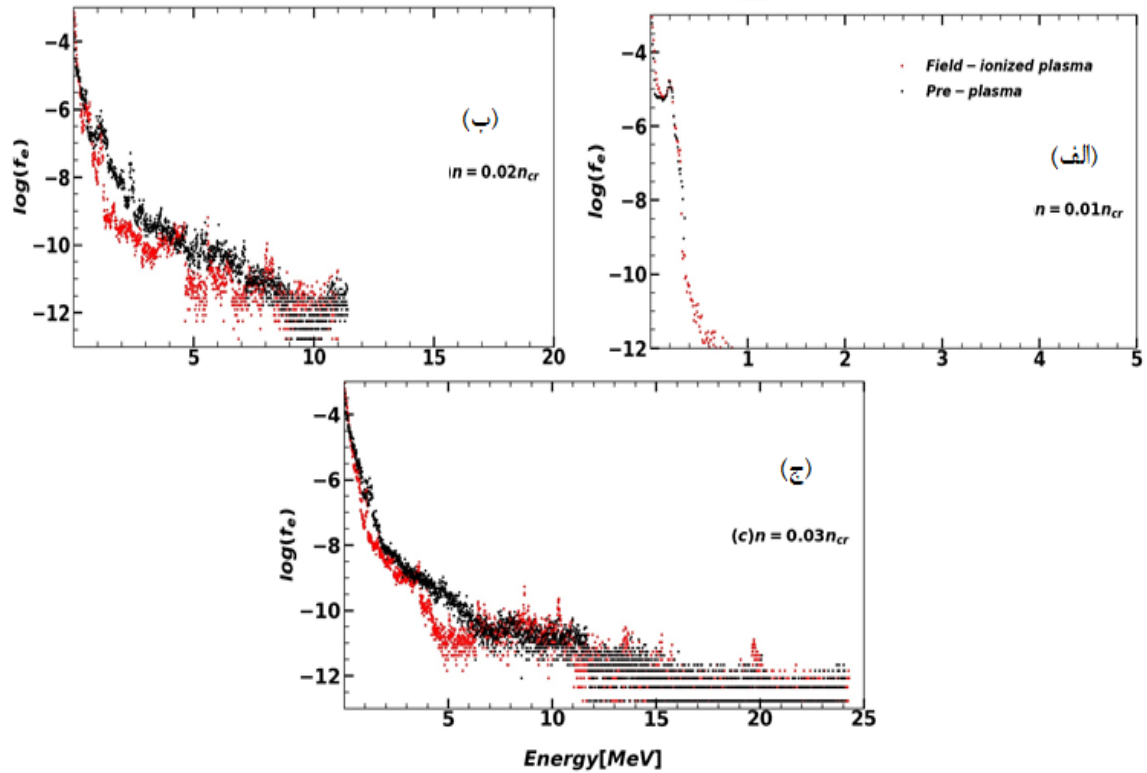
بعلاوه، برخی از کارهای اخیر بر گسترش انرژی برای فرآیند تزریق یونش در محیط گاز متمرکز شده است. در اینها، کیفیت الکترون‌های شتابدار با توزیع چگالی و طیف انرژی، برای این الکترون‌ها مشخص شده است. علاوه بر این، اثر تزریق ناشی از یونش، با تنظیم ترکیب یک گاز هدف، بر عملکرد خود مدولاسیون و شتاب میدان بیداری لیزر مورد مطالعه قرار گرفت [۵،۶].

هدف از این کار، بررسی اثر نوسانات چگالی با در نظر گرفتن یونش، بر روی طیف نهایی انرژی الکترون‌ها است. همان‌طور که می‌دانید، یونش به دلیل تولید نیروی پاندروموتیو می‌تواند باعث تولید تابش شود بنابراین انتظار می‌رود بر روی انرژی الکترون‌ها تاثیرگذار باشد.

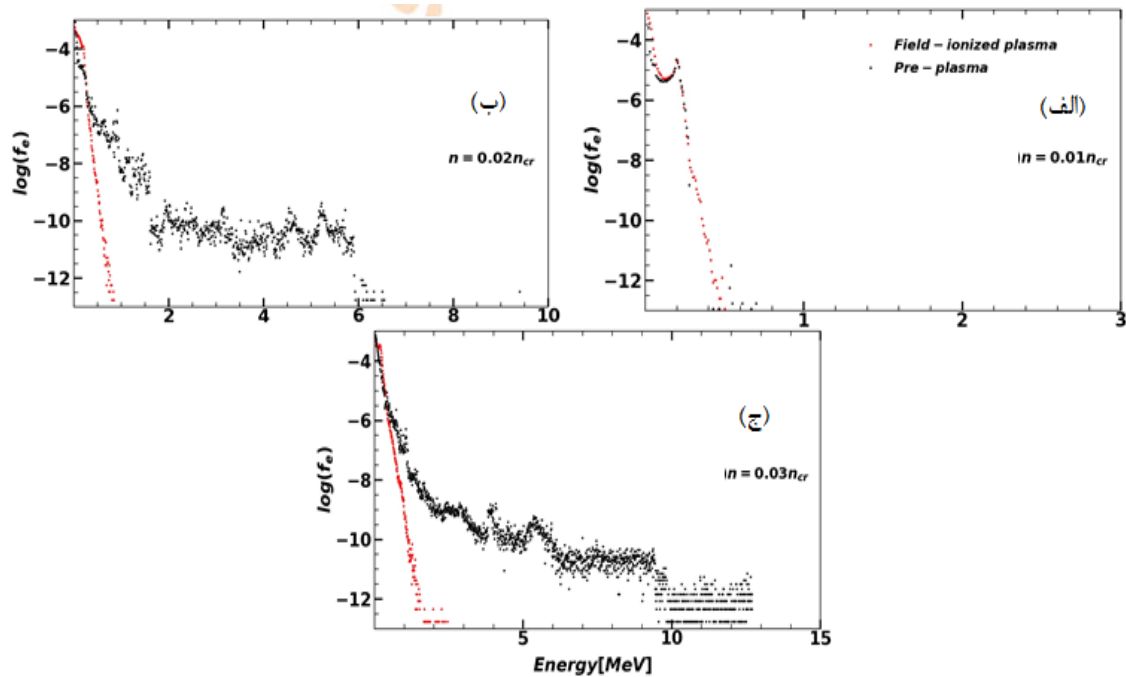
۲. روش کار

برای جلوگیری از تکرار شدن پارامترهای شبیه‌سازی در تمام این بخش، این پارامترها قبل از ارائه نتایج شبیه‌سازی بیان می‌شوند. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از کد شبیه‌سازی اسماییلی که تک بعدی در مکان و سه بعدی در سرعت می‌باشد، انجام شده است. پالس لیزر دارای طول موج $\lambda = 1\mu\text{m}$ و دامنه میدان الکتریکی بی‌بعد $a_0 = 1$ شده است که $a_0^2 = I\lambda_{\mu}^2 / 1.37 \times 10^{18}$ می‌باشد. برای تمامی نتایج شبیه‌سازی، پلاسما با پروفایل اولیه پله‌ای در محدوده $x = [85 - 220]\mu\text{m}$ در نظر گرفته شده است. برای داشتن وضوح و دقت قابل قبول در شبیه‌سازی، در هر طول موج لیزر، ۲۷۰۰۰ سلول شبیه‌سازی که داخل هر کدام ۴۸ ابر ذره وجود دارد قرار دارد. طول مکانی هر سلول شبیه‌سازی در حدود $DX / \lambda_D \approx 0.01$ می‌باشد. در تمام این کار، مقادیر، موقعیت (x) و میدان الکتریکی طولی به ترتیب به λ و $\omega_0 m_e c / q_e$ نرمالیزه شده‌اند (q_e و ω_0 به ترتیب، بار الکترونی و فرکانس لیزر می‌باشد).

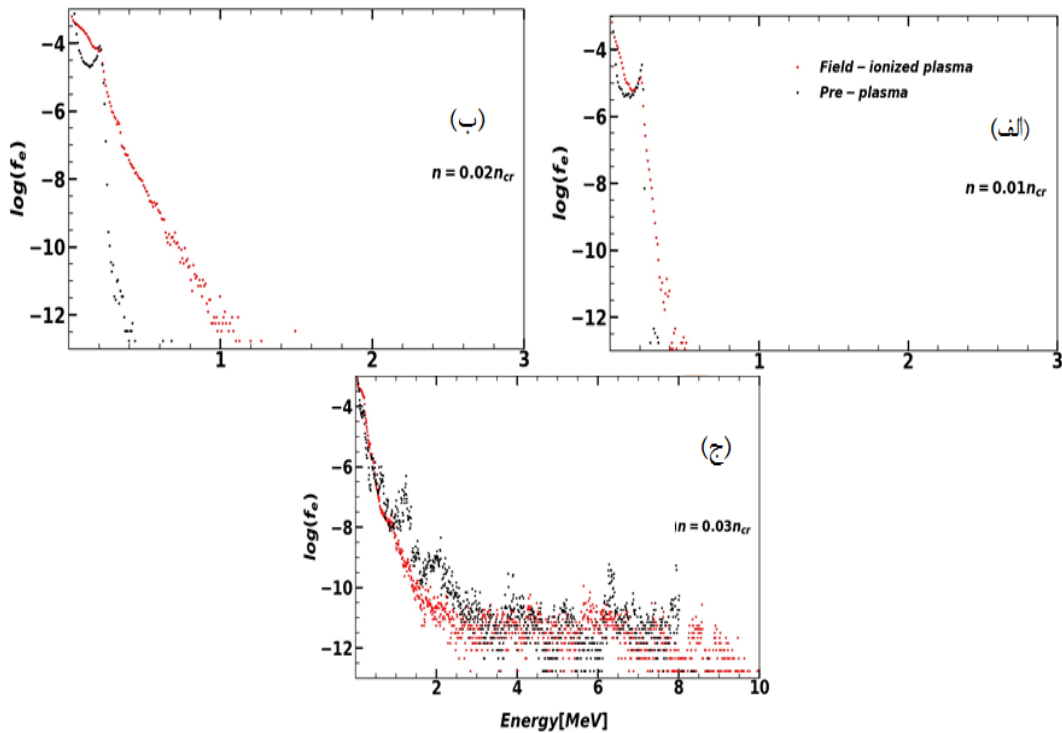
برای بررسی تأثیر چگالی اتم‌های هیدروژن بر طیف انرژی الکترون‌ها در برهم‌کنش پالس‌های لیزر با اتم‌های هیدروژن، طیف‌های انرژی الکترون‌ها برای سه پالس $[30, 240, 30]$ fs، $[40, 240, 40]$ fs و $[60, 180, 60]$ fs، به ترتیب، برای چگالی‌های (الف) $0.1 n_{cr}$ ، (ب) $0.2 n_{cr}$ و (ج) $0.3 n_{cr}$ و $a_0=1$ در زمان 650 fs در شکل‌های ۱ تا ۳ نشان داده شده است.



شکل ۱. تابع توزیع انرژی الکترون بر حسب انرژی الکترون برای پالس [۳۰، ۲۴۰، ۳۰] fs در زمان ۶۵۰ fs برای چگالی‌های (الف) $0.01 n_{cr}$ ، (ب) $0.02 n_{cr}$ و (ج) $0.03 n_{cr}$.

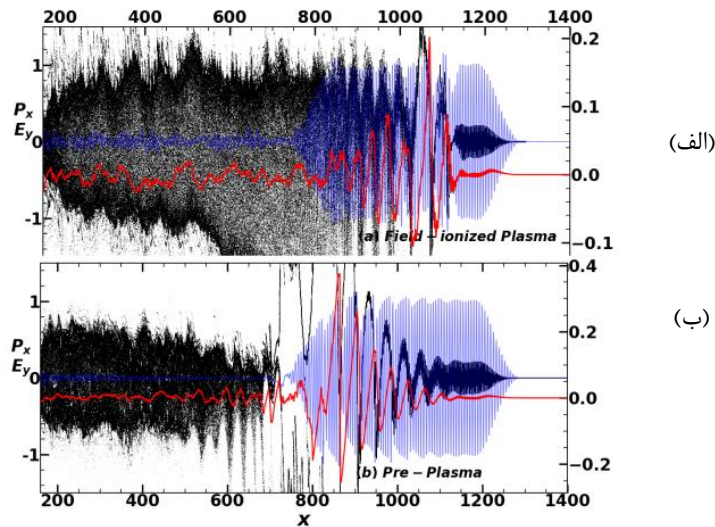


شکل ۲. تابع توزیع انرژی الکترون بر حسب انرژی الکترون برای پالس [۴۰، ۲۴۰، ۴۰] fs در زمان ۶۵۰ fs برای چگالی‌های (الف) $0.01 n_{cr}$ ، (ب) $0.02 n_{cr}$ و (ج) $0.03 n_{cr}$ ،



شکل ۳. تابع توزیع انرژی الکترون بر حسب انرژی الکترون برای پالس [۶۰، ۲۴۰، ۶۰] fs در زمان ۶۵۰ fs برای چگالی های (الف) $0.01 n_{cr}$ ، (ب) $0.02 n_{cr}$ و (ج) $0.03 n_{cr}$.

همانطور که در شکل ۱ مشاهده می شود، برای پالسی با زمان خیزش ۳۰ fs، با افزایش چگالی، برای دو حالت پلاسمای حاصل از یونش میدانی و پلاسمای پیش فرض، انرژی الکترون ها افزایش می یابد و تفاوت کمی نیز بین طیف انرژی الکترون ها در دو حالت وجود دارد. به نظر می رسد، از آنجایی که شکست موج پلاسمای سازوکار اصلی شتابدهی الکترون ها و بدست آوردن انرژی در دو حالت پلاسمای حاصل از یونش میدانی و پلاسمای پیش فرض می باشد، بنابراین با افزایش چگالی، آستانه شکست موج نیز افزایش می یابد. همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، برای پالسی با زمان خیزش ۴۰ fs، انرژی الکترون ها با افزایش چگالی افزایش می یابد و حداکثر انرژی الکترون ها در حالت پلاسمای پیش فرض، هنوز بیشتر از پلاسمای حاصل از یونش میدانی است. نکته جالب در این شکل، افزایش اختلاف بین حداکثر انرژی تولیدی در پلاسمای حاصل از یونش میدانی نسبت به پلاسمای پیش فرض می باشد. این پدیده می تواند به دلیل شکست سریع موج غیر خطی، ناشی از نوسان های چگالی بیشتر در چگالی های بالاتر باشد [۷]. در شکل ۳، برای پالسی با زمان خیزش ۶۰ fs، حداکثر انرژی الکترون ها در چگالی های $0.01 n_{cr}$ ، $0.02 n_{cr}$ و $0.03 n_{cr}$ در پلاسمای حاصل از یونش میدانی بیشتر از پلاسمای پیش فرض است.



شکل ۴. نتایج شبیه سازی برای میدان عقبه تولیدی E_x ، میدان الکتریکی لیزر E_y و اندازه حرکت p_x برای پالس لیزر [۶۰، ۲۴۰، ۶۰] fs. چگالی اتم های هیدروژن $n_{cr} = 0.3$ و $a_0 = 1$ منحنی (الف) و (ب) مربوط به انتشار پالس لیزر به ترتیب در حالت های پلاسمای حاصل از یونش میدانی و پلاسمای پیش فرض

در این شرایط به دلیل افزایش چگالی، ناپایداری رامان می تواند از نویزهای سطح بالا شروع شده و شرایط مندونک^۱ [۸] را زودتر برآورده کند. از طرف دیگر، در چگالی $n_{cr} = 0.3$ ، تفاوت زیادی بین دو حالت پلاسمای حاصل از یونش میدانی و پلاسمای پیش فرض وجود ندارد. برای بررسی بیشتر، در شکل ۴، نمودار فضای فاز الکترون و میدان الکتریکی آورده شده است. همانطور که از منحنی فضای فاز مشاهده می شود، به نظر می رسد سازوکار شتاب الکترونی در حالت پلاسمای حاصل از یونش میدانی از حالت پلاسمای پیش فرض کاملاً متفاوت باشد. در حالت پلاسمای حاصل از یونش میدانی، سازوکار شتاب دهی از طریق شروع آشوب، شتابدهی تصادفی است [۹، ۱۰]، و در حالت پلاسمای پیش فرض، به دلیل افزایش دامنه میدان الکتریکی بار فضایی، سازوکار اصلی شتاب و به دست آوردن انرژی الکترون ها، شکستن موج غیر خطی [۷] است. در حقیقت، با افزایش چگالی و به دلیل افزایش میدان الکتریکی بار فضایی، در پلاسمای پیش فرض، آشوب رخ نمی دهد [۱۱]

۵. نتیجه گیری

در این کار، تاثیر تغییرات چگالی در توزیع انرژی الکترون ها مورد بررسی قرار گرفته و نتایج برای حالت های پلاسمای حاصل از یونش میدانی و پلاسمای پیش فرض مقایسه می شود. نتایج شبیه سازی این کار نشان می دهد که افزایش چگالی، باعث گسترش پهنای باند تابع توزیع انرژی شده و حداکثر انرژی تابع توزیع الکترون برای پالس لیزر با زمان های خیزش کوتاه را افزایش می دهد. در واقع، رفتار تابع توزیع انرژی با افزایش مقدار چگالی تغییر نمی کند. در مقابل، برای پالس لیزر با زمان خیزش بلندتر، با افزایش چگالی، تابع توزیع انرژی الکترون ها تغییر می کند. در این حالت، وقتی چگالی به $n_{cr} = 0.3$ می رسد، سازوکار بر هم کنش از آشوب تغییر کرده و به دلیل برآورده شدن معیار مندونکا، به دلیل شکستن موج غیر خطی، به سازوکار تصادفی تغییر می یابد. در حقیقت، در این چگالی بالا، دامنه نوسانات چگالی قوی باعث ایجاد موج پلاسمای قوی می گردد.

¹ Mendonca

۶. مراجع

1. Strickland, D. and G. Mourou. Optics communications, 1985. **56**(3): p. 219-221.
2. Mourou, G.A., C. Barty, and M.D. Perry. 1997, Lawrence Livermore National Lab., CA (United States).
3. d'Humières, E., et al., Physics of plasmas, 2005. 12(6): p. 062704.
4. Khalilzadeh, E., A. Chakhmachi, and J. Yazdanpanah. Optik, 2020. 218: p. 165249.
5. Andreev, N., et al. Plasma Physics Reports, 2000. 26(11): p. 947-959.
6. Kumar, P., et al.. Physics of Plasmas, 2019. 26(8): p. 083106.
7. Desforges, F., et al., Physics of Plasmas, 2014. 21(12): p. 120703.
8. Sheng, Z.-M., et al., Physical review letters, 2002. 88(5): p. 055004.
9. Sheng, Z.-M., et al., Physical Review E, 2004. 69(1): p. 016407.
10. Khalilzadeh, E., A. Chakhmachi, and J. Yazdanpanah, Laser and Particle Beams, 2017. 35(2): p. 265-273.
11. Maldonado, E.P., et al. in 2019 SBFoton International Optics and Photonics Conference (SBFoton IOPC). 2019. IEEE.