

بهبود جذب انرژی لیزر در شتابدهی پروتون در مکانیسم TNSA با ایجاد پیش پلاسما

INC29-1216

فاطمه عزیزیان^۱، علی حسن بیگی^۱، محمدجعفر جعفری^۲، سمیه رضائی^۲

۱. گروه پلاسما پزشکی دانشکده فیزیک، دانشگاه خوارزمی، تهران-ایران

۲. پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران-ایران

چکیده:

بهبود عملکرد شتابدهی باریکه پروتونی تولیدشده طی برهم‌کنش پالس لیزری شدت بالا باهدف میکرومتری از جمله تلاش‌های کلیدی محققان این حوزه در دو دهه اخیر بوده است. در این میان مکانیسم شتابدهی از پشت هدف با میدان غلافی (TNSA) به لحاظ تجربی ساده‌تر و عملی هست در این پژوهش با تمرکز بر روش TNSA میزان جذب انرژی لیزر در برهم‌کنش با دو هدف با چگالی ثابت و مورد دوم هدف با یک چگالی ثابت جفت شده به یک‌لایه با پروفایل چگالی نمایی در جلوی آن با ابزار شبیه‌سازی دوبعدی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد میزان جذب انرژی لیزر به الکترون‌ها در حالت دوم به مراتب بیشتر از حالت هدف با چگالی ثابت است؛ که این امر موجب بهبود عملکرد شتابدهی پروتونی می‌شود.

کلیدواژه‌ها: انرژی قطع پروتون، پیش پلاسما، جذب لیزر، شتابدهی لیزری پروتون

Improvement of laser energy absorption in proton acceleration with TNSA mechanism by creating pre-plasma

Fatemeh Azizian¹, Ali Hasan Bygy¹, Mohammad Jafar Jafari², Somayeh Rezaei²

1- Plasma Medicine of Faculty of Physics, Kharazmi University, Tehran, Iran

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

Abstract:

Improving the proton beam acceleration performance produced during the interaction of a high-intensity laser pulse with a micrometer target has been one of the key efforts of researchers in the last two decades. Meanwhile Target Normal Sheath Acceleration (TNSA) is the most convenient mechanism empirically. In this research, focusing on the TNSA method, the amount of laser energy absorption within the interaction with two targets have been studied with a 2D simulation tool. The first a target with a constant density and the second case a target with a fixed density coupled to a layer with an exponential density profile in front. The results show that the amount of laser energy absorbed by electrons in the second state is much higher than the case with constant density. This will improve the performance of proton acceleration as well.

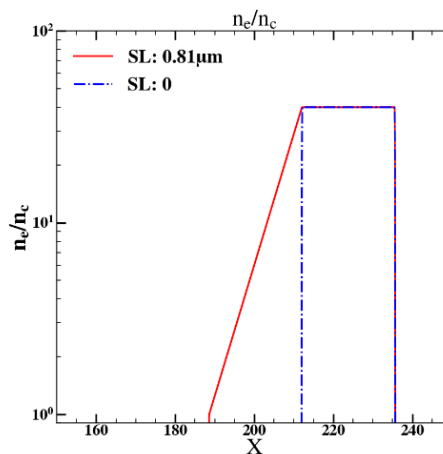
Keywords: Proton cut off energy, Pre-plasma, laser absorption, Laser acceleration of proton

۱. مقدمه

تولید باریکه پروتونی بانرژی چندین مگا الکترون‌ولت کاربردهای وسیعی در زمینه صنعت و پزشکی دارد [۱]. پس از مشاهده اولین نتایج تجربی در آزمایشگاه‌ها [۲] محققان بر آن شدند تا مدل تئوری و تحلیلی حاکم بر مکانیسم‌های شتابدهی پروتون را ارائه دهند. در این میان رایج‌ترین و ساده‌ترین (به لحاظ چیدمان تجربی) مدل معروف به مکانیسم شتابدهی از پشت هدف با میدان غلافی^۱ است [۳]. به صورت ساده در این روش، با برهم‌کنش پالس لیزر باهدف جامد الکترون‌های داغ تولید می‌شود. این الکترون‌ها در مسیر خود در طول هدف موجب یونیزه شدن هدف شده و با ایجاد یک میدان ناشی از جدایی بار در پشت هدف موجب شتابدهی پروتون‌ها از پشت هدف می‌شوند. مطالعات تئوری، شبیه‌سازی و تجربی [۴] زیادی بر روی این مکانیسم باهدف بهبود کیفیت باریکه پروتونی و نیز افزایش انرژی آن صورت گرفته است. مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تقویت میدان الکتروستاتیکی ایجادشده که مسئول شتابدهی می‌باشد؛ توزیع چگالی و انرژی الکترونی و هندسه هدف است [۵]. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد با اعمال یک پلاسما با چگالی نزدیک بحرانی در جلوی هدف می‌توان بازده جذب انرژی لیزر را بهینه کرد. در این پژوهش باهدف انجام کامل شبیه‌سازی‌های دوبعدی، جذب انرژی لیزری با ایجاد یک پیش پلاسما در هدف جامد مطالعه و بررسی شده است. این مطالعه در راستای بررسی کامل اثر هندسه هدف در عملکرد شتابدهی پروتون در مکانیسم TNSA و به‌عنوان اولین مرحله صورت گرفته است.

۲. روش کار

در این کار از کد شبیه‌سازی اسمایل [۶] با نسخه دوبعدی ۷/۴ برای انجام شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است. هدف بررسی اثر پیش پلاسما در جذب انرژی لیزر و نیز شتاب پروتونی در برهم‌کنش پالس شدت بالا با فویل آلومینیومی است. به همین خاطر از دو هدف با چگالی شبه پله‌ای (با ضخامت سه در بیست میکرومتر) و نیز هدف کوپل شده با یک پیش پلاسما (با ضخامت شش در بیست میکرومتر) با پروفایل نمایی و طول مقیاس ۰/۸۱ میکرومتر استفاده و نتایج به‌دست‌آمده باهم مقایسه شده است. شکل ۱ پروفایل چگالی الکترونی (و یونی) به کار گرفته‌شده در شرایط اولیه شبیه‌سازی‌ها را نشان می‌دهد. یک‌لایه هیدروژنی با ضخامت ۵۰ نانومتر به پشت هدف جفت شده است.



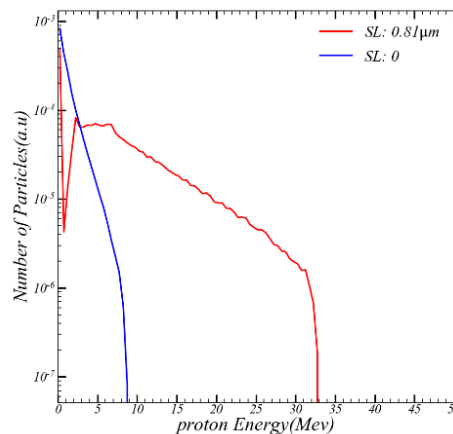
شکل ۱. هندسه (با محور لگاریتمی) هدف به کار گرفته‌شده در شرایط اولیه کد شبیه‌سازی. نمودار آبی‌رنگ یک هدف ایده آل (شبه پله‌ای) و نمودار قرمز رنگ برای حالتی است که پیش پلاسمای ایجادشده در هدف در نظر گرفته می‌شود.

¹ Target Normal Sheath Acceleration

پالس لیزر با قطبش P و با تابش عمود بر سطح هدف تابیده می‌شود. هدف از دولایه فویل آلومینیوم (با ضخامت ۳ میکرومتر) و یک‌لایه نازک هیدروژن (با ضخامت ۵۰ نانومتر) تشکیل شده است. پالس لیزر با پروفایل زمانی \sin^2 و مکانی گاوسی با $FWHM = 25fs$ پهنای باریکه ۳ میکرومتر و طول موج ۰/۸ میکرومتر در راستای ایکس منتشر می‌شود. پارامتر بدون بعد شدت لیزر برابر $a_0 = 10$ است. همچنین جعبه شبیه‌سازی با اندازه ۱۰۰ در ۲۰ میکرومتر و طول هر سلول ۰/۰۷ میکرومتر (به منظور تفکیک لایه هیدروژنی) در نظر گرفته شده است. چگالی الکترونی به کار گرفته شده مطابق با شکل ۱ (بیشینه $4 \cdot n_c$) و چگالی الکترونی و یونی هیدروژن در هر دو حالت $4n_c$ در نظر گرفته شده است.

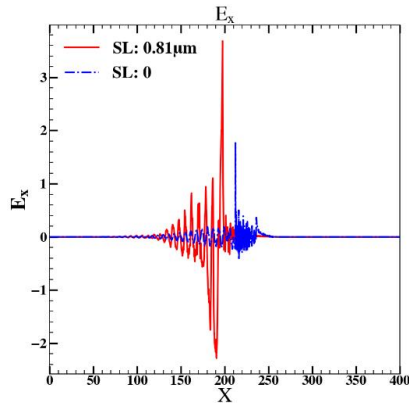
۳. بحث

به منظور مطالعه شتابدهی پروتون طیف انرژی پروتونی برای هر دو حالت هدف به کار گرفته شده در شکل ۲ رسم شده است. از این شکل مشاهده می‌شود که انرژی قطع پروتون (بیشینه انرژی) در حالتی که از هدف با پیش پلازما استفاده شده است تا بیش از سه برابر نسبت به هدف جامد و شبه پله‌ای افزایش می‌یابد. از آنجاکه پروتون‌های پشت هدف در میدان غلافی ایجاد شده توسط جدایی بار شتاب می‌گیرند لذا علت این امر را باید در شدت میدان طولی و نیز توزیع انرژی الکترونی جستجو کرد.

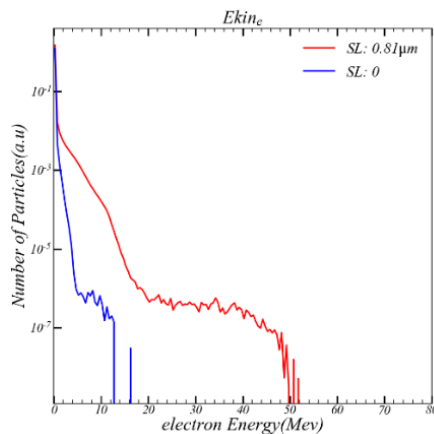


شکل ۲. توزیع انرژی پروتون در دو حالت هدف با چگالی ثابت و هدف با چگالی نمایی در جلوی آن در انتهای زمان شبیه‌سازی (۱۳۰۰ فمتوثانیه)

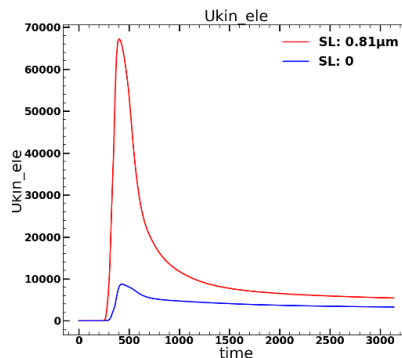
در شکل ۳ میدان الکتریکی طولی ایجاد شده در پشت هدف برای هر دو حالت هدف شبه پله‌ای و نیز هدف با پیش پلازما رسم شده است. با مقایسه دامنه میدان در هر دو حالت مشخص می‌شود که شدت میدان ایجاد شده وقتی چگالی پلازما به صورت نمایی به بیشینه می‌رسد قوی‌تر از حالتی است که پالس لیزر با یک هدف شبه پله‌ای مواجهه می‌شود. از آنجاکه میدان غلافی توسط باریکه الکترون‌های داغ تولید می‌شود از شکل ۳ چنین نتیجه می‌شود که دمای الکترونی در حالت پلازما با پروفایل نمایی، به مراتب بیشتر از دمای الکترون‌ها در حالت هدف شبه پله‌ای است.



شکل ۳. میدان الکتروستاتیکی (E_x) ایجاد شده در پشت هدف، در برهم‌کنش پالس لیزر با دو هدف پله‌ای و نمایی در زمان ۱۴۰ فمتوثانیه. شکل ۴ طیف انرژی الکترونی را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است انرژی الکترون‌ها در حالتی که هدف فویل آلومینیومی با پروفایل نمایی استفاده می‌شود بسیار بیشتر از هدف پله‌ای است. به‌علاوه عکس شیب لگاریتمی طیف انرژی نمایانگر دمای میانگین جمعیت الکترونی است که از شکل ۴ این مقدار برای هدف نمایی بیشتر از هدف پله‌ای است.



شکل ۴. توزیع انرژی الکترونی در برهم‌کنش پالس لیزر با دو هدف پله‌ای و نمایی در لحظه ۱۴۰ فمتوثانیه. همچنین شکل ۵ میزان جذب انرژی الکترونی (انرژی جنبشی) را برای هر دو حالت نشان می‌دهد که از این نمودار نیز بازدهی جذب انرژی لیزر در حالت هدف با پروفایل نمایی تا چندین مرتبه بزرگ‌تر از حالت بدون پیش‌پلازما مشاهده می‌شود.



شکل ۵. پروفایل زمانی انرژی جنبشی الکترونی در برهم‌کنش پالس لیزر با دو هدف پله‌ای و نمایی.

نکته حائز اهمیت در این کار توجه به این موضوع است که پیش پلاسمای استفاده شده در حالت دوم به صورت طبیعی در آزمایشگاه‌ها با حضور یک پیش پالس قبل از اعمال پالس اصلی لیزری، همواره در نتایج تجربی اثرگذار است. مگر اینکه پالس لیزری به کار گرفته شده بسیار تمیز (با کانتراست بالا) باشد؛ و در این کار صرفاً به شبیه‌سازی اثر حضور این پیش پلاسمای و تأثیر آن در جذب انرژی لیزری پرداخته شده است علت این امر را می‌توان این‌چنین بیان کرد. با برخورد پالس لیزر پر شدت با پلاسمایی که پروفایل چگالی آن به صورت نمایی افزایش می‌یابد نفوذ و انتشار پالس در هدف بیشتر از حالتی است که پالس لیزر با یک پلاسمای با چگالی پله‌ای برخورد می‌کند. به همین دلیل جذب انرژی لیزر نیز افزایش یافته و در نهایت عملکرد شتابدهی پروتونی در این حالت بهبود می‌یابد.

۵. نتیجه‌گیری

طی بهمکنش پالس لیزر شدت بالا باهدف نازک (میکرومتری) باریکه یونی از پشت هدف شتاب می‌گیرد. تلاش برای بهبود انرژی و مشخصات باریکه پروتونی از جمله پیشرفت‌های این حوزه است. هندسه هدف به‌کاررفته در چیدمان آزمایشی یک پارامتر کلیدی در این مکانیسم است. لذا در این کار با ابزار شبیه‌سازی دوبعدی ذره‌ای عملکرد شتابدهی پروتون در مکانیسم TNSA برای وقتی که هدف یک فویل الومینیومی با چگالی ثابت و حالتی که پروفایل چگالی به صورت نمایی (در جلوی هدف) تغییر می‌کند بررسی و شبیه‌سازی شده است. یکی از راه‌های تقویت میدان الکتروستاتیکی که مسئول شتابدهی است، بهبود بازدهی جذب انرژی لیزری توسط الکترون‌ها است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد، جذب انرژی الکترون‌ها وقتی پالس لیزر با یک هدفی که در آن چگالی به صورت هموار و نرم افزایش می‌یابد تا چندین مرتبه نسبت به حالتی که با یک هدف با چگالی تیز برخورد می‌کند افزایش می‌یابد. در نتیجه میدان غلافی تولید شده در حالت اول قوی‌تر و بنابراین انرژی پروتون‌های شتاب گرفته در این حالت افزایش می‌یابد.

۶. مراجع

1. Radziemski, L.J. Lasers-induced plasmas and applications. 2020: CRC Press.
2. Snavely, R. et al. Intense high-energy proton beams from petawatt-laser irradiation of solids. Physical review letters, 2000. 85(14): p. 2945.
3. Wilks, S. et al. Energetic proton generation in ultra-intense laser-solid interactions. Physics of plasmas, 2001. 8(2): p. 542-549.
4. Zimmer, M. et al. Analysis of laser-proton acceleration experiments for development of empirical scaling laws. Physical Review E, 2021. 104(4): p. 045210.
5. Hatchett, S.P. et al. Electron, photon, and ion beams from the relativistic interaction of Petawatt laser pulses with solid targets. Physics of Plasmas, 2000. 7(5): p. 2076-2082.
6. Derouillat, J. et al. Smilei: A collaborative, open-source, multi-purpose particle-in-cell code for plasma simulation. Computer Physics Communications, 2018. 222: p. 351-373.