

کاهش پراکندگی‌های پارامتریک القایی از هدف تحت تابش لیزر در گداخت محصورسازی اینرسی

آمنه کارگریان *

پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، ۵۱۱۱۳-۱۴۳۹۹، تهران، ایران

چکیده:

در گداخت به روش محصورسازی اینرسی (ICF)، نور لیزر پراکنده شده از هدف تحت تابش قرار گرفته انرژی اتلافی است که توسط هدف جذب نمی‌شود. این انرژی نه به اشعه ایکس تبدیل شده و نه برای انفجار مستقیم هدف استفاده می‌شود. بنابراین، ضروری است که پراکندگی‌های پارامتریک القایی تا جای ممکن کاهش داده شوند. از این رو، در این مقاله با استفاده از روش شبیه‌سازی ذره‌ای پلاسما پراکندگی‌های پارامتریک القایی و جذب لیزر در سیستم برهم‌کنش لیزر-هدف را مورد بررسی قرار داده‌ایم. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد افزودن مقدار مشخصی از یون‌های سبک به هدف، پراکندگی‌های القایی شده از هدف را تا میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد و بنابراین جذب انرژی لیزر توسط هدف به حداکثر مقدار افزایش می‌یابد. نتایج بدست آمده در این مقاله ارتباط مستقیمی با کارهای تجربی انجام شده در زمینه برهم‌کنش لیزر-پلاسما با کاربردهایی نظیر گداخت به روش محصورسازی اینرسی و همچنین گرمایش پلاسما دارد.

کلیدواژه‌ها: گداخت محصورسازی اینرسی، پراکندگی القایی، جذب لیزر

Reduction of stimulated parametric scatterings from laser irradiated-target in ICF

A. Kargarian *

Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, 14399-51113, Tehran, Iran

Abstract:

In inertial confinement fusion (ICF) applications, the backscattered laser light is wasted energy which is not absorbed by target. This energy neither converted to x rays nor used to directly implode the target. Therefore, it would be highly desirable to limit stimulated scatterings. Because of this consideration, in this paper, we apply the particle-in-cell simulation method to investigate the stimulated parametric scattering and laser absorption. The simulation results show that adding a specified amount of light ions to the target reduces the stimulated scatterings from the target and so the laser energy absorption by target increases to a maximum value. The obtained results in this paper have direct relevance to the experiments on the laser-plasma interaction with applications to the fast ignition concept as well as the plasma heating.

Keywords: Inertial confinement fusion, Stimulated scattering, Laser absorption

Email: akargarian@aeoi.org.ir

۱. مقدمه

در گداخت به روش محصورسازی اینرسی (ICF)، به دلیل شدت بالای لیزر، در نظر گرفتن پدیده‌های غیرخطی در برهم‌کنش لیزر با پلاسمای ایجاد شده از هدف را نمی‌توان نادیده گرفت [۱، ۲]. فرآیند پراکندگی لیزری یک فرآیند غیرخطی قابل توجه است که نقش اساسی در جذب انرژی لیزر به یک هدف تحت تابش لیزر را دارد. در روش ICF، نور لیزر پراکنده شده انرژی اتلاف شده‌ای است که توسط هدف جذب نمی‌شود. این انرژی نه توسط لیزر (به صورت غیرمستقیم) به اشعه X تبدیل می‌شود و نه برای انفجار مستقیم هدف (به صورت مستقیم) استفاده می‌شود. بنابراین، اتلاف انرژی از این طریق باید با افزایش شدت لیزر جبران شود که مقرون به صرفه نمی‌باشد. در این راستا، برخی از مکانیزم‌های وابسته به ترکیبات پلاسمای برای به حداقل رساندن انرژی پراکنده شده و به حداکثر رساندن مقدار انرژی لیزر برای تبدیل به اشعه ایکس یا جذب انرژی توسط هدف مورد بحث قرار گرفته‌اند. در حقیقت، پراکندگی‌ها ناپایداری-هایی هستند که در آن با برخورد شدید نور لیزر بر روی یک هدف جامد، نور لیزر به یک موج پراکنده و یک موج الکترواستاتیک تبدیل شود. ایجاد این ناپایداری‌ها به تطابق فرکانس و عدد موج نیاز دارند که مربوط به بقای انرژی و اندازه حرکت است. مهمترین فرایندهای غیرخطی در این زمینه ناپایداری‌های پارامتریک سه موجی هستند که شامل پراکندگی رامان القایی (SRS)، پراکندگی بریلوئن القایی (SBS)، ناپایداری دو پلاسمونی، و ناپایداری رشته‌ای می‌باشند [۳]. این ناپایداری‌ها می‌توانند به روش‌های مختلف جذب پالس لیزر را تضعیف کنند، به عنوان مثال، نور لیزر پراکنده شده از یک پلاسمای به دلیل پراکندگی رامان یا بریلوئن باعث افزایش بازتاب کلی در نتیجه کاهش جذب لیزر می‌شود. میرایی امواج الکترواستاتیک برانگیخته شده (موج یونی یا موج الکترونی) منجر به کاهش پراکندگی‌های القاشده و در نتیجه افزایش جذب لیزر می‌شود. با این حال، شرایط وقوع این ناپایداری‌ها متفاوت است. به طور خلاصه، SRS محدود به نواحی از پلاسمای با چگالی کوچکتر از یک چهارم چگالی بحرانی است و در چگالی برابر با یک چهارم چگالی بحرانی این پراکندگی غالب است در حالی که SBS می‌تواند در تمام چگالی‌های پلاسمای زیر چگالی بحرانی اتفاق بیفتد. درک و کنترل این ناپایداری‌ها برای بهینه‌سازی جایگزینی انرژی در اهداف گداخت اینرسی مهم است. در سال‌های اخیر، تحقیقات زیادی در محیط‌های پلاسمای با ترکیبات مختلف و در رژیم‌های مختلف پراکندگی (SRS و SBS) انجام شده است [۴-۷]. اگرچه برخی از روش‌ها به صورت نظری و تجربی برای کاهش پراکندگی‌ها از هدف تحت تابش لیزر در گداخت محصورسازی اینرسی پیشنهاد شده است [۸، ۹]، با این وجود، انتخاب رنج مناسب پارامترهای پلاسمای و لیزر و افزودن درصد مشخصی از یون‌های سبک برای کاهش پراکندگی لیزری و افزایش جذب انرژی در هدف نیازمند بررسی‌های کامل‌تر و دقیق‌تر می‌باشد. کاهش پراکندگی پارامتریک به این روش به منظور دستیابی به جفت‌شدگی هدف مؤثر در گداخت لیزری با طول مقیاس بزرگ و طول پالس بلند ضروری می‌باشد. نتایج تجربی به دست آمده در این زمینه با لیزر با شدت $I = 1.7 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ و پلاسمای با چگالی $n = 0.3 - 0.4 n_{cr}$ انجام شده است [۱۰]. در این مقاله، با استفاده از روش شبیه‌سازی ذره‌ای، نشان می‌دهیم با افزودن مقدار مشخصی از یون‌های سبک مانند هیدروژن و ایزوتوپ‌های آن به یک هدف جامد حاوی یون‌های سنگین، پراکندگی‌های القا شده از هدف تا میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد و بنابراین جذب انرژی لیزر توسط هدف افزایش می‌یابد.

۲. شبیه‌سازی ذره‌ای پلاسمای

در این مقاله، از یک کد شبیه‌سازی دوبعدی ذره‌ای (ذره در جعبه) [۱۱] برای بررسی پراکندگی‌های پارامتریک القایی و جذب انرژی لیزر در هدف جامد، استفاده شده است. در شبیه‌سازی ذره‌ای پلاسمای، چگالی ذرات بر روی یک شبکه مجازی به طریق وزن‌دهی محاسبه می‌شوند. سپس میدان الکتریکی با حل معادله پواسون بر روی نقاط شبکه به دست می‌آید. میدان الکتریکی شبکه از طریق درون‌یابی در محل ذرات محاسبه شده و تحول آنها را موجب می‌شود. از محدودیت‌های اساسی این روش آن است که معمولاً تعداد ذرات به کار رفته در آن‌ها چندین مرتبه کوچکتر از پلاسمای

واقعی است. برای رفع این محدودیت از مفهوم ابرذره استفاده می‌شود. این ذرات دارای جرم و باری چند برابر ذرات واقعی هستند و در حقیقت نماینده چند ذره می‌باشند. در این روش هر ذره مطابق با نیروی لورنتس اعمال شده توسط میدان‌های الکترومغناطیسی در موقعیت ذره حرکت می‌کند و تحول میدان‌ها نیز بر طبق معادلات ماکسول انجام می‌شود:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \frac{\vec{v}}{c} \times \vec{B}) \quad (۱)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 4\pi\rho \quad (۲)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \vec{j} \quad (۳)$$

$$-\vec{\nabla} \times \vec{E} = \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (۴)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (۵)$$

$$\vec{j}(\vec{x}) = \sum_{i=1}^N q_i v_i \delta(\vec{x} - \vec{x}_i) \quad (۶)$$

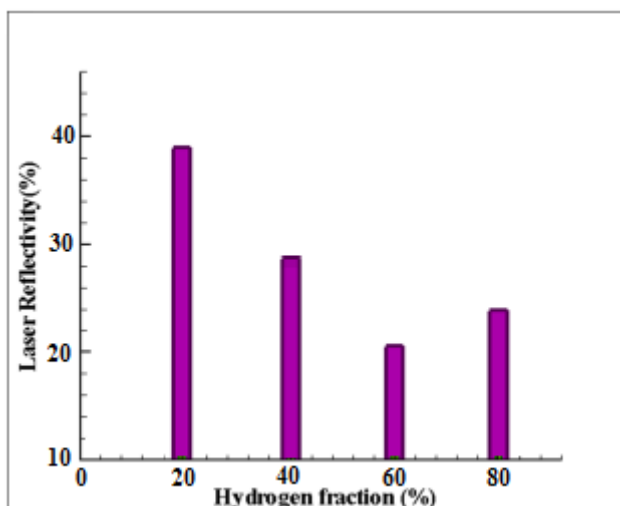
$$\rho(\vec{x}) = \sum_{i=1}^N q_i \delta(\vec{x} - \vec{x}_i) \quad (۷)$$

تمامی پارامترهای استفاده شده در این کد به پارامترهای مشخصه لیزر مانند طول موج و فرکانس لیزری بی‌بعد شده‌اند.

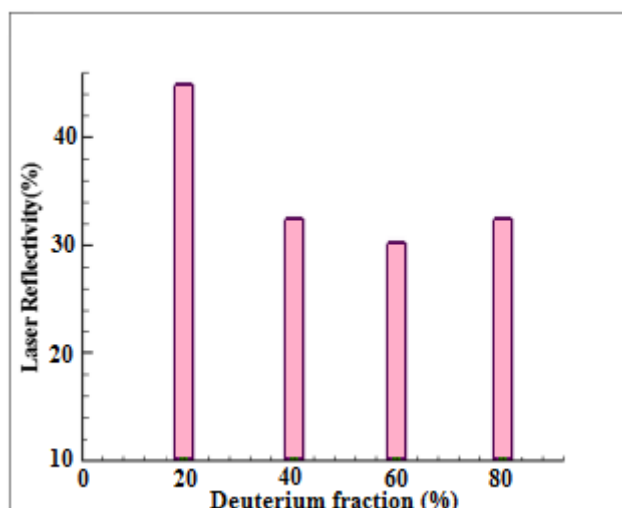
۳. نتایج شبیه‌سازی

پلاسمای در نظر گرفته شده یک پلاسما با چگالی $n < n_c$ می‌باشد که n_c چگالی بحرانی پلاسما است. ابعاد جعبه شبیه‌سازی به صورت $0 < x < 100$ و $10 < y < 50$ در نظر گرفته شده است. پالس لیزری با دامنه بدون بعد $a > 1$ ، که دارای میدان الکتریکی و مغناطیسی به ترتیب در راستای Y و Z می‌باشد، از روی مرز وارد جعبه شبیه‌سازی می‌شود. تعداد ابرذرات در نظر گرفته شده در این شبیه‌سازی ۶۴ می‌باشد. در اینجا، درصد یون سبک مناسب مورد نیاز برای رسیدن به حداکثر میزان کاهش پراکندگی و افزایش جذب لیزر در یک پلاسمای کربن را بررسی قرار داده‌ایم. برای یافتن شرایط بهینه، یون‌های سبک هیدروژن و دوتریم استفاده شده‌اند و میزان پراکندگی و همچنین جذب لیزر را با تغییر غلظت یون‌های هیدروژن و دوتریم در پلاسمای کربن بررسی کرده‌ایم. ابتدا چگالی پلاسما را $n = 0.5n_c$ و شدت لیزر را $a = 2$ در نظر گرفته‌ایم. شکل ۱ نمودار پراکندگی پارامتریک القایی از هدف تحت تابش بر حسب درصد‌های متفاوت یون‌های هیدروژن اضافه شده را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش یون‌های سبک هیدروژن تا میزان ۶۰ درصد موجب کاهش پراکندگی به مقدار قابل توجهی می‌شود. شکل ۲ نمودار پراکندگی القایی از هدف قرار گرفته تحت تابش لیزر را بر حسب درصد‌های متفاوت یون‌های دوتریم اضافه شده را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار، افزودن یون‌های دوتریم نیز موجب کاهش پراکندگی می‌شود. مقایسه شکل‌های ۱ و ۲ نشان می‌دهد افزایش یون‌های سبک هیدروژن نسبت به افزایش یون‌های سبک دوتریم تأثیر بهتری در کاهش پراکندگی‌های پارامتریک القایی دارد. با افزایش کسر غلظت یون‌های سبک، دامنه موج یون-صوت مربوط به یون سنگین که مد فرکانس پایین است، کاهش یافته و به کاهش پراکندگی بریلوئن القایی کمک می‌کند. حداکثر میزان کاهش پراکندگی هنگامی اتفاق می‌افتد که بیشینه رزونانس بین مدهای فرکانس بالای یون‌های سبک با مدهای فرکانس پایین یون‌های سنگین اتفاق بیفتد. پس از

این کاهش قابل توجه، با افزایش غلظت یون سبک، پراکندگی به آرامی افزایش می‌یابد که دلیل آن رشد پراکندگی در مدهای یون-صوت فرکانس بالا مربوط به یون‌های سبک می‌باشد.

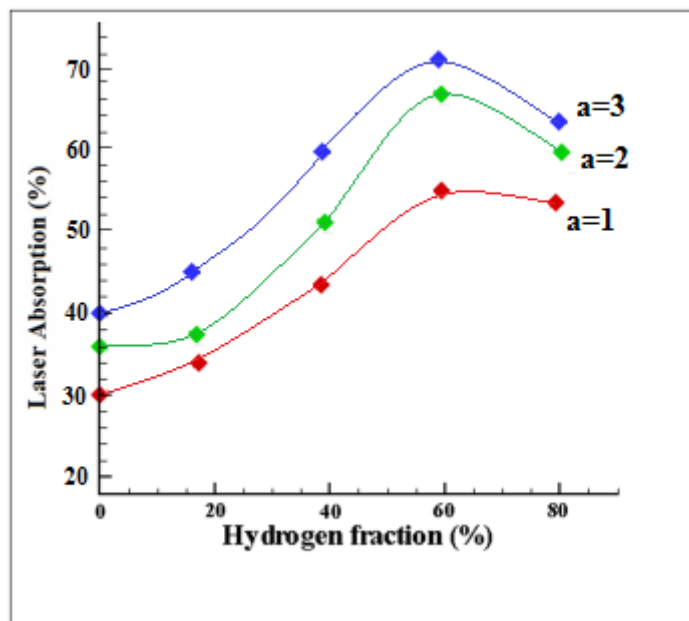


شکل ۱: نمودار پراکندگی لیزری بر حسب درصدهای مختلف یون‌های سبک هیدروژن به هدف تحت تابش لیزر



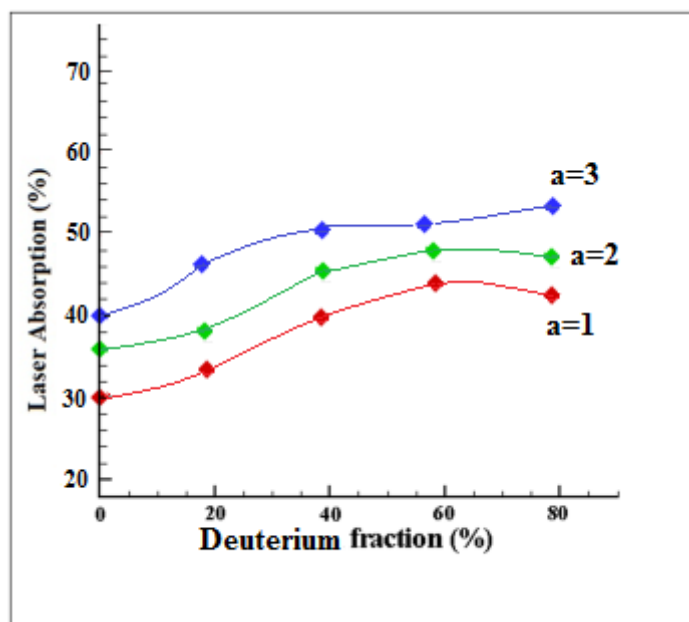
شکل ۲: نمودار پراکندگی لیزری بر حسب درصدهای مختلف یون‌های سبک دوتریم به هدف تحت تابش لیزر

انتظار داریم با کاهش پراکندگی پارامتریک القایی، انرژی لیزر صرف گرمایش هدف شده و جذب لیزر افزایش یابد. شکل ۳ نمودار جذب انرژی لیزر برای شدت‌های لیزری مختلف ($a=1, 2, 3$) را با افزودن یون‌های سبک هیدروژن نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش شدت لیزر جذب افزایش یافته است.



شکل ۳: نمودار جذب انرژی لیزر بر حسب درصدهای مختلف یون‌های سبک هیدروژن به هدف تحت تابش برای شدت‌های لیزری مختلف

شکل ۴ نیز نمودار جذب انرژی لیزر برای شدت‌های لیزری مختلف ($a=1, 2, 3$) را با افزودن یون‌های سبک دوتریم نشان می‌دهد. در این شکل نیز مشاهده می‌شود با افزایش شدت لیزر جذب افزایش یافته است. علاوه بر این، تأثیر افزایش یون‌های سبک بر روی جذب انرژی لیزر در هدف تحت تابش قرار گرفته بخوبی قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۴: نمودار جذب انرژی لیزر بر حسب درصدهای مختلف یون‌های سبک دوتریم به هدف تحت تابش برای شدت‌های لیزری مختلف

نمودارهای جذب در شکل‌های ۳ و ۴ نشان می‌دهند، برای شدت‌های لیزری بالا، افزایش یون‌های سبک هیدروژن تا میزان ۶۰ درصد موجب افزایش جذب تا مقدار تقریباً دو برابر نسبت به حالت بدون حضور یون سبک می‌گردد.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، با استفاده از روش شبیه‌سازی ذره‌ای پلاسما، به بررسی پراکندگی پارامتریک القایی و جذب لیزر در هدف تحت تابش قرار گرفته، پرداخته‌ایم. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد، با افزایش یون‌های سبک مانند هیدروژن و دوتریم به هدف شامل یون‌های سنگین، می‌توان تا میزان قابل توجهی پراکندگی پارامتریک القایی از پلاسمای ایجاد شده را کاهش داد. علاوه بر این، نشان دادیم با کاهش پراکندگی‌های القایی، میزان جذب انرژی لیزر در هدف تا مقدار قابل توجهی افزایش پیدا خواهد کرد. همچنین، با افزایش شدت لیزری، افزایش یون‌های سبک به هدف دارای تأثیر بهتری در کاهش پراکندگی و جذب لیزر خواهد بود. نتایج بدست آمده در این مقاله با آزمایش‌های انجام شده در زمینه برهم‌کنش لیزر-پلاسما با کاربردهایی نظیر گداخت به روش محصورسازی اینرسی و همچنین گرمایش پلاسما مرتبط می‌باشد.

۵. مراجع

1. S. C. Wilks, et al., Nonlinear Theory and Simulations of Stimulated Brillouin Backscatter in Multispecies Plasmas, Phys. Rev. Lett. 74, 5048, 1995.
2. J. Badziak, S. Jabłonski, and P. Rażczka, Highly efficient generation of ultraintense high-energy ion beams using laser-induced cavity pressure acceleration, Appl. Phys. Lett. 101, 084102, 2012.
3. S. Eliezer. The interaction of high-power lasers with plasmas. CRC press, 2002.
4. I. Alexeff, W. D. Jones, and D. Montgomery, Controlled Landau Damping of Ion-Acoustic Waves, Phys. Rev. Lett. 19, 422, 1967.
- 5 P. Neumayer, et al., Suppression of Stimulated Brillouin Scattering by Increased Landau Damping in Multiple-Ion-Species Hohlraum Plasmas, Phys. Rev. Lett. 100, 105001 (2008).
6. K. Hajisharifi, et al., Transition between laser absorption dominated regimes in carbon-based plasma. AIP Advances 7, no. 9, 095106, 2017.
7. B. D. Fried, et al., Ion Acoustic Waves in a Multi-Ion Plasma, Phys. Fluids 14, 2388, 1971.
8. E. Petersen, et al., Stimulated Brillouin scattering suppression with a chirped laser seed: comparison of dynamical model to experimental data. IEEE Journal of Quantum Electronics, 49, 1040-1044, 2013.
9. M. Salimullah, and M. H. A. Hassan. Relativistic stimulated Brillouin and Raman scattering in a laser-produced plasma. Physical Review A, 41, 6963, 1990.
10. R. Giles, et al., Reduced Brillouin scattering from multiline CO₂ laser interaction with a plasma. Physical Review A, 26, (1982): 1113, 1982.
11. A. Kargarian, Particle energization by high-power laser pulse in a finite-size electron-positron-ion plasma. Laser Physics 30, no. 9, 096002, 2020.