



گسترش پلاسما در فرایند برهم کنش لیزر- هدف

امیرحسین فرهید*، مسعود افشاری، ابراهیم آقاباری

پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۳۶-۱۴۳۹۵، تهران - ایران

چکیده: در این مقاله رفتار پلاسما ناشی از برهم کنش تپ کانونی شده‌ی لیزر Nd:YAG با پهنای میانگین ۳۰ ns و انرژی ۱۴۰ mJ با هدف مس با استفاده از روش سایه‌نگاری مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. برای این منظور گسترش پلاسما در محیط هوا در محدوده‌ی فشاری ۷۶۰ تا 2×10^{-4} تور به کمک هماهنگ دوم لیزر با پهنای ۱۰ ns در طول موج ۵۳۲ nm مورد کاوش قرار گرفته است. ترکیب نتایج تجربی و مدل هیدرودینامیکی پلاسما نشان می‌دهد که برای فشار محیط ۱ اتمسفر، دما و فشار پلاسما در نخستین لحظات برهم کنش در نزدیکی سطح هدف به ترتیب، تا ۳۰ الکترون ولت و 7×10^4 اتمسفر افزایش می‌یابد. در این حالت، چگالی نسبی پلاسما حاصل در طی تپ برهم کنش حدود ۶ برابر چگالی هوا در فشار متعارفی است. با کاهش فشار محیط از ۷۶۰ تور به حدود ۵۰ تور، به تدریج موج ضربه‌ای به موج رقیق‌شدگی تبدیل می‌شود و برای فشارهای کم‌تر از ۰٫۱ تور تنها یک ناحیه‌ی چگال در نزدیکی سطح هدف با چگالی بیش از $3.94 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ قابل مشاهده است.

کلید واژه‌ها: برهم کنش لیزر- هدف، موج ضربه‌ای، موج رقیق‌شدگی، سایه‌نگاری، فشار سایش، مدل هیدرودینامیکی

Plasma Expansion in Laser-Target Interaction Process

A.H. Farahbod*, M. Afshari, E. Agayari

Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14395-836, Tehran - Iran

Abstract: In this paper, the behavior of temperature, density, velocity and pressure of the plasma shock front produced by the interaction of a focused Nd:YAG laser beam on a copper target, with an average pulsewidth of 30ns and 140mJ laser energy, have been studied using shadowgraphy technique. For this purpose, the plasma was examined in air at the pressure from 760 to 2×10^{-4} Torr by a laser probe beam of 10 ns pulsewidth at the wavelength of 532 nm. The results obtained from the measurements and by using the hydrodynamical model indicated that at atmospheric pressure the temperature and plasma pressure near the target surface increase up to 30 eV and 7×10^4 atm, respectively. The relative plasma density during the interaction time was found to be about 6 times of the air density at the normal atmospheric pressure. By decreasing the pressure from 760 Torr to 50 Torr the shock wave gradually converts to a rarefaction wave. For the pressure less than 0.1 Torr, only a dense region with an electron density higher than $\approx 3.94 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ near the target surface was observed.

Keywords: Laser-Target Interaction, Shock Wave, Rarefaction Wave, Shadowgraphy, Ablation Pressure, Hydrodynamical Model



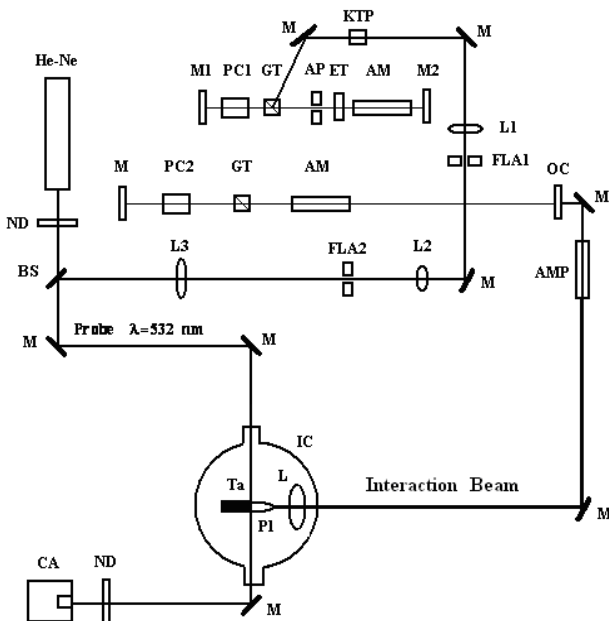
۱. مقدمه

۹۰ میلی ژول در تغییر است. برای افزایش بیش تر انرژی تا ۳۵۰ میلی ژول از تقویت کننده (AMP) ای به قطر ۹ میلی متر استفاده شده است. برای کاستن از پهنای طیفی نوسان گر، (کاستن از تعداد نوسان های طولی) از اتالن ET به ضخامت ۳ میلی متر و ضریب بازتابش ۲۰٪ برای هر سطح آن استفاده شده است. روزنه ی AP به قطر ۲/۵ میلی متر برای بهبود کیفیت فضایی باریکه ی خروجی نوسان گر و حذف شیوه های عرضی مراتب بالا به کار رفته است. برای افزایش کیفیت فضایی باریکه ی کاوشی و هم چنین افزایش قطر باریکه برای پوشش دادن تمام مقطع پلاسما با پرتو لیزر، از عدسی L۱ به همراه صافی فضایی متشکل از دو عدسی L۲ و L۳ به ترتیب، با فاصله ی کانونی ۳۷/۵ و ۵۰ سانتی متر و روزنه ی FLA۲ به قطر ۰/۴ میلی متر استفاده شده است. باریکه ی تقویت شده به کمک عدسی L با فاصله ی کانونی ۷/۵ سانتی متر که در درون محفظه ی برهم کنش قرار دارد بر روی هدف Ta متمرکز می شود. هدف، صفحه ای مربعی شکل از جنس مس به ضلع ۲۰ و ضخامت ۳ میلی متر است که سطح آن در حد امکان پرداخت شده است. محاسبه نشان می دهد که

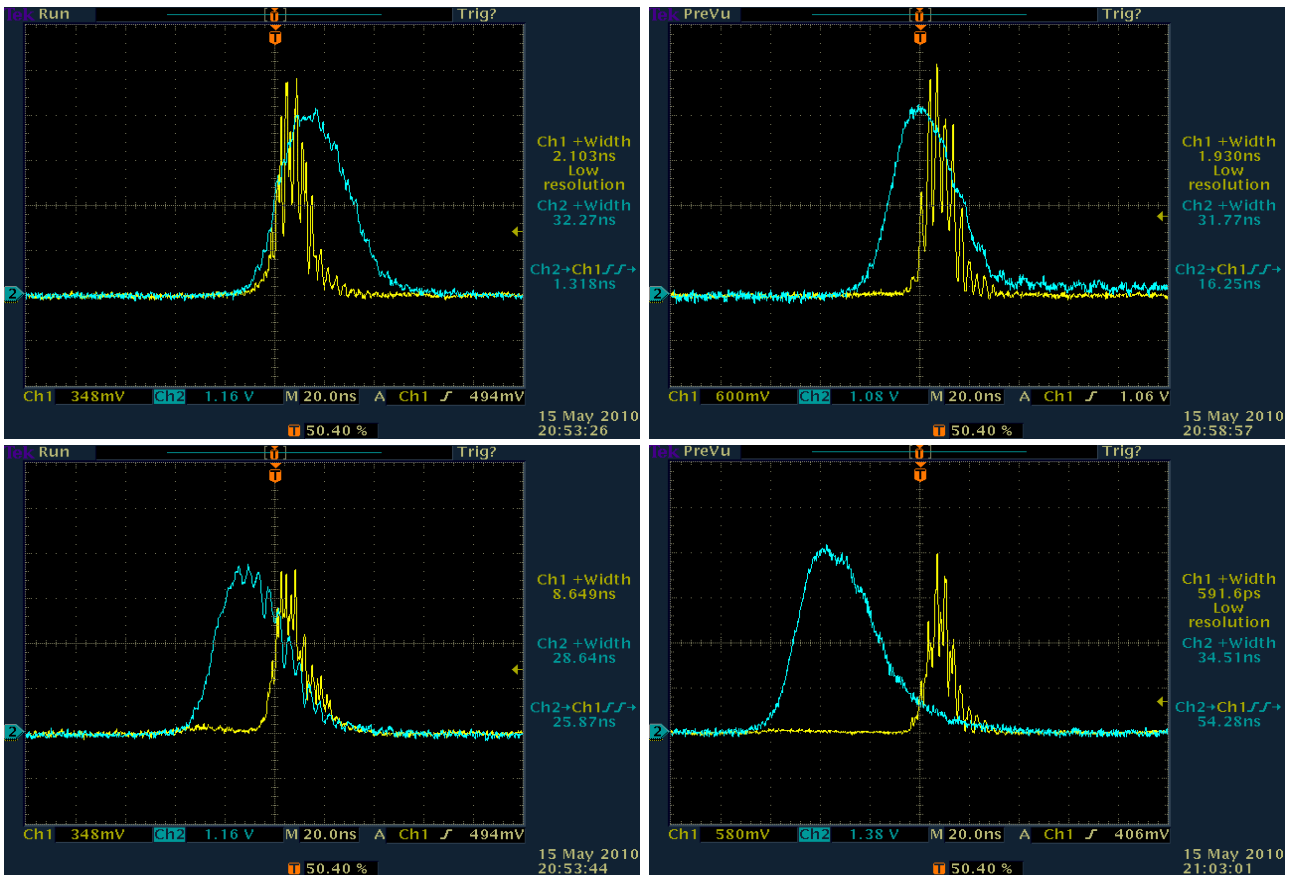
برهم کنش باریکه های پر شدت لیزر با هدف، با سایش سطح و گسترش ذرات در محیط اطراف هدف همراه است. این ساز و کار که معمولاً در محیط با فشار پایین مورد نظر است، با بروز پلاسما با چگالی کم تر یا در حد چگالی بحرانی در نزدیکی سطح هدف همراه است و در هم جوشی با روش محصور سازی لختی^(۱) حایز اهمیت فراوان می باشد [۱، ۲ و ۳]. از این رو استفاده از روش های اپتیکی نظیر تداخل سنجی و سایه نگاری برای مطالعه ی پلاسما با چگالی زیر بحرانی می تواند اطلاعات ارزشمندی را در رابطه با رفتار زمانی و فضایی پلاسما در ناحیه ی نزدیک سطح بحرانی به دست دهد [۴ و ۵]. در روش سایه نگاری، با اندازه گیری شیب ضریب شکست و یا سرعت انتشار موج ضربه ای^(۲)، می توان چگالی الکترونی و دمای پلاسما را محاسبه کرد [۵ تا ۸]. در این مقاله، پس از معرفی آرایش تجربی به کار رفته برای سایه نگاری پلاسما حاصل از برهم کنش لیزر- ماده، نتایج حاصل از سایه نگاری ارایه می شود. اندازه گیری دمای پلاسما و محاسبه ی فشار و چگالی ناشی از انتشار امواج هیدرو دینامیکی پس از برخورد باریکه ی لیزر به سطح هدف در هوا با فشار یک اتمسفر صورت گرفته است. هم چنین بررسی رفتار پلاسما و موج رقیق شدگی^(۳) در لحظه ی حداکثر فشار سایش برای فشار محیط از ۱ اتمسفر تا 2×10^{-4} تور به انجام رسیده است.

۲. آرایش تجربی

برای مطالعه ی پلاسما ناشی از برهم کنش لیزر- هدف، آرایش شکل ۱ مورد استفاده قرار گرفته است. این آرایش شامل دو نوسان گر Nd:YAG، و محفظه ی برهم کنش IC است که هدف Ta در درون آن قرار دارد. نوسان گر اول که از دو آینه ی تمام بازتابنده ی M1 و M2، سلول پاکل PC، قطبی کننده ی GT و محیط فعال AM تشکیل شده است، برای تولید باریکه های کاوش در طول موج ۵۳۲ نانومتر به کار می رود و قادر است به روش تخلیه ی کاواک^(۴) تپ های کوتاهی به پهنای 10 ± 2 ns تولید نماید. باریکه ی برهم کنشی نیز که از دیگر نوسان گر Nd:YAG به طول ۱۱۰ سانتی متر پدید می آید با روش سوئیچ Q فعال قادر است تپ های نسبتاً بلند لیزر با پهنای 30 ± 5 ns به وجود آورد. در شکل ۲ نمونه هایی از رفتار تپ خروجی دو نوسان گر مشاهده می شود. انرژی خروجی نوسان گر باریکه ی برهم کنشی بسته به نرخ دمش محیط فعال نوسان گر از ۴۵ تا



شکل ۱. آرایش تجربی برای مطالعه ی پلاسما ناشی از برهم کنش لیزر-هدف. M آینه ی تمام بازتابنده، OC آینه ی خروجی نوسان گر، ET اتالن، BS شکافنده ی پرتو، L عدسی، PC سلول پاکل، GT قطبی کننده ی گلن-تامسون، AM محیط فعال، AMP تقویت کننده، KTP بلور غیرخطی مبدل بسامد، IC محفظه ی برهم کنش، AP روزنه، FLA روزنه ی محدود کننده ی میدان، ND صافی تضعیف کننده ی اپتیکی، CA دوربین، Ta هدف، PI پلاسما ناشی از برهم کنش.



شکل ۲. نمونه‌هایی از رفتار زمانی تپ برهم‌کنشی و تپ کاوشی با پهنای میانگین ۳۰ و ۱۰ نانوثانیه. به ترتیب از بالا به پایین و از چپ به راست: با تأخیر زمانی ۱، ۳، ۲، ۹، ۲۵، ۳ و ۵۴ نانوثانیه‌ای تپ کاوشی نسبت به تپ برهم‌کنشی.

شیر سوزنی با مجرای خروجی منتهی به یک لوله موئین به قطر داخلی ۰/۴ میلی‌متر استفاده شده است.

۳. مدل محاسباتی

ویژگی‌های هیدرودینامیکی سیال در حضور امواج ضربه‌ای، به کمک معادلات زیر برای پیوستگی جرم، پایداری تکانه و انرژی و با در دست بودن معادله‌ی حالت برای سیال قابل محاسبه است [۹]

$$\rho_1 u_1 = \rho_2 u_2 \quad (1)$$

$$\rho_1 \left(u_1^2 + \frac{p_1}{\rho_1} \right) = \rho_2 \left(u_2^2 + \frac{p_2}{\rho_2} \right) \quad (2)$$

$$e_1 + \frac{1}{2} u_1^2 + \frac{p_1}{\rho_1} = e_2 + \frac{1}{2} u_2^2 + \frac{p_2}{\rho_2} \quad (3)$$

در این روابط، ρ_1 و ρ_2 چگالی جرمی، u_1 و u_2 سرعت حرکت سیال و p_1 و p_2 فشار در دو سوی مرز جدایی دو محیط e_1 و e_2 انرژی درونی سیال بر واحد جرم است.

حداکثر شدت در نقطه‌ی کانونی عدسی در حدود 1×10^{11} وات بر سانتی‌متر مربع است. در این حالت، قطر لکه‌ی کانونی شده‌ی لیزر بر روی هدف حدود ۰/۱ میلی‌متر می‌باشد. برای برقراری هم‌زمانی لازم میان تپ‌های نوسان‌گر کاوشی و برهم‌کنشی، سلول‌های پاکل هر دو نوسان‌گر به کمک یک راه‌انداز سریع تحریک می‌شوند. تنظیم لحظه‌ی تحریک سلول‌ها با لحظه‌ی دمش محیط‌های فعال لیزر با استفاده از سیستم الکترونیکی مناسبی امکان‌پذیر می‌شود تا تأخیر زمانی موردنظر و قابل تنظیم میان تپ برهم‌کنشی، تپ کاوشی و هم‌چنین علامت هم‌زمانی دوربین CA با تپ لیزر به وجود آید. باریکه‌ی سایه‌نگار از طریق یکی از پنجره‌های محفظه‌ی IC از درون پلاسمای حاصل از برخورد لیزر با هدف عبور کرده و از پنجره‌ی دیگر محفظه و از طریق آینه‌ی تمام بازتابنده به سمت دوربین هدایت می‌شود. فشار درون محفظه‌ی IC را می‌توان به کمک مجموعه‌ی پمپ چرخشی و توربومولکولی تا حدود 5×10^{-6} توئیت کاهش داد. برای تنظیم فشار درون محفظه با دقتی در حد 10^{-3} تور، از یک



در روابط (۵) تا (۸)، فشار برحسب اتمسفر، سرعت برحسب کیلومتر بر ثانیه، دما برحسب کلون و چگالی بهنجار شده به ρ_1 است.

فشار سایش، P_{abl} ، را نیز می توان با توجه به شدت باریکه‌ی لیزر، I ، و سرعت انتشار امواج صوتی به شکل زیر محاسبه کرد [۱۱]

$$I = \frac{E_{laser}}{\tau \pi W^2} \quad (۹)$$

$$P_{abl} = \frac{I}{2c_s} \quad (۱۰)$$

در رابطه‌ی (۹)، انرژی باریکه‌ی برهم کنشی $E_{laser} = 140 \text{ mJ}$ ، اندازه‌ی لکه در سطح هدف $2W = 2f\theta$ ، واگرایی باریکه‌ی برهم کنشی $\theta = 8 \text{ mrad}$ ، فاصله‌ی کانونی عدسی متمرکزکننده‌ی باریکه‌ی لیزر بر روی هدف $f = 7.5 \text{ cm}$ و پهنا‌ی تپ برهم کنشی $\tau = 30 \text{ ns}$ است. با قرار دادن مقادیر عددی در رابطه‌های (۹) و (۱۰) شدت در سطح هدف برابر $2.64 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$ و فشار سایش $P_{abl} \approx 35 \times 10^3 \text{ atm}$ به دست می آید.

۴. نتایج تجربی و تحلیل آن‌ها

نمونه‌ای از مجموعه تصاویر ثبت شده از سایه‌ی پلاسما در شکل ۳ آمده است. در این تصاویر، روند تغییرات ضریب شکست پلاسما و انتشار موج ضربه‌ای از محل برخورد باریکه برهم کنشی به هدف که در سمت راست تصاویر واقع شده است، تا ۲۳۰ نانوثانیه پس از لحظه‌ی برخورد باریکه‌ی لیزر با هدف مشاهده می شود. با تعیین مکان لبه‌ی نهایی موج ضربه‌ای در هر تصویر به کمک نرم افزار دوربین و معلوم بودن لحظه‌ی ثبت تصویر، سرعت انتشار موج در محیط قابل محاسبه است (شکل‌های ۴ و ۵). در تمام اندازه گیری‌ها میانگین انرژی لیزر ۱۴۰ میلی ژول و فشار درون محفظه‌ی برهم کنش ۱ اتمسفر است. به کمک نمودار ۴ و رابطه‌ی (۵) دمای پلاسما در مدل تک سیالی به دست می آید (شکل ۶). با معلوم بودن دما می توان چگالی سیال پلاسما در لبه‌ی موج ضربه‌ای را با استفاده از معادله‌ی (۸) و سپس فشار در لبه‌ی موج هیدرودینامیکی را با استفاده از معادله‌ی حالت (۷) محاسبه نمود. نتایج حاصل برای رفتار چگالی و فشار برحسب

موج ضربه‌ای سبب گسستگی فشار، چگالی و سرعت در لبه‌ی خود در حین انتشار موج می شود. با استفاده از روابط (۱) و (۲)، برای فشار در لبه‌ی موج ضربه‌ای رابطه‌ی زیر به دست می آید

$$p_2 = p_1 + \rho_1 u_1^2 \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right) \quad (۴)$$

که در آن، u_1 سرعت موج ضربه‌ای در محل گسستگی پلاسما و محیط بوده و $\rho_1 = 1.293 \text{ kg/m}^3$ ، $p_1 = 1 \text{ atm}$ برای اندازه گیری دمای پلاسما از راه مطالعه‌ی انتشار امواج ضربه‌ای در مرز جدایی پلاسما و محیط، معادله‌ی حالت هوا مورد نیاز است. برای این منظور از داده‌های زلدویچ و همکارانش [۱۰] استفاده شده است. از برازش داده‌های مذکور به توابعی با رفتاری نزدیک به رفتار سرعت انتشار موج اکوستیکی در پلاسما و گاز کامل، و معادله‌ی حالت گاز کامل، معادله‌های سرعت انتشار موج در هوا و معادله‌ی حالت به شکل زیر به دست آمد.

$$u = 0.01609 \times T^{0.67823} \quad (۵)$$

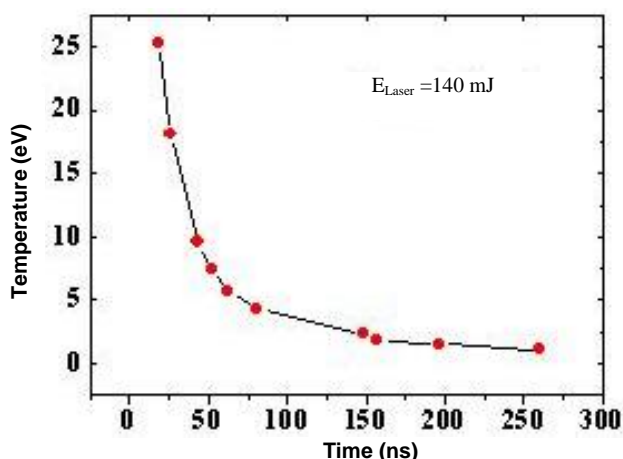
$$u = (1.4796 \frac{p}{\rho})^{0.45543} \quad (۶)$$

$$P = 4.3763 \times 10^{-5} (\rho T)^{1.4656} \quad (۷)$$

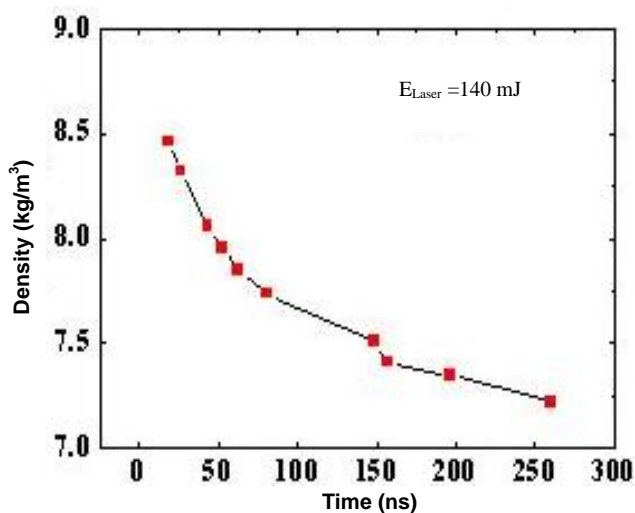
معادلات (۵) و (۶) به ترتیب به رابطه‌ی $c_s = \sqrt{\frac{2k_B T}{m_i}}$ برای سرعت موج یونی در درون پلاسما، و رابطه‌ی $c_s = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}}$ برای بستگی سرعت موج صوتی به فشار و چگالی در گاز کامل دو اتمی در یک فرایند بی درو شباهت زیادی دارند. k_B ثابت بولتزمن و $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ نسبت ظرفیت گرمایی در فشار ثابت به ظرفیت گرمایی در حجم ثابت است. دامنه‌ی اعتبار روابط (۵) تا (۷) در گستره‌ی دمایی، فشار و چگالی به ترتیب از ۲۹۳ تا 5×10^5 کلون، 1 تا 1.5×10^5 اتمسفر و تا ۱۱ برابر چگالی هوا در شرایط متعارفی است.

با حذف u و p میان روابط (۵)، (۶) و (۷)، معادله‌ی بستگی چگالی به دما برای هوا به شکل زیر حاصل می شود.

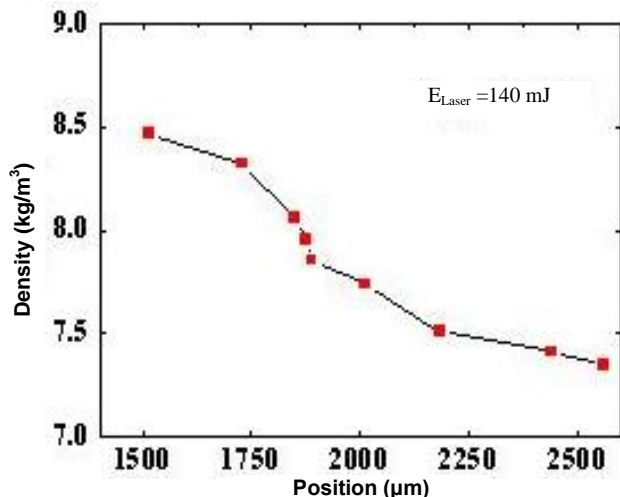
$$\rho = 3.45728 T^{0.0507} \quad (۸)$$



شکل ۶. رفتار زمانی دما در لبه موج ضربه‌ای. شرایط مشابه شرایط شکل ۴ است.

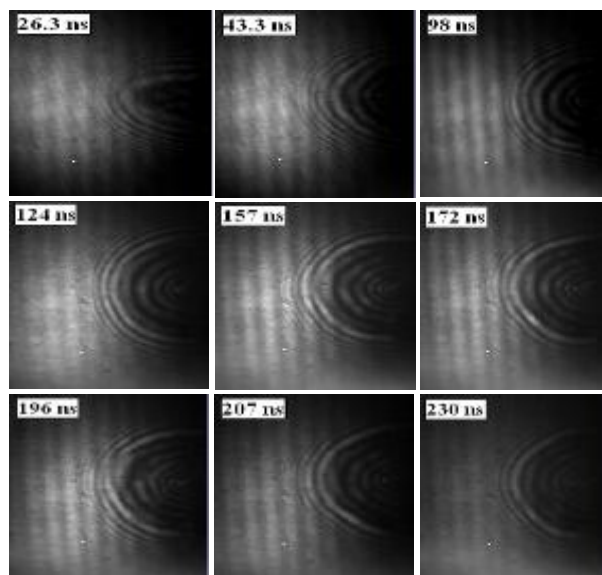


(a)

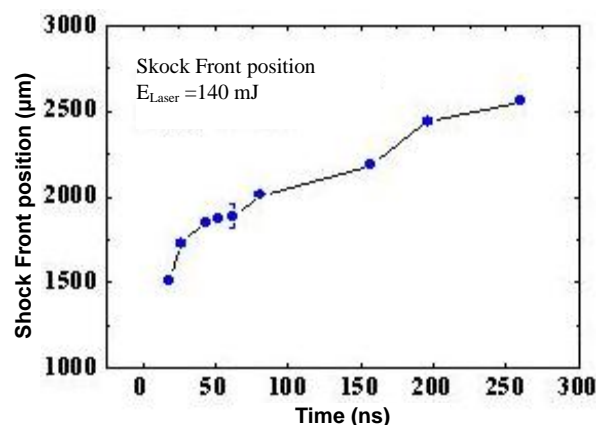


(b)

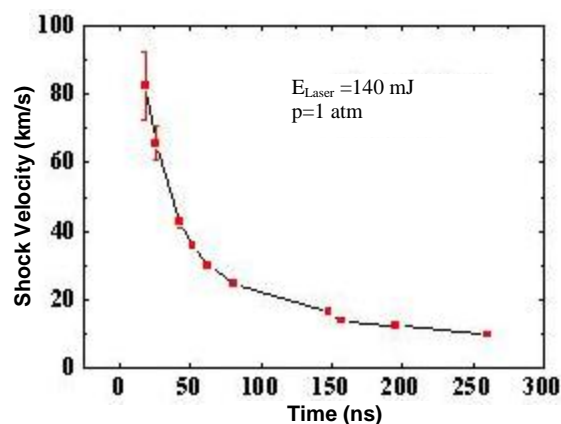
شکل ۷. تغییرات چگالی، (a) برحسب تأخیر زمانی میان باریکه‌های برهم‌کنشی و کاوشی، (b) برحسب موقعیت موج ضربه‌ای نسبت به سطح هدف. در هر دو حالت انرژی تپ برهم‌کنشی ۱۴۰ میلی‌ژول است.



شکل ۳. رفتار فضایی-زمانی سایه پلاسمای ناشی از برهم‌کنش لیزر-هدف در فشار ۱ اتمسفر، با شروع از لحظه ۲۶ نانوثانیه پس از برخورد باریکه‌ی لیزر با هدف تا ۲۳۰ نانوثانیه پس از آن. هدف صفحه‌ای از جنس مس است. میانگین انرژی و پهنای تپ باریکه‌ی لیزر به ترتیب، ۱۴۰ میلی‌ژول و ۳۰ نانوثانیه می‌باشد.



شکل ۴. رفتار زمانی مکان لبه موج ضربه‌ای نسبت به سطح هدف، تا حدود ۲۷۰ نانوثانیه پس از برخورد باریکه‌ی لیزر با هدف.



شکل ۵. تغییرات زمانی سرعت انتشار موج ضربه‌ای در پلاسما به ازای انرژی ۱۴۰ میلی‌ژول برای تپ برهم‌کنشی. جنس هدف مس و فشار محیط هوا ۱ اتمسفر است. شرایط همانند شرایط شکل ۴ است.

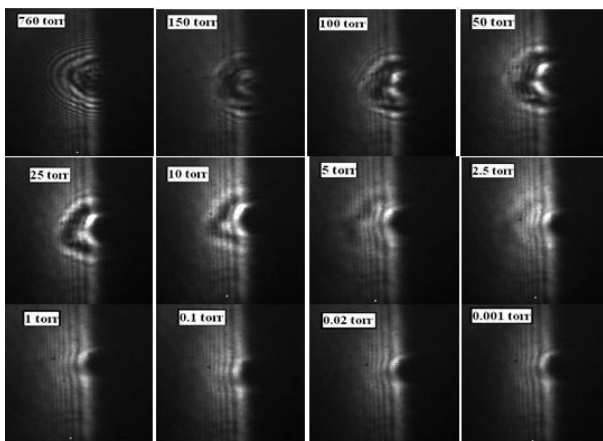


تور ملاحظه می شود. با کاهش فشار درون محفظه‌ی برهم کنش، سطح جدایی محیط و پلاسما تقارن فضایی خود را از دست داده و ناپایدار می شود. بروز ناپایداری ریلی-تیلور از فشار ۱۵۰ تا ۱۰ تور به وضوح در نیمه‌ی پایینی جبهه‌ی موج برای هر تصویر قابل مشاهده است. پلاسما با چگالی در حد چگالی بحرانی الکترون

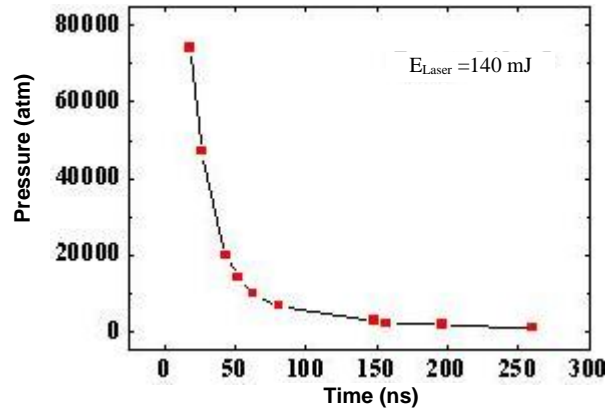
$$n_c = \left(\frac{\epsilon_0 m_e 4\pi^2 c^2}{e^2} \right) \frac{1}{\lambda_{probe}^2}$$

الکترون، c سرعت نور و ϵ_0 ثابت گذردهی خلاء) به صورت لکه‌ای تیره در سمت راست هر تصویر در محل برخورد لیزر با سطح هدف دیده می شود. باریکه‌ی کاوشی عبور از آن موضع را ندارد و در پلاسما جذب و پراکنده می شود. برای $\lambda_{probe} = 532 \text{ nm}$ چگالی بحرانی $n_c = 3.943 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ است.

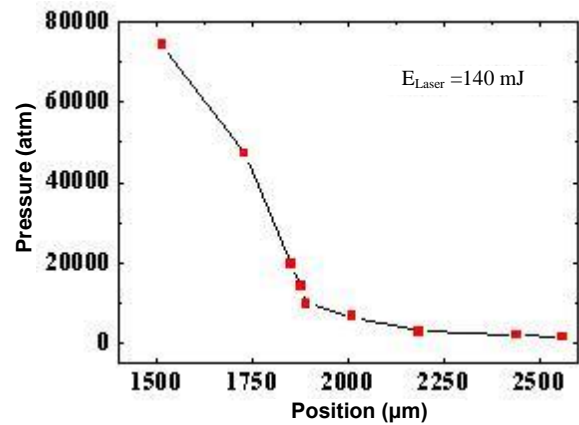
با کاهش فشار محیط، ناحیه‌ی نزدیک به سطح برخورد باریکه‌ی لیزر به هدف چگال تر می شود، زیرا با کاهش فشار محیط از چگالی ذرات اطراف سطح هدف کاسته می شود و انرژی کمتری صرف یونش مولکول‌های گاز و انتقال انرژی میدان لیزر به آن‌ها می گردد. با مقایسه‌ی روند تیره شدن موضع برخورد باریکه‌ی برهم کنشی برحسب کاهش فشار در تصاویر شکل ۹، افزایش چگالی در نزدیکی سطح سایش با کاهش فشار از ۷۶۰ تا ۵۰ تور به خوبی دیده می شود. تصاویر شکل ۹ نشان می دهند که با کاهش فشار به کم‌تر از ۰٫۱ تور، چگالی پلاسما در فاصله‌ی بیش از تقریباً $500 \mu\text{m}$ بسیار کم‌تر از آن است که سایه‌ی مشخصی از پلاسما قابل ثبت باشد و تنها ناحیه‌ی چگال با چگالی در حد n_c و بیش از آن در مجاورت سطح هدف به چشم می خورد.



شکل ۹. بستگی رفتار فضایی سایه‌ی پلاسما ناشی از برهم کنش لیزر-هدف مسی به فشار در لحظه‌ی ۲۵ نانوثانیه پس از برخورد. میانگین انرژی و پهنای تپ باریکه‌ی لیزر به ترتیب ۱۴۰ میلی ژول و ۳۰ نانوثانیه است. هدف در سمت راست هر تصویر قرار دارد. اثرات ناشی از پراش باریکه‌ی کاوشی از لبه‌ی هدف به صورت فریزهای موازی با سطح هدف در تصاویر مشاهده می شود.



(a)



(b)

شکل ۸. تغییرات فشار، (a) برحسب تأخیر زمانی میان باریکه‌های برهم کنشی و کاوشی، (b) برحسب موقعیت موج ضربه‌ای نسبت به سطح هدف. در هر دو حالت انرژی تپ برهم کنشی ۱۴۰ میلی ژول است.

زمان انتشار و موقعیت مکانی موج در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده‌اند. نمودارهای شکل ۷ نشان می دهند که کننده شدن ذرات از سطح هدف و انتشار آن‌ها در محیط سبب افزایش چگالی پلاسما تا حدود ۶ برابر چگالی هوا در نزدیکی سطح می شود. با گذشت زمان و انبساط پلاسما، فشار و چگالی کاهش می یابد. با کاسته شدن از فشار محیط، رفتار امواج به دلیل بروز ناپایداری‌های هیدرودینامیکی می توانند دستخوش تغییرات قابل توجهی شوند. تفاوت چگالی در سطح جدایی موج هیدرودینامیکی و محیط می تواند سبب رشد ناپایداری کلاسیک ریلی-تیلور با نرخ رشد $\gamma_{hydro} = \sqrt{Aak}$ برای هر شیوه‌ی نوسانی با عدد موجی فضایی k شود که A در آن عدد آتوود، $A = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$ و a شتاب سطح جدایی پلاسما و محیط است [۱۱]. در شکل ۹ رفتار امواج هیدرودینامیکی، ۲۵ نانوثانیه پس از برهم کنش لیزر-هدف در محدوده‌ی فشار محیطی ۷۶۰ تا 10^{-3}



References:

1. R.E. Kidder, Nuclear Fusion, 14, 797 (1974).
2. R.G. Evans, Can. J. Phys. 64, 893 (1986)
3. S. Nakai, K. Mima, Rep. Prog. Phys. 67, 321 (2004).
4. A.A. Ovsyannikov and M.F. Zhukov, "Plasma Diagnostics," Cambridge International Science Publishing (2005).
5. T.P. Hughes, "Plasmas and Laser Light," Adam Hilger (1975).
6. M. Thiyagarajan, J. Scharer, Journal of Applied Physics, 104, 013303 (2008).
7. M. Thiyagarajan, J. Scharer, IEEE Trans. Plasma Science, 36, 5, 2512 (2008).
8. G. Dodel, W. Kunz, Appl. Opt. 14, 10, 2537 (1975).
9. L.D. Landau, E.M. Lifshitz, "Fluid Mechanics," Addison-Wesley (1959).
10. Ya.B. Zeldovich, Yu.P. Raizer, "Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena," Vol. I, 211-213, Academic Press (1966).
11. S. Eliezer, "The Interaction of High-Power Lasers With Plasmas," IOP (2002).

۵. نتیجه گیری

مطالعه‌ی تحولات هیدرودینامیکی در نزدیکی سطح هدف پس از برخورد باریکه‌های لیزر به آن می‌تواند به کمک روش‌های اپتیکی صورت گیرد. سایه‌نگاری پلاسما در مقایسه با روش‌های کاملاً شناخته شده و مرسوم تداخل‌سنجی پلاسما از سادگی به مراتب بیش‌تر و عدم حساسیت به کیفیت طیفی باریکه‌ی کاوشی برخوردار است. در روش تداخل‌سنجی، طول کافی همدوسی، کیفیت فضایی نسبتاً خوب برای باریکه‌ی لیزر کائونده و کیفیت بالا برای سطوح اپتیکی تداخل‌سنج برای تشکیل فریزهای تداخلی کیفی، بسیار حایز اهمیت است. البته حساسیت روش تداخل‌سنجی هنگامی که با پلاسمای رقیق روبه‌رو هستیم بیش‌تر است و حداقل هنگامی که با شدت‌های کم‌تر از 10^{11} W/cm^2 و فشار کم‌تر از ۱ تور روبه‌رو هستیم، عملاً روش سایه‌نگاری در ثبت فرایندها سودمند نیست. با این وجود تلفیق اطلاعات به دست آمده از روش ثبت تصویر ناشی از تغییرات ضریب شکست در سایه‌نگار با معادلات هیدرودینامیکی و معادله‌ی حالت برای محیط انتشار امواج صوتی در فشار بیش از ۱ تور می‌تواند در تحلیل روند فرایندهای هیدرودینامیکی مرتبط با سایش سطح هدف ثمربخش باشد.

پی‌نوشت‌ها:

۱. Inertial Confinement Fusion
۲. Shock Wave
۳. Rarefaction Wave
۴. Cavity Dumping