نقش خصوصیات پالس اصلی یک لیزر دمش دو پالسی در بهره محیط فعال پلاسمایی لیزر پرتو ایکس نرم

غزاله غنی مقدم[۱]، امیرحسین فرهبد[۲]، سمیه رضایی[۲] و محمدجعفر جعفری[۲]

۱. قم، بلوار الغدیر، روبروی ورزشگاه یادگار امام، دانشگاه حضرت معصومه(س)
۲. تهران، سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته ای

چکیده - در این پژوهش تأثیر پارامترهای مختلف لیزر پالس اصلی دمش در بهره محیط فعال پلاسمایی لیزر پرتو ایکس نرم مطالعه شده است. به این منظور از لیزر دمش دو پالسی و کد هیدرودینامیکی *MED103* برای شبیه سازی محیط فعال ژرمانیوم شبه نئون در طول موج *nm* ۱۹/۶ استفاده شده است. با استفاده از یک لیزر پیش پالس بهینه و با تغییر پارامترهای پالس اصلی از قبیل شدت، انرژی و پهنای پالس، مشخصه‌های محیط فعال پلاسمایی و میزان یونش آن تعیین و سپس ضریب بهره محیط فعال محاسبه می شود. شبیه سازی‌ها نشان می‌دهند برای دستیابی به پلاسما با بیشینه بهره لیزر پرتو ایکس نرم، پالس اصلی لیزر دمش باید دارای پهنای بهینه ای باشد.

کلید واژه- برهمکنش لیزر-پلاسما، شبیه سازی هیدرودینامیکی، لیزر پرتوایکس نرم، محیط فعال پلاسمایی

Main pulse characteristics role of a pumped laser on the plasma active medium gain in the soft x-ray laser scheme

G. Ghani Moghadam[1], A.H. Farahbod[2], S. Rezaei[2], and M.J. Jafari[2]

1. Hazrat-e Masoumeh University, Qom, Iran.

2. Research school of plasma physics and nuclear fusion, NSTRI, North-Kargar, Tehran, Iran.

Abstract- In this work the effect of main pumped laser pulse parameters on the plasma active medium of a soft x-ray laser is studied. For this purpose we have used a double pulse pumped laser and MED103 hydrodynamic cod to simulate the Neon-like germanium active medium at the Wavelength 19.6 nm. Appling an optimized pre-pulse and by changing main pulse parameters such as intensity, energy and pulse duration, the characteristics of plasma active medium and its ionization are determined. Then gain coefficient of the active medium is calculated. The results of simulations show that to achieve a plasma with maximum soft x-ray laser gain, main pulse of pumped laser should have an optimum pulse duration.

Keywords: Laser-plasma interaction, hydrodynamic simulation, soft x-ray laser, plasma active medium

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-07]

۱- مقدمه

در سالیان اخیر پژوهش های نظری و تجربی بسیاری در حوزه پلاسمای تولید شده به کمک لیزرهای توان بالا صورت گرفته است[۱ و ۲]. پلاسمای داغ ناشی از تپ متمرکز پرتوان لیزر بر سطح هدف، منبع مناسبی برای تقویت پرتوهای ایکس نرم به شمار می آید. لیزرهای پرتو ایکس نرم کاربردهای بسیاری در زمینه صنعت و پزشکی در حوزه میکروسکپی، هولوگرافی و لیتوگرافی دارند[۳]. اخیراً پلاسمای تولید شده از طریق لیزرهای پرتوان به عنوان محیط تقویت‌کننده برای لیزرهای پرتو ایکس نرم مورد استفاده قرار گرفته‌است[۳-۷]، در چنین تجربه هایی غالباً امکان اندازه‌گیری تعداد نقاط محدودی وجود دارد. لذا درک بهتر نتایج تجربی و پیش‌بینی رفتار محیط بهره نیازمند شبیه‌سازی های عددی است. مهمترین ویژگی این شبیه‌سازی‌ها، محاسبه فرآیندهای برانگیختگی و یونش می‌باشد. در پژوهش حاضر شبیه سازی ها با استفاده از کد MED103[۸] انجام شده است به این صورت که ابتدا پارامترهای ماکروسکوپیک پلاسما در برهمکنش لیزر با سطح هدف ژرمانیوم با استفاده از رهیافت سیالی شبیه‌سازی می‌شود، سپس برای محاسبه برانگیختگی ها و میانگین حالت یونش از معادلات نرخ وابسته به زمان استفاده شده و در نهایت با محاسبه جمعیت ترازها ضریب بهره محیط فعال به دست می آید.

گذار در یون های شبه نئون و شبه نیکل منجر به تولید پرتو های ایکس نرم اشباع شده می شوند.

استفاده از تکنیک دو یا چند پالسی در لیزر دمش در میزان بازدهی بهره لیزر پرتو ایکس نرم نقش چشمگیری دارد. در تکنیک دو پالسی پالس لیزر دمش شامل دو پالس با تاخیر زمانی چند صد ps است. پالس اول پالسی طولانی با پهنای چند صد ps به هدف جامد برخورد می نماید و پلاسما را با درجه یونش لازم تولید می کند. پالس دوم که پالسی کوتاه با پهنای زمانی چند ps است الکترون های آزاد را به سرعت و در زمانی کوتاه تر از زمان یونش پلاسما، تا چند صد الکترون ولت گرم می کند. در نتیجه شرایط لازم برای دمش یون های فعال لیزر به وسیله برانگیختگی برخوردی آماده می‌شود به گونه‌ای که بهره لیزر پرتو ایکس نرم بالا باشد.

این پالس به قدری سریع است که از فرآیندهایی مثل واهلش، هدایت گرمایی، گسترش و یونیزاسیون مجدد و یا فرآیندهای معکوس در حین دمش جلوگیری می‌شود. در نتیجه با استفاده از این تکنیک می توان به افزایش ناگهانی دمای الکترونی در ناحیه‌ای که چگالی یون‌های شبه نئون زیاد است دست یافت و این منجر به افزایش بهره لیزر پرتو ایکس نرم خواهد شد.

در این پژوهش نیز از تکنیک دمش دوپالسی استفاده شده و تأثیر پارامترهای مختلف پالس اصلی بر روی مشخصه‌های پلاسمای تولید شده به عنوان محیط فعال و نیز بهره لیزر پرتو ایکس نرم به صورت شبیه سازی بررسی می شود.

۲- کد MED103

کد MED103 ابزار اصلی به کارگرفته شده در این پژوهش می باشد [۸ و ۹]. این کد با استفاده از روش حل خودسازگار معادلات هیدرودینامیکی، برانگیختگی و یونش پلاسمای لیزری و با جفت شدگی مراحل اتمی و معادلات انرژی الکترون آزاد در یک مدل لاگرانژی یک بعدی به بررسی محیط فعال پلاسمای لیزری می پردازد. کد MED103 معادله انرژی را به صورت ضمنی و معادله حرکت را به صورت صریح حل می کند و مختصات و حجم هر سلول یک گام زمانی جلوتر از دما و فشار الکترونی محاسبه می‌شود. به منظور پایداری روش حل عددی صریح معادله حرکت، مقدار گام زمانی Δt مطابق با شرط CFL تعیین می‌شود. هم‌چنین این مقدار گام زمانی با میزان تغییرات نسبی دما و حجم نیز محدود می‌شود. گذار میان حالت های برانگیخته و حالت پایه شامل تقریب میانگین اتمی می باشد. در واقع یون میانگین، یک میانگین آماری بر روی تمام یون‌های موجود در پلاسما است. در این حالت جمعیت میانگین P_n تراز n با میانگین وزنی f_i روی جمعیت $P_{n,i}$ تراز n از گونه i با رابطه (۱) داده می‌شود:

$$P_n = \sum_{i=0}^{Z} f_i, P_{n,i} \qquad (۱)$$

که Z عدد اتمی عنصر مورد بررسی و f_i کسر گونه یونی i است. تحول زمانی جمعیت P_n از معادله نرخ محاسبه می‌شود که می‌تواند به صورت میانگین معادلات نرخ که به طور مشابه وزن داده شده‌اند، برای یون‌های متفاوت مورد استفاده قرارگیرد.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-07]

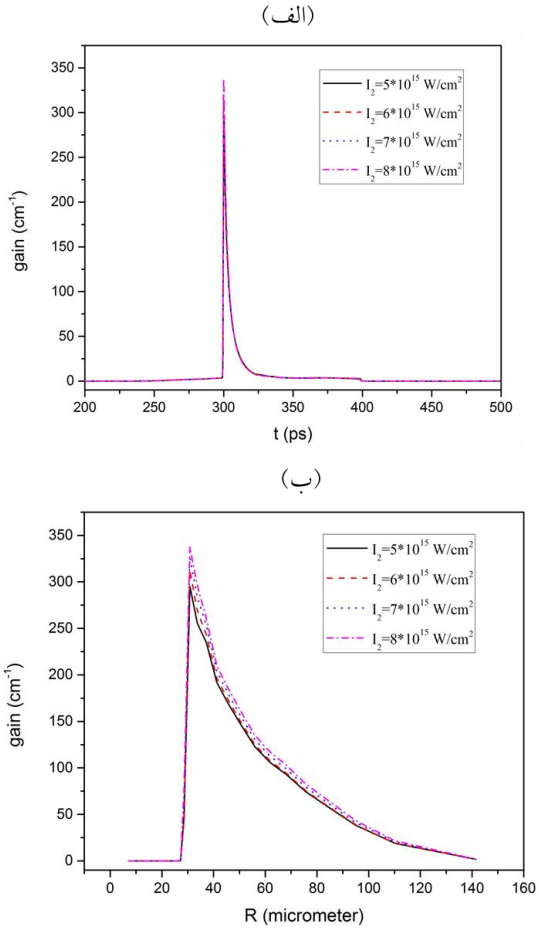
با در نظر گرفتن بار مؤثر اتم میانگین و با در دست داشتن جمعیت ترازهای مقید، حالت میانگین یونش به صورت زیر محاسبه می شود، رابطه (۲).

$$Z^* = Z - \sum_{n=1}^{n_{max}} P_n \qquad (۲)$$

برای حل این معادلات لازم است مشخصات ماده هدف و لیزر ورودی به عنوان کمیت‌های مشخص به کد وارد شود. سپس پارامترهای ماکروسکوپیک مثل دما و چگالی الکترونی پلاسما، یونش و نیز بهره تولید پرتو ایکس نرم از طریق کد محاسبه می‌شود.

۳- بحث و نتایج

هدف استفاده شده در این پژوهش ژرمانیوم با ضخامت μm ۲۵ در نظر گرفته شده است. ژرمانیوم دارای عدد اتمی ۳۲، و یون شبه نئون آن ۲۲ بار یونیده شده است. در واقع بهره از گذار میان ترازهای $2p^53p$ و $2p^53s$ در یون‌های شبه نئون اتفاق می افتد. در این شبیه سازی ها ابتدا یک پیش پالس با شدت $I = ۲\times۱۰^{۱۳}\ W/cm^۲$ و پهنای ps ۳۰۰ و طول موج nm ۸۰۰ به سطح هدف ژرمانیوم تابیده می‌شود. محاسبات نشان می دهد این پالس یک پلاسما با پارامترهای هیدرودینامیکی بهینه را در یون های شبه نئون ژرمانیوم تولید می کند و سپس پالس اصلی با شدت های متفاوت و پهنای ps ۱ با همان طول موج و اختلاف زمانی ps ۱۵۰ میان بیشینه‌های دو پالس به سطح هدف تابیده می شود. ضریب بهره محیط فعال پلاسمای تولید شده برای لیزر پرتو ایکس نرم شبه نئون بر حسب زمان و مکان (فاصله از سطح هدف) در حالت بیشینه و برای شدت‌های متفاوت در کل۱ ترسیم شده است. همان گونه که در شکل۱-(الف) می‌بینیم از آنجایی که پهنای پالس در همه شدت‌ها یکسان در نظر گرفته شده است زمان رسیدن پلاسما به بیشینه بهره در همه شدت‌ها یکی می‌باشد. همچنین از شکل۱ درمی یابیم هر چه شدت را افزایش دهیم، بهره نیز افزایش می یابد. در نمودار شکل۱-(ب) بهره بیشینه در زمان برای مکان‌های متفاوت از سطح هدف ترسیم شده است. از این شکل نیز در می‌یابیم که بهره متناسب با شدت، افزایش می یابد.



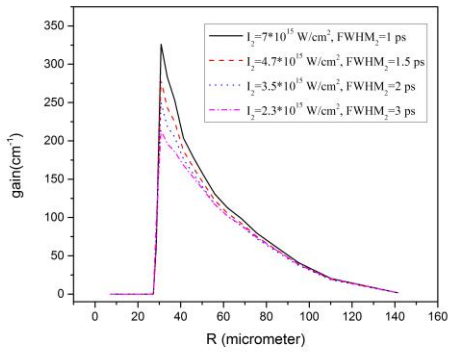
شکل ۱: (الف) ضریب بهره بر حسب زمان در فاصله ای از سطح هدف که بیشینه بهره موجود است برای شدت ها و انرژی های متفاوت پالس اصلی اما با پهنای ثابت ps ۱. (ب) ضریب بهره برحسب مکان (فاصله از سطح هدف) در زمانی که بیشینه بهره موجود است برای شدت ها و انرژی های متفاوت پالس اصلی اما با پهنای ثابت ps ۱ .

سپس انرژی پالس اصلی را ثابت در نظر گرفته و ضریب بهره محیط فعال پلاسما را برای شدت و پهنای متفاوت پالس اصلی در شکل۲ ترسیم کردیم. از شکل۲ مشخص است که برای انرژی ثابت هرچه شدت پالس بیشتر و در نتیجه پهنای زمانی پالس کوچک‌تر شود، باز هم با افزایش بهره مواجه خواهیم شد. این نمودار نشان می دهد که بهره محیط فعال با توجه به انرژی ثابت پالس به تغییرات شدت وابستگی زیادی دارد.

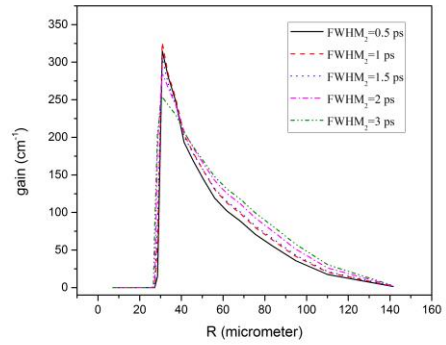
بنابراین شبیه سازی دیگری در حالت شدت ثابت برای بررسی اثر پهنای پالس انجام شد و نتایج شبیه سازی در شکل۳ ترسیم شده است.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-07]



شکل ۲: ضریب بهره برحسب مکان در زمانی که بیشینه بهره موجود است برای شدت ها و پهنای متفاوت پالس اصلی اما با انرژی ثابت..



شکل ۳: ضریب بهره برحسب مکان در زمانی که بیشینه بهره موجود است برای پهنای متفاوت پالس اصلی در شدت ثابت $I = ۷\times۱۰^{۱۵}\ W/cm^{۲}$.

در شکل۳ ضریب بهره نسبت به مکان برای پالس اصلی با شدت $I = ۷\times۱۰^{۱۵}\ W/cm^{۲}$ ترسیم شده است. از این شکل در می یابیم که پهنای بهینه ای برای این شرایط شبیه سازی وجود دارد که برابر با ۱ ps است. این پهنای بهینه پالس کاملاً مورد انتظار است زیرا از نقطه نظر فیزیکی پهنای خیلی کم (به عنوان مثال ۰/۵ ps) فرصت کافی برای افزایش دمای الکترونی و در نتیجه برانگیختگی های یونی را به اندازه کافی فراهم نمی کند و پهنای زیاد پالس (به عنوان مثال ۳ ps) نیز باعث افزایش فرآیندهای دیگر درون پلاسما و یا یونیزاسیون مجدد و از دست رفتن یون های لیزینگ می شود و این باعث کاهش بهره لیزر پرتو ایکس نرم می شود. پس برای دستیابی به بیشینه بهره لیزر پرتو ایکس نرم ژرمانیوم شبه نئون در طول موج ۱۹/۶nm، پهنای بهینه ۱ ps به دست آمد. بنابراین با استفاده از کد MED103 می‌توان با تنظیم پارامترهای لیزر دمش، پارامترهای بهینه پلاسما را برای دستیابی به ضرایب بهره بالا در طول موج های لیزر پرتو ایکس نرم به دست آورد. این نتایج قابل مقایسه با نتایج کد هیدرودینامیکی EHYBRID برای لیزر پرتو ایکس نرم است[۴].

۴- نتیجه‌گیری

برای دستیابی به لیزرهای پرتو ایکس نرم با بهره های بالا تولید شده به کمک لیزر های اپتیکی پرتوان، تنظیم پارامترهای لیزر دمش نقش بسزایی دارد. از این رو، در این پژوهش با استفاده از کد هیدرودینامیکی MED103 و همچنین تنظیم پارامترهای لیزر پالس اصلی در دمش دو پالسی که عبارتند از شدت، انرژی و پهنای پالس، بهره محیط فعال پلاسمایی ژرمانیوم شبه‌نئون در طول موج ۱۹/۶ nm محاسبه شده است. نتایج شبیه سازی‌ها نشان می‌دهد برای دستیابی به پلاسما با بیشینه بهره لیزر پرتو ایکس نرم شبه نئون ژرمانیوم با لیزر دمش دو پالسی و یک پیش پالس با مشخصات بهینه، با افزایش شدت پالس اصلی بهره افزایش اما پالس اصلی باید دارای پهنای بهینه ای باشد که در اینجا برابر با ۱ ps به دست آمد. در نهایت می توان دید با استفاده از شبیه سازی محیط فعال پلاسمایی و با تنظیم خصوصیات لیزر دمش امکان دستیابی به پارامترهای بهینه پلاسما برای رسیدن به ضریب بهره بالای لیزر پرتو ایکس نرم وجود دارد.

مراجع

[1] R. S. Craxton, K. S. Anderson et al., “Direct-drive inertial confinement fusion: A review”, Physics of Plasma, Vol. 22, pp. 110501, 2015.

[2] E. Esarey et al., “Physics of laser-driven plasma-based electron accelerators”, REVIEWS OF MODERN PHYSICS, Vol. 81, pp. 1229, 2009.

[3] H. Daido, “Review of soft x-ray laser researches and developments”, Rep. Prog. Phys., Vol. 65, pp. 1513-1576, 2002.

[4] G. J. Tallents, “The physics of soft x-ray lasers pumped by electron collisions in laser plasmas”, J. Phys D: Appl. Phys., Vol. 36, pp. R259, 2003.

[5] E. Oliva et al., “Hydrodynamic study of plasma amplifiers for soft-x-ray lasers: A transition in hydrodynamic behavior for plasma columns with widths ranging from 20 μm to 2 mm”, Phys. Rev. E, Vol. 82, 2010.

[6] G. Ghani-Moghadam, A.H. Farahbod, “Investigation of self-filtering unstable resonator for soft X-ray lasers”, Opt Commun., Vol. 371, pp. 154, 2016.

[7] G. Ghani Moghadam and A. H. Farahbod, “General formula for calculation of amplified spontaneous emission intensity”, Opt. Quant. Electron., Vol. 48, pp. 227, 2016.

[8] A. Djaoui, “A user guide for the laser-plasma simulation code: MED103”, PAL-TR-96-099, 1996.

[9] A. Djaoui and S.J. Rose, "Calculation of the time-dependent excitation and ionization in a laser-produced plasma", J. Phys B: At. Mol. Opt. Phys., Vol. 25, pp. 2745-2762, 1992.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-07]