بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

شبیه سازی محیط فعال پلاسمایی لیزر پرتو ایکس نرم ژرمانیوم شبه نئون دمیده شده با دو پالس لیزر

غزاله غنی مقدم و امیرحسین فرهبد

پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، انتهای خیابان کارگر شمالی، تهران.

چکیده – برای دستیابی به لیزرهای پرتو ایکس نرم با ضرایب بهره بالا تولید شده به کمک لیزرهای 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 ورودی که عبارتند از چند پالسی بودن، پهنای پالس، طول موج، شدت و فاصله زمانی میان پالس ها، پارامترهای هیدرودینامیکی و میزان یونش محیط فعال پلاسمایی ژرمانیوم شبه‌نئون محاسبه شده است. سپس با استفاده از پارامترهای هیدرودینامیکی و میزان یونش، به حل معادلات نرخ پایا برای محاسبه ضریب بهره محیط فعال پرداخته شده است. بنابراین با استفاده از شبیه سازی محیط فعال پلاسمایی و با تنظیم ویژگی های لیزر دمش می توان به محیط فعال لیزرهای پرتو ایکس نرم با ضریب بهره بالا از مرتبه $۱۰-۱۰۰\ cm^{-۱}$ دست یافت.

کلید واژه- لیزر پرتو ایکس نرم، محیط فعال پلاسمایی، یون ژرمانیوم شبه نئون.

Simulation of plasma active medium of Ne-like Ge soft x-ray laser by two pump pulses

G. Ghani Moghadam and A.H. Farahbod

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

Abstract- To provide the soft x-ray lasers with high gain coefficient using the high power optical lasers, setting of the pump laser parameters is very important. Hence, in this paper, the hydrodynamic parameters and average ion charge state are obtained by use of MED103 hydrodynamic code and setting the driver laser characteristics, including multi-pulse, pulse width, wavelength, intensity and time delay. Then the time-independent rate equations have been solved for calculation of gain coefficient. Therefore, it can be achieved to high gain soft x-ray laser active medium by simulation of plasma active medium and setting of the pump laser parameters.

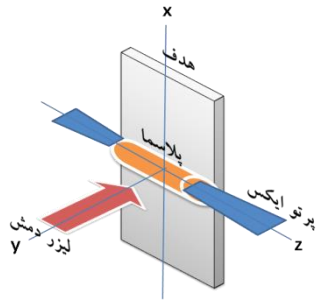
Keywords: Soft x-ray laser, plasma active medium, Ne-like Ge ion.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

۱- مقدمه

تولید پرتوهای ایکس نرم به کمک پالس های اپتیکی بسیار کوتاه و پرتوان فمتو و پیکو ثانیه ای از اهمیت فراوانی برخوردار است. کوتاه ترین طول موج ها و بالاترین شدت خروجی برای لیزرهای پرتو ایکس نرم با استفاده از محیط فعال پلاسمایی تولید شده به کمک لیزر های اپتیکی پرتوان پدید می آیند [۱]. در این روش ابتدا باریکه اپتیکی در ناحیه مرئی بر روی هدف متمرکز و محیط پلاسما ایجاد می شود. پس از آن، انبوهی وارون ترازهای گذار با برخورد الکترون های آزاد که الکترون های مقید را به ترازهای شبه پایدار در یون های شبه نیکل یا شبه نئون می برند، تولید و فعالیت لیزر پرتو ایکس نرم به صورت گسیل خودبخودی تقویت شده (ASE) به وجود می آید. شکل۱ طرحی از لیزر پرتو ایکس را نشان می دهد.



شکل ۱: نمایه ای از یک لیزر پرتو ایکس.

لیزرهای پرتو ایکس نرم کاربردهای بسیاری در زمینه صنعت و پزشکی در حوزه میکروسکپی، هولوگرافی و لیتوگرافی دارند[۲]. اولین تجربه برای تولید لیزر پرتو ایکس نرم به استفاده از سلنیم ۲۴ بار یونیده (Se^{24+}) به عنوان محیط فعال باز می گردد[۳]. 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. در پژوهش حاضر با استفاده از کد هیدرودینامیکی MED103 [۴] ابتدا پارامترهای ماکروسکوپیک پلاسما در برهمکنش دو پالس لیزر با سطح هدف ژرمانیوم با استفاده از رهیافت سیالی شبیه‌سازی شده، سپس برای محاسبه برانگیختگی ها و میانگین حالت یونش از معادلات نرخ وابسته به زمان استفاده می شود. در نهایت با حل عددی معادلات نرخ پایا به محاسبه ضریب بهره محیط فعال می پردازیم.

۲- ماده هدف و لیزر دمش

گسیل لیزر پرتو ایکس از پلاسما در نتیجه ایجاد انبوهی وارون میان دو تراز اتمی با جدایی انرژی مشخص صورت می گیرد. یک روش برای ایجاد این انبوهی وارون، دمش به وسیله برانگیختگی برخوردی است. اکثر لیزرهای پرتو ایکس نرم با استفاده از این مکانیسم دمش تولید شده است. با این حال تکنیک های متفاوتی برای تولید پلاسما مورد استفاده قرار گرفته است که یکی از آن ها دمش گذرا می باشد. این روش شامل دو پالس دمش 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 eV گرم می کند. در نتیجه شرایط لازم برای دمش یون های فعال لیزر به وسیله برانگیختگی برخوردی آماده می شود. در پژوهش حاضر یون ژرمانیوم شبه نئون و مدل سه ترازی برای حل معادلات نرخ استفاده شده است. ژرمانیوم دارای عدد اتمی ۳۲ و یون شبه نئون آن دارای ۲۲ بار یونیده است. در واقع بهره نوری از گذار میان ترازهای $2p^53p$ و $2p^53s$ در یون‌های شبه نئون حاصل می شود.

۳- روش محاسباتی

در برهمکنش لیزر پرشدت پالس کوتاه با ماده از سه مدل ذره ای، جنبشی و سیالی استفاده می شود [۵]. در مدل سیالی معادلات بقای جرم، تکانه و انرژی مورد استفاده قرار می گیرند. در توصیف هیدرودینامیکی، لیزر به صورت منبع انرژی خارجی در نظر گرفته می‌شود. مجموعه این معادلات با معادله حالت، کامل می‌شوند که ارتباط فشار و انرژی درونی را به صورت تابعی از چگالی و دما بیان می‌کند. ابزار اصلی شبیه سازی در این پژوهش کد MED103 است که یک کد لاگرانژی یک بعدی می باشد [۴]. این کد با حل خودسازگار معادلات هیدرودینامیکی، برانگیختگی و یونش پلاسمای لیزری و با در نظر گرفتن فرآیندهای اتمی و معادلات انرژی الکترون آزاد به بررسی محیط فعال پلاسمای لیزری می پردازد. برای حل این معادلات لازم است تا توان و طول موج لیزر فرودی و همچنین ابعاد، جنس و فشار داخل ماده هدف معلوم باشد. بنابراین با استفاده از کد

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]

هیدرودینامیکی می توانیم پارامترهای هیدرودینامیکی را با تغییر خصوصیات لیزر فرودی و یا ماده هدف برای رسیدن به تقویت مناسب برای لیزر پرتو ایکس نرم به دست آورد. پس از به دست آوردن پارامترهای هیدرودینامیکی با استفاده از کد MED103، به بررسی رفتار ضریب بهره محیط پلاسمایی با استفاده از معادلات نرخ مدل سه ترازی می پردازیم. انبوهی ترازها در حالت شبه ایستا با رابطه (۱) داده می شود [۶].

$$\frac{dN_i}{dt} = \sum_j C_{ij} n_e N_j + \sum_j A_{ij} N_i \qquad (۱)$$

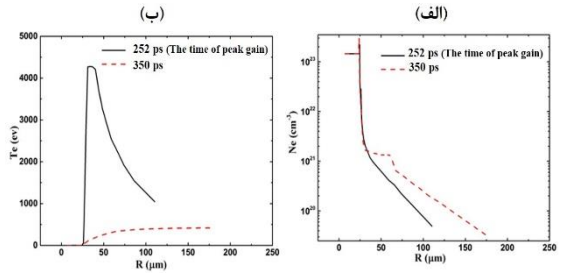
در این معادلات C_{ij} آهنگ برانگیختگی ها و فروافت های برخوردی بین ترازهای i و j ، A_{ij} ضرایب جذب و گسیل خودبخودی، N_i انبوهی تراز i و n_e چگالی الکترونی است. خروجی مدل، محاسبه ضریب بهره سیگنال کوچک در فرکانس خط مرکزی لیزر ν_0 است که با رابطه (۲) به دست می آید.

$$g_0(\nu=\nu_0) = (N_k - \frac{g_k}{g_l} N_l)\sigma_{stim}(\nu=\nu_0) \qquad (۲)$$

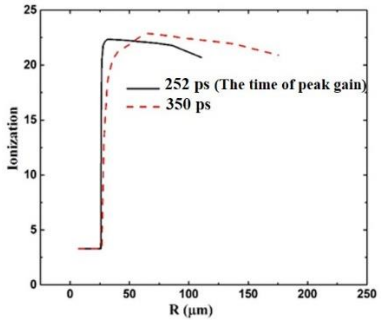
σ_{stim} سطح مقطع گسیل القایی در $\nu=\nu_0$ است.

۴- نتایج محاسبات

در آغاز یک پیش پالس با شدت $I = ۲\times۱۰^{۱۳}\ W/cm^۲$ و پهنای ۳۰۰ ps و طول موج ۸۰۰ nm به سطح هدف ژرمانیوم تابیده می شود. سپس پالس اصلی با شدت $I = ۷\times۱۰^{۱۵}\ W/cm^۲$ و پهنای ۱ ps با همان طول موج و اختلاف زمانی Δt میان بیشینه های دو پالس وارد می شود. ابتدا $\Delta t = ۱۰۰$ ps در نظر گرفته شد و نمودارهای مربوط به پارامترهای هیدرودینامیکی نظیر چگالی، دمای الکترون و همچنین میزان یونش بر حسب فاصله از سطح هدف با استفاده از کد MED103 در لحظه ۳۵۰ ps و لحظه بیشینه ضریب بهره (۲۵۲ ps) محاسبه شد، شکل ۲ و ۳. بیشینه ضریب بهره پلاسمای شبه نئون ژرمانیوم حدود ۲ ps پس از قله پالس دوم رخ می دهد. در این تجربه محاسباتی ضخامت هدف ۲۵ µm در نظر گرفته شده است. افزایش چگالی در محدوده ۲۵ µm در شکل ۲-الف نشان دهنده موج ضربه است. همانگونه که از شکل۳ می بینیم در زمان بیشینه ضریب بهره، یون شبه نئون ژرمانیوم با ۲۲ بار یونیده دارای انبوهی بیشتری است، زیرا این نمودار دارای یکنواختی در فاصله بیشتری برای یون ژرمانیوم ۲۲ بار یونیده است.



شکل ۲: شبیه سازی پارامترهای هیدرودینامیکی هدف ژرمانیوم تحت تابش دو پالس لیزر با تاخیر زمانی $\Delta t = ۱۰۰$ ps در دو زمان بیشینه ضریب بهره یون ژرمانیوم شبه نئون (۲۵۲ ps پس از شروع شبیه سازی) و ۳۵۰ ps پس از شروع شبیه سازی ها. (الف): چگالی الکترون، (ب): دمای الکترون.

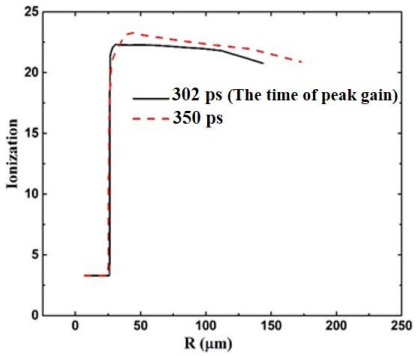


شکل ۳: شبیه سازی میانگین حالت یونش (بار میانگین محیط) برای پلاسمای هدف ژرمانیوم تحت تابش دو پالس لیزر با تاخیر زمانی $\Delta t = ۱۰۰$ ps در دو زمان بیشینه ضریب بهره یون شبه نئون ژرمانیوم (۲۵۲ ps پس از شروع شبیه سازی) و 350 ps پس از شروع شبیه سازی ها.

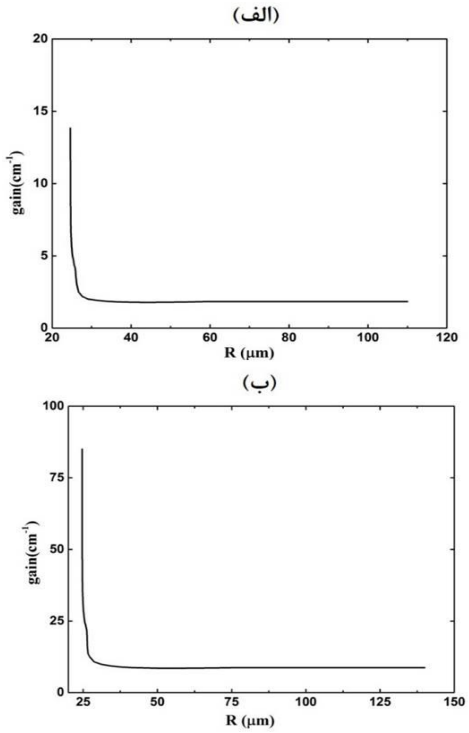
در حالت دیگر، پالس دوم در زمان $\Delta t = ۱۵۰$ ps نسبت به پالس اول به سطح هدف می تابد که میزان یونش در شکل ۴ آورده شده است. زمان بیشینه ضریب بهره در این مورد نیز ۲ ps پس از قله پالس دوم (لحظه ۳۰۲ ps پس از شروع شبیه سازی ها) می باشد. با مقایسه شکل ۳ و شکل ۴ درمی یابیم که میزان یونش برای یون شبه نئون در شبیه سازی با فاصله زمانی میان دو پالس $\Delta t = ۱۵۰$ ps، بیشتر است، در نتیجه انتظار می رود که ضریب بهره بیشتری در این حالت موجود باشد که آن را مورد بررسی قرار می دهیم. به این منظور با استفاده از پارامترهای به دست آمده از کد و همچنین استفاده از مدل سه ترازی، به حل عددی معادلات نرخ پایا برای محاسبه ضریب بهره یون ژرمانیوم شبه‌نئون پرداخته شد.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]



شکل ۴: شبیه سازی میانگین حالت یونش در حالت $\Delta t = ۱۵۰\,ps$.



شکل ۵: ضریب بهره نسبت به فاصله از سطح هدف برای یون ژرمانیوم شبه نئون (الف) $\Delta t = ۱۰۰\,ps$ و (ب) $\Delta t = ۱۵۰\,ps$.

مقادیر ساختار اتمی ترازهای ژرمانیوم شامل انرژی ترازها، فروافت های تابشی، قدرت تشدیدگر از مرجع [۷] گرفته شده است. شکل ۵ نمودار ضریب بهره نسبت به فاصله از سطح هدف را برای یون ژرمانیوم شبه نئون در طول موج ۲۳/۶۲ nm با دمش دو پالس لیزر برای هر دو حالت $\Delta t = ۱۰۰\,ps$ و $\Delta t = ۱۵۰\,ps$ نشان می دهد. همانگونه که پیش‌بینی شد، در حالت $\Delta t = ۱۵۰\,ps$ ضریب بهره بیشتری به دست آمده است. این نتایج قابل مقایسه با نتایج کد هیدرودینامیکی EHYBRID برای لیزرهای پرتو ایکس نرم می باشد [۱ و ۸]. 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.

۵- نتیجه‌گیری

پلاسمای تولید شده از برهمکنش لیزرهای اپتیکی پرتوان با سطح هدف یکی از منابع تولید لیزر پرتو ایکس نرم می باشد. برای دستیابی به ضریب بهره بالای این نوع لیزرها، تنظیم پارامترهای هیدرودینامیکی پلاسمای تولید شده و در واقع خصوصیات لیزر دمش بسیار حائز اهمیت است. در این پژوهش به بررسی محیط فعال تقویت کننده پلاسمایی برای ماده هدف ژرمانیوم در طول موج ۲۳/۶۲ nm دمیده شده با دو پالس لیزر پرداخته شد و با به دست آوردن پارامترهای هیدرودینامیکی محیط از کد MED103 و استفاده از مدل سه ترازی و حل عددی معادلات نرخ، ضریب بهره محیط تقویت کننده تعیین گردید. این نتایج قابل مقایسه با نتایج کد هیدرودینامیکی EHYBRID برای لیزر پرتو ایکس نرم است. در نهایت می توان دید با استفاده از شبیه سازی محیط فعال پلاسمایی و با تنظیم ویژگی های لیزر دمش امکان دستیابی به پارامترهای بهینه پلاسما برای رسیدن به ضریب بهره بالا از مرتبه $۱۰-۱۰۰\,cm^{-۱}$ وجود دارد.

مراجع

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

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

[3] D. L. Matthews *et al*, “Demonstration of a soft x-ray amplifier”, Phys. Rev. Lett. 54, pp. 110, 1985.

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

[5] S. Eliezer, *The Interaction of High-Power Lasers with Plasmas*, IOP Publishing Ltd, 2002.

[6] 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 82, 2010.

[7] Toshizo Shirai *et al*., “Spectral Data and Grotrian Diagrams for Highly Ionized Iron, Fe VIIIXXVI”, J. Phys. Chem. Ref. Data. 19, pp. 127-275, 1990.

[8] G. J. Pert, “The hybrid model and its application for studying free expansion”, J. Fluid Mech. 131, 1983.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]