

بهینه‌سازی شرایط لیزر دمش در تولید بیشینه بهره لیزر پرتو ایکس نرم ژرمانیم شبه نئون

غزاله غنی مقدم^{۱*}، سمیه رضایی^۲، محمدجعفر جعفری^۲، امیرحسین فرهد^۲

۱. دانشگاه حضرت معصومه(س)، صندوق پستی: ۱۴۵-۳۷۱۱۵، قم- ایران

۲. پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۳۹۹-۵۱۱۱۳، تهران- ایران

*Email: gh.ghani@hmu.ac.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۶/۳۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۹/۱۱

چکیده

پلاسمای لیزری به‌عنوان یکی از منابع تولید لیزر پرتو ایکس نرم حایز اهمیت می‌باشد. قابلیت کنترل ضریب بهره پرتو خروجی و کیفیت آن از طریق کنترل پارامترهای لیزر و پلاسما از جمله مزیت‌های این روش است. در این پژوهش، یک پالس دمش به‌همراه یک پیش‌پالس بر روی هدف ژرمانیم به‌عنوان محیط فعال تقویت‌کننده پلاسمایی می‌تابد و بهره لیزر پرتو ایکس نرم در طول موج ۱۹.۶ nm محاسبه می‌شود. به‌منظور مطالعه اثر پارامترهای لیزری از قبیل شدت، پهنای پالس و اختلاف زمانی بین دو پالس از کد هیدرودینامیکی MED103 استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که برای دستیابی به بیشینه بهره لیزر پرتو ایکس نرم یک پهنای پالس بهینه برای پیش‌پالس و نیز پالس اصلی دمش وجود دارد. به‌علاوه مطابق با نتایج به‌دست آمده با افزایش شدت پیش‌پالس مقدار بهره لیزر پرتو ایکس نرم ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد در حالی‌که با افزایش شدت پالس اصلی دمش، این مقدار به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد. هم‌چنین مناطق بهینه مکانی و زمانی بهره لیزر پرتو ایکس نرم در شرایط مختلف اختلاف زمانی دو پالس آورده شده است.

کلیدواژه‌ها: برهم‌کنش لیزر- پلاسما، ژرمانیم شبه نئون، لیزر پرتو ایکس نرم، محیط فعال پلاسمایی

Optimization of pump laser conditions for production of maximum gain of Ne-like Ge soft x-ray laser

G. Ghani Moghadam^{1*}, S. Rezaei², M. J. Jafari², A. H. Farahbod²

1. Hazrat-e Masoumeh University, P.O.BOX: 37115-145, Qom, Iran.

2. Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.BOX: 14399-51113, Tehran, Iran.

Research Article

Received 21.9.2020, Accepted 1.12.2020

Abstract

Laser produced plasma can be used as the sources of soft X-ray laser. The ability to control the laser quality and its gain coefficient by controlling laser and plasma's parameters is one of the advantages of this method. In this study, a pump pulse assistant along with a pre-pulse is irradiated on a germanium target as the plasma active medium, then the gain of soft X-ray laser at wavelength 19.6 nm is calculated. In order to analyze the effect of laser parameters such as intensity, pulse length, and time delay between two pulses, MED103 hydrodynamic code has been used. The simulation results show that there is optimal pulse duration for the pre-pulse as well as the main pump pulse to achieve the maximum gain of soft X-ray laser. In addition, according to the results, by increasing the pre-pulse intensity the amount of soft X-ray laser gain initially increases and then decreases, while by enhancing the main pulse intensity, it keeps increasing. Also, the optimal spatiotemporal regions of the soft X-ray laser gain for different time delays of two pulses are given.

Keywords: Laser-plasma interaction, Ne-like Ge, Soft X-ray laser, Plasma active medium

۱. مقدمه

از فرایندهایی مثل واهلش، هدایت‌گرمایی، گسترش و یونیزاسیون مجدد و یا فرایندهای معکوس در حین دمش جلوگیری می‌شود. در آزمایش‌های متعدد محاسباتی و تجربی از یک پیش‌پالس با پهنای نانوثانیه و یک پالس اصلی با پهنای پیکوثانیه و تأخیر زمانی حدود چند نانوثانیه استفاده شده است [۱۷-۲۲]. در این آزمایش‌ها، شدت و پهنای پیش‌پالس برای تولید پیش‌پلاسمایی با چگالی بالای یون‌های شبه نئون به اندازه کافی قوی نیست و تنها پیش‌پلاسمایی سرد با گرادیان چگالی پایین تولید می‌کنند. به همین دلیل پالس اصلی بایستی علاوه بر تولید جمعیت وارون گذار، پیش‌پلاسمای را به درجات بالاتر یونیزه کند، بنابراین باید از پالس‌های اصلی با شدت بالاتر و پهنای پالس بیش‌تر استفاده شود. در این تحقیقات ضرایب بهره بیش از 10^6 cm^{-1} برای لیزر پرتو ایکس شبه نئون ژرمانیم در طول موج 19.6 nm با استفاده از پیش‌پالسی با پهنای 1 ns و شدت $I = 5 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ و پالس اصلی با پهنای 2 ps و شدت $I = 10^{15} \text{ W/cm}^2$ با استفاده از کد EHYBRID پیش‌بینی شد [۲۳]. اگرچه در آزمایشات تجربی، بیشینه ضریب بهره در حدود نصف یا کم‌تر از نتایج شبیه‌سازی به دست آمد [۲۴]. این میزان اختلاف به دلیل شکست پرتو در طول پلاسمای و شرایط واقعی محیط آزمایش مورد انتظار است. از آنجایی که تعیین شرایط بهینه شکل لیزر دمش به صورت تجربی به دلیل وجود پارامترهای متعدد، آسان نیست، شبیه‌سازی‌ها و مطالعات محاسباتی در این حوزه می‌تواند بسیار مفید واقع شود. در این پژوهش شرایط لیزر دمش برخوردی با استفاده از دو پالس دمش برای تولید بیشینه بهره لیزر پرتو ایکس نرم شبه نئون ژرمانیم در طول موج‌های 19.6 nm ، 23.22 nm و 23.62 nm با استفاده از کد هیدرودینامیکی یک‌بعدی MED103 مورد بررسی قرار گرفته است و تأثیر پارامترهای مختلف پالس دمش بر روی بهره محیط فعال پلاسمای لیزر پرتو ایکس نرم شبه‌سازی شده است. در این تحقیق، پهنای پیش‌پالس در حدود چند صد پیکوثانیه و پالس اصلی دارای پهنای چند پیکوثانیه و تأخیر زمانی حدوداً صد پیکوثانیه می‌باشد که باعث می‌شود پیش‌پلاسمایی با درجه یونش بالا تولید و پالس اصلی با پهنای خیلی کم تنها باعث تولید جمعیت وارون گذار و در نتیجه افزایش بهره لیزر پرتو ایکس نرم شود.

۲. کد هیدرودینامیکی MED103

در برهم‌کنش لیزر پرشدت پالس کوتاه با ماده از سه مدل ذره‌ای، جنبشی و سیالی استفاده می‌شود [۲۵ و ۲۶]. در مدل سیالی همواره فرض بر این است که پلاسمای در تعادل موضعی حرارتی بوده و به عبارتی تابع توزیع ذرات آن، تابع ماکسول با دمای مشخص T_e و T_i می‌باشد [۲۶]. تحت این شرایط، پلاسمای با متغیرهای ماکروسکوپیک آن مثل چگالی، فشار، سرعت سیال و غیره توصیف می‌شود. در مدل تک سیالی و دو دمایی

لیزرهای پرتو ایکس نرم کاربردهای بسیاری در زمینه صنعت و پزشکی در حوزه میکروسکوپی، هولوگرافی و لیتوگرافی دارند [۱]. هم‌چنین از لیزرهای پرتو ایکس نرم برای تداخل‌سنجی و رادیوگرافی سوخت‌های فشرده شده در حوزه گداخت محصورسازی لختی (ICF) ^۱ استفاده می‌شود [۲]. پلاسمای لیزری یا همان پلاسمای تولیدشده از طریق لیزرهای اپتیکی پرتون یکی از منابع تولید لیزر پرتو ایکس نرم هستند که در بسیاری از تحقیقات تجربی و نظری مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۳-۸]. اولین تجربه آزمایشگاهی برای تولید لیزر پرتو ایکس نرم در سال ۱۹۸۵ به استفاده از سلنیم 24 بار یونیده (Se^{+24}) به عنوان محیط فعال باز می‌گردد [۸]. سپس پیشرفت چشم‌گیری به صورت نظری و تجربی با استفاده از روش‌های مختلف دمش لیزری پرتو ایکس حاصل شد [۲]. از انواع مختلف روش دمش، دمش برخوردی گسترش پیدا کرد و بهره اشباع در طول موج‌های لیزر پرتو ایکس نرم در یون‌های روی شبه نئون [۹]، ژرمانیم شبه نئون [۱۰] و سلنیم شبه نئون [۱۱] با استفاده از این روش دمش گزارش شد. در این روش، ابتدا باریکه اپتیکی در ناحیه مری بر روی هدف متمرکز و محیط پلاسمای ایجاد می‌شود. پس از آن، انبوهی وارون‌های گذار با برخورد الکترون‌های آزاد که الکترون‌های مقید را به ترازهای شبه پایدار در یون‌های شبه نیکل یا شبه نئون می‌برند، تولید و فعالیت لیزر پرتو ایکس نرم به صورت گسیل خودبه‌خودی تقویت شده (ASE) ^۲ به وجود می‌آید. از آنجایی که بازدهی تولید لیزر پرتو ایکس از لیزرهای اپتیکی نسبتاً پایین بود، از یک پیش‌پالس برای تقویت بازدهی تولید لیزرهای پرتو ایکس نرم شبه نئون در چندین آزمایش به صورت موفقیت‌آمیزی استفاده گردید [۱۲ و ۱۳]. تحقیقات نشان می‌دهد استفاده از محیط فعال پلاسمایی و به‌کارگیری رهیافت دمش برخوردی با استفاده از دمش گذرا بیش‌ترین بهره را در تولید پرتو ایکس نرم دارد [۳]. برای یون‌های شبه نئون شرایط پلاسمایی بایستی به‌گونه‌ای بهینه شود که بیشینه نرخ برانگیختگی برخوردی حاصل شود. به این منظور با استفاده از یک پیش‌پالس و یا روش‌های چند پالسی می‌توان به بهره لیزر بالا دست پیدا کرد [۱۴-۱۶]. از نقطه نظر فیزیکی بازدهی جذب تابش لیزر دمش با افزودن یک پیش‌پالس، بیش‌تر و میزان کم‌تری از انرژی صرف گسترش پلاسمای می‌شود. در این حالت با افزایش ناگهانی دمای الکترونی در ناحیه‌ای که چگالی یون‌های شبه نئون زیاد است، پیشرفت اساسی در بازدهی لیزر پرتو ایکس حاصل می‌شود. این افزایش سریع دمای الکترونی از طریق تابش پلاسمای تولید شده با یک پالس لیزری کوتاه (چند پیکوثانیه) و شدت بالا ممکن می‌شود. این پالس به قدری سریع است که

1. Inertial Confinement Fusion
2. Amplified spontaneous emission



خودبه‌خودی، N_i انبوهی تراز i و n_e چگالی الکترونی است. آهنگ‌های برخورد الکترونی با توزیع سرعت ماکسولی برای الکترون‌ها به صورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$C_{kl} \approx 1/6 \times 10^{-5} \frac{f_{lk} \langle G \rangle^{-\Delta E_{lk}/kT_e}}{\Delta E_{lk} \sqrt{kT_e}} e^{-\Delta E_{lk}/kT_e} \quad (7)$$

$$C_{kl} \approx \frac{g_l}{g_k} C_{lk} e^{\Delta E_{lk}/kT_e} \quad (8)$$

f_{lk} قدرت نوسانگر، $\langle G \rangle$ ضریب Gaunt، T_e دمای الکترون، ΔE_{lk} تفاوت انرژی بین دو تراز l و k و g_l و g_k تبهگنی تراز l ام است.

خروجی مدل، محاسبه ضریب بهره سیگنال کوچک در فرکانس خط مرکزی لیزر ν است که با رابطه ۹ به دست می‌آید [۱۶].

$$g(\nu = \nu_e) = (N_k - \frac{g_k}{g_l} N_l) \sigma_{stim}(\nu = \nu_e) \quad (9)$$

σ_{stim} سطح مقطع گسیل القایی در $\nu = \nu_e$ است و به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\sigma_{stim}(\nu) = \Phi(\nu) \frac{\lambda^2}{\lambda \pi} A_{kl} \quad (10)$$

در این رابطه، λ طول موج لیزر و $\Phi(\nu)$ تابع شکل خط طیف است که به پهن‌شدگی طیفی در محیط بهره وابسته است. اگر فقط شکل خط را داپلری در نظر بگیریم و آن را در مرکز بخواهیم، داریم:

$$\Phi_D(\nu) = \lambda \left(\frac{m}{\sqrt{\pi} k T_i} \right)^{1/2} \quad (11)$$

که m جرم اتمی یون‌های مولد لیزر و T_i دمای یون‌ها است. در کل این روابط نشان می‌دهند که آهنگ برانگیختگی‌ها و سطح مقطع گسیل القایی و جمعیت ترازها و در نهایت ضریب بهره لیزر پرتو ایکس خروجی، همگی وابسته به پارامترهای هیدرودینامیکی محیط پلاسماست.

کد MED103 معادله انرژی را به صورت ضمنی و معادله حرکت را به صورت صریح حل می‌کند و مختصات و حجم هر سلول یک گام زمانی جلوتر از دما و فشار الکترونی محاسبه می‌شود. همچنین این مقدار گام زمانی با میزان تغییرات نسبی دما و حجم نیز محدود می‌شود. برای حل این معادلات لازم است مشخصات ماده هدف و لیزر ورودی به عنوان کمیت‌های مشخص به کد وارد شود. به این منظور مشخصات لیزر شامل پهنای پالس و شدت و شکل پالس به کد وارد می‌شود و از این

معادلات بقای جرم، تکانه و انرژی با روابط ۱ تا ۴ بیان می‌شود [۲۵].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla \cdot (P_i + P_e) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho E_i}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho E_i u + (P_i) u] = S_i + \nabla \cdot q_i \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho E_e}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho E_e u + (P_e) u] = S_e + \nabla \cdot q_e \quad (4)$$

در این معادلات، ρ چگالی، u بردار سرعت، P_i و P_e فشار یون و الکترون، E_i و E_e انرژی یون و الکترون و S_i و S_e هرگونه چشمه یا چاه انرژی یون‌ها و الکترون‌ها هستند. q_i و q_e نیز شار حرارتی وابسته به رسانش برای الکترون و یون می‌باشد. در توصیف لاگرانژی که شبکه مختصاتی متصل به پلاسما می‌باشد، رابطه انرژی به صورت رابطه ۵ نوشته می‌شود [۲۷].

$$C_{V_{i,e}} \frac{dT_{i,e}}{dt} + B_{T_{i,e}} \frac{d\rho}{dt} + P_{i,e} \frac{dV}{dt} = S_{i,e} \quad (5)$$

در رابطه ۵، $C_V = (\partial U / \partial T)_\rho$ و $B_T = (\partial U / \partial \rho)_T$ است که U انرژی درونی سیستم می‌باشد. S منبع انرژی خارجی سیستم است که در توصیف هیدرودینامیکی، انرژی 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 می‌کنند.

در پژوهش حاضر به منظور بررسی و مطالعه محیط فعال پلاسمایی طی برهم‌کنش لیزر با پلاسما از کد شبیه‌سازی هیدرودینامیکی یک‌بعدی MED103 استفاده شده است [۲۷ و ۲۸]. این کد از رهیافت لاگرانژی برای حل معادلات خودسازگار هیدرودینامیکی، برانگیختگی، یونش پلاسمای لیزری و معادلات نرخ، بهره می‌گیرد. گذار میان حالت‌های برانگیخته و حالت پایه شامل تقریب میانگین اتمی می‌باشد. در پلاسمایی که شامل مراحل مختلف یونش یک عنصر مشخص می‌باشد، اگر گونه‌های یونی متفاوت تنها با یک یون میانگین جایگزین شوند آن‌گاه تحولات فرایند یونش به نسبت ساده می‌شود. کد MED103 برای بررسی رفتار ضریب بهره محیط پلاسمایی از معادلات نرخ مدل ۲۷ تراز استفاده می‌کند. انبوهی ترازها در حالت شبه ایستا با رابطه ۶ داده می‌شود [۱۶].

$$\frac{dN_i}{dt} = \sum_j C_{ij} n_e N_j + \sum_j A_{ij} N_j \quad (6)$$

در این معادلات C_{ij} آهنگ برانگیختگی‌ها و فروافت‌های برخوردی بین ترازهای i و j ؛ A_{ij} ضرایب جذب و گسیل

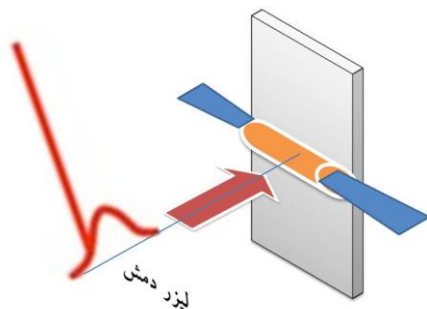


۴. شبیه‌سازی و نتایج

در پژوهش اخیر، از یک لیزر دوپالسی با پهنای پیکوتانیه در برخورد با سطح ژرمانیم استفاده شده و شرایط لیزر دمش در تولید بیشینه بهره لیزر پرتو ایکس نرم در طول موج 19.6 nm مورد بررسی قرار گرفته است [۲۴]. در این پژوهش نیز پس از بررسی کامل پارامترهای لیزر دمش، شرایط بهینه پالس دمش برای پالس‌های پیکوتانیه‌ای و یون ژرمانیم شبه نئون در طول موج 19.6 nm ارایه و مناطق بهینه مکانی و زمانی بهره لیزر پرتو ایکس نرم در شرایط مختلف اختلاف زمانی دو پالس ترسیم شده است. همچنین پارامترهای هیدرودینامیکی پلاسما که باعث تولید این شرایط بهینه می‌شوند، ترسیم و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در نهایت پارامترهای شدت و پهنای پالس اصلی و اختلاف زمانی دو پالس برای تولید بهره بیشینه در دو طول موج 23.22 nm و 23.62 nm نیز شبیه‌سازی شده است.

۱.۴ بررسی خصوصیات پیش‌پالس لیزر دمش

در این پژوهش، ابتدا یک پیش‌پالس با شدت‌های متفاوت و پهنای 300 ps و در نتیجه با انرژی‌های مختلف و طول موج 800 nm به سطح هدف ژرمانیم با ضخامت $25 \mu\text{m}$ تابیده می‌شود. سپس پالس اصلی با شدت $I = 7 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ و پهنای 1 ps با همان طول موج و اختلاف زمانی 150 ps میان بیشینه‌های دو پالس وارد می‌شود. در این حالت یعنی پهنای ثابت پیش‌پالس، ضریب بهره محیط فعال پلاسمای تولید شده برای لیزر پرتو ایکس نرم شبه نئون در طول موج 19.6 nm برای شدت‌های مختلف پیش‌پالس را به دست می‌آوریم (شکل ۲). همان‌طور که از شکل ۲ دیده می‌شود، بهره در یک مقدار شدت و در نتیجه یک مقدار انرژی، بیشینه می‌شود. این انرژی برای این شبیه‌سازی برابر با $1.04 \times 10^4 \text{ J/cm}^2$ است. سپس این انرژی بهینه را ثابت فرض کرده و بهره را در شدت‌ها و در نتیجه با پهنای متفاوت ترسیم می‌کنیم که در این حالت انرژی ثابت، باز هم یک شدت و پهنای بهینه خواهیم داشت. این شدت و پهنای بهینه‌ی پیش‌پالس $I = 2 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ و 300 ps به دست آمد.



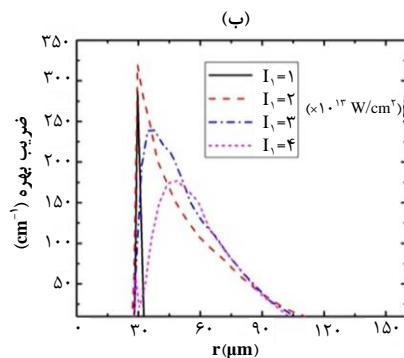
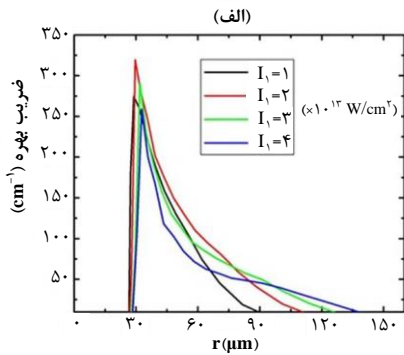
شکل ۱. نمایه‌ای از روش دمش گذرا در تولید لیزرهای پرتو ایکس نرم برخوردی

طریق در هر گام زمانی انرژی پالس دمش محاسبه و در معادلات بالا جایگزین پارامتر k می‌شود. در نهایت پارامترهای ماکروسکوپیکی مثل دما و چگالی الکترونی پلاسما، یونش و نیز بهره تولید پرتو ایکس نرم از طریق کد محاسبه می‌شود. این کد در مقالات مختلف آزمایش و مورد استفاده قرار گرفته است [۲۹-۳۱].

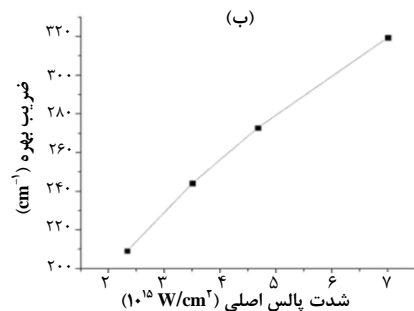
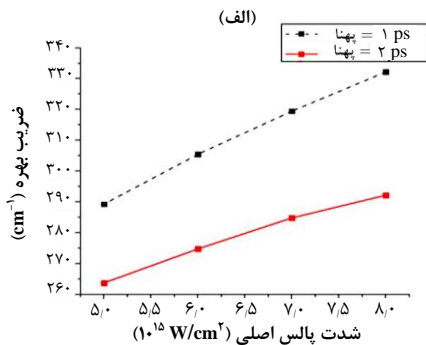
۳. شرایط لیزر دمش روی سطح هدف

گسیل لیزر پرتو ایکس از پلاسما در نتیجه ایجاد انبوهی وارون میان دو تراز اتمی با جدایی انرژی مشخص صورت می‌گیرد. یک روش برای ایجاد این انبوهی وارون، دمش به وسیله برانگیختگی برخوردی است. دلیل اصلی ایجاد انبوهی وارون در سازوکار برانگیختگی برخوردی، برخورد الکترون‌های آزاد با یون‌های با یونش بالا در حالت پایه است. تراز بالایی گذار لیزری به وسیله برانگیختگی برخوردی، جمعیت دار و تراز پایینی هم سریعاً با واپاشی تابشی تخلیه می‌شود. واپاشی تابشی تراز بالایی به حالت پایه به دلیل قوانین انتخاب ممنوع است. انرژی متوسط الکترون‌های آزاد باید برابر یا بزرگ‌تر از انرژی میان تراز بالایی و تراز پایه باشد و بنابراین دمای الکترونی پلاسما از مرتبه چند صد الکترون‌ولت است. از سوی دیگر برای این‌که برانگیختگی برخوردی محتمل باشد، چگالی بالا و از مرتبه 10^{20} cm^{-3} مورد نیاز است. در نهایت انواع یون‌هایی که بیش‌ترین تناسب را برای این سازوکار دمش دارند، به شکل بستهای در حالت پایه در یون‌های مخصوص شبه نئون و شبه نیکل هستند، زیرا آن‌ها انرژی یونش بالایی نیاز دارند و به سختی یونیزه شده و در پلاسما با فراوانی بیش‌تر وجود دارند. بیش‌تر لیزرهای پرتو ایکس نرم با استفاده از این سازوکار دمش تولید شده است [۹-۲۴]. با این حال روش‌های متفاوتی برای تولید پلاسما مورد استفاده قرار گرفته است که یکی از آن‌ها دمش گذرا می‌باشد (شکل ۱). این روش، شامل دو پالس دمش با تأخیر زمانی چند صد ps است. پالس اول (پیش‌پالس) پالسی طولانی با پهنای چند صد ps به هدف جامد برخورد می‌نماید و پلاسما را با درجه یونش لازم تولید می‌کند. پالس دوم (پالس اصلی) که پالسی کوتاه با پهنای زمانی چند ps است الکترون‌های آزاد را به سرعت و در زمانی کوتاه‌تر از زمان یونش پلاسما، تا چند صد eV گرم می‌کند. در نتیجه، شرایط لازم برای دمش یون‌های فعال لیزر به وسیله برانگیختگی برخوردی آماده می‌شود به گونه‌ای که بهره لیزر پرتو ایکس نرم بالا باشد [۳۲ و ۳۳]. هدف استفاده شده در این تحقیق ژرمانیم با عدد اتمی ۳۲ است که یون شبه نئون آن دارای ۲۲ بار یونیده (Ge^{+22}) می‌باشد. در واقع بهره از گذار میان ترازهای $2p^5 3s$ و $2p^5 3p$ در یون‌های شبه نئون اتفاق می‌افتد.

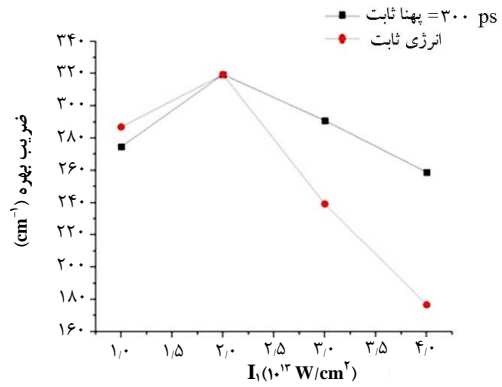
سپس ضریب بهره برحسب شدت را در انرژی ثابت پالس اصلی در شکل ۴- ب رسم کرده‌ایم. همان‌گونه که از شکل ۴ دیده می‌شود، هرچه شدت پالس اصلی افزایش یابد، بهره نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۳. ضریب بهره برحسب مکان (فاصله از سطح هدف) در زمانی که بیشینه بهره در طول موج ۱۹۶ nm موجود است؛ الف) در شدت‌ها و انرژی‌های متفاوت پیش‌پالس اما با پهنای ثابت ۳۰۰ ps و ب) در شدت‌ها و پهنای متفاوت پیش‌پالس اما با انرژی ثابت.



شکل ۴. بیشینه ضریب بهره در شدت‌های متفاوت پالس اصلی برای طول موج ۱۹۶ nm الف) برای دو پهنای ثابت پالس اصلی و ب) برای یک انرژی ثابت.



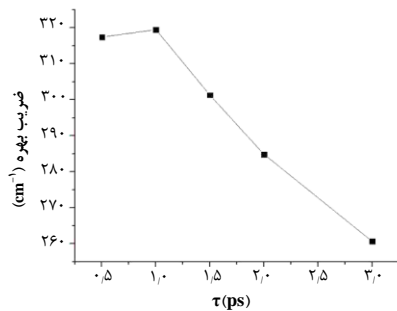
شکل ۲. بیشینه ضریب بهره برای طول موج ۱۹۶ nm در شدت‌های متفاوت پیش‌پالس دمش برای پهنای ثابت ۳۰۰ ps (■) و برای انرژی ثابت ۱۰۰۴ J/cm² (●).

در شکل ۳ نیز نمودار بهره برحسب مکان (فاصله از سطح هدف) در هر دو حالت پهنای ثابت و انرژی ثابت رسم شده است. در هر دو حالت برای شدت $I = 2 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ علاوه بر داشتن بیشینه بهره، بیش‌ترین پهنای مکانی با مقادیر بالای بهره نیز وجود دارد. به‌عنوان مثال در شکل ۳- الف در فاصله ۳۰ تا ۸۰ میکرومتر از سطح هدف، ضریب بهره با مقادیر بالاتر از 70 cm^{-1} موجود است که جهت تقویت پرتو لیزر ایکس نرم بسیار مفید خواهد بود زیرا در این صورت پرتو لیزر ایکس نرم می‌تواند مسافت بیش‌تری در ضریب بهره بالا طی کرده و تقویت بیش‌تری صورت گیرد.

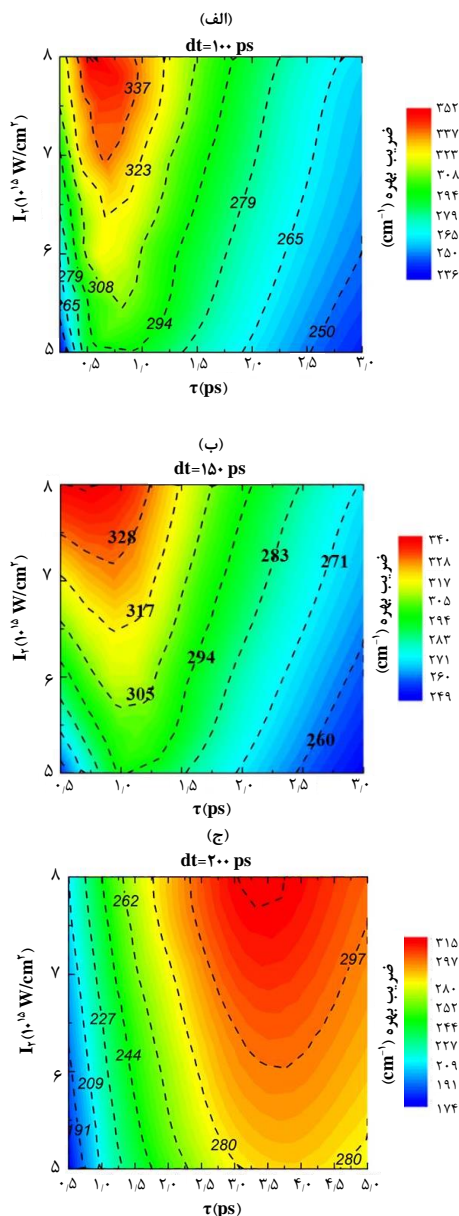
۲.۴ بررسی خصوصیات پالس اصلی لیزر دمش

در بخش قبل با استفاده از شبیه‌سازی، یک پیش‌پالس بهینه برای دستیابی به بیشینه بهره لیزر پرتو ایکس نرم در طول موج ۱۹۶ nm به‌دست آمد. در ادامه با استفاده از این پیش‌پالس، خصوصیات پالس اصلی را بررسی می‌کنیم. برای این کار ابتدا یک پیش‌پالس با شدت $I = 2 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ و پهنای ۳۰۰ ps و طول موج ۸۰۰ nm به سطح هدف ژرمانیم تابیده می‌شود. محاسبات قبلی نشان می‌دهد این پالس یک پلاسما با ضریب بهره لیزر پرتو ایکس نرم بهینه را در یون‌های شبه نئون ژرمانیم در طول موج ۱۹۶ nm تولید می‌کند. سپس ابتدا در مقایسه با شکل ۲، نمودار بهره را برای حالت‌های با پهنای ثابت و انرژی ثابت پالس اصلی با همان طول موج و اختلاف زمانی ۱۵۰ ps مورد بررسی قرار می‌دهیم. به این منظور ابتدا پیش‌پالس بهینه به سطح هدف تابیده و سپس پالس اصلی با اختلاف زمانی ۱۵۰ ps میان بیشینه دو پالس با شدت‌های متفاوت و دو پهنای ۱ ps و ۲ ps را در نظر می‌گیریم. بیشینه ضریب بهره محیط فعال پلاسما تولید شده برای لیزر پرتو ایکس نرم شبه نئون در شدت‌های متفاوت پالس اصلی برای این دو پهنای ثابت پالس در شکل ۴- الف ترسیم شده است.





شکل ۵. بیشینه ضرب بهره در طول موج ۱۹۶ nm در پهنای متفاوت پالس اصلی برای پالس اصلی با شدت $I = 7 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$.



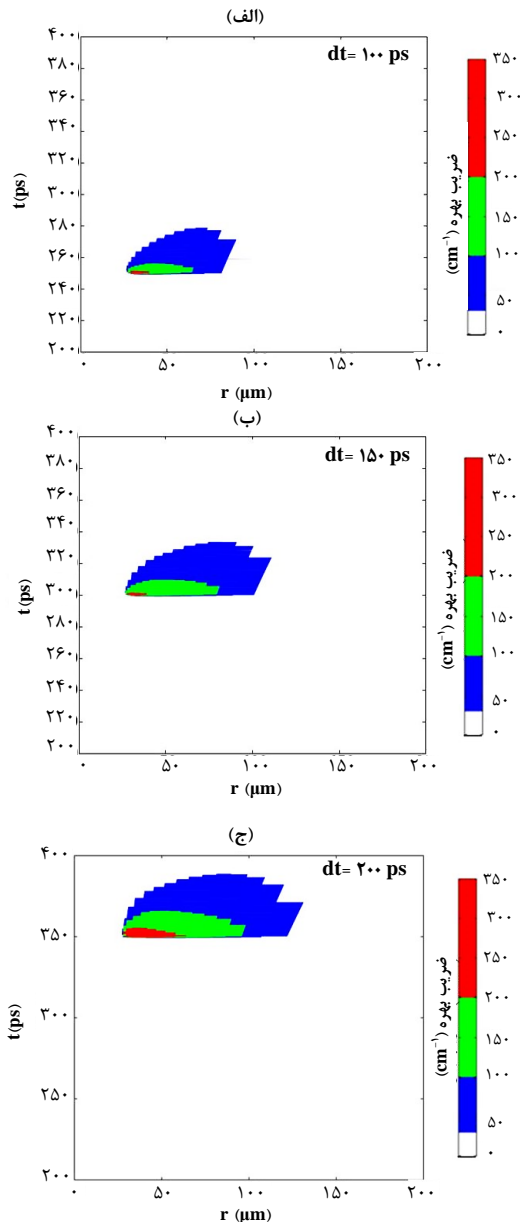
شکل ۶. بیشینه ضرب بهره برای طول موج ۱۹۶ nm در پهنای و شدت‌های متفاوت پالس اصلی برای سه اختلاف زمانی مختلف میان دو پالس دمش الف) ۱۰۰ ps؛ ب) ۱۵۰ ps؛ ج) ۲۰۰ ps.

تفاوت این نمودارها با شکل ۲ این است که در شکل ۲ و با تغییر شدت پیش‌پالس، به یک شدت بهینه رسیدیم که در شدت‌های بیش‌تر از آن، بهره کاهش پیدا می‌کند، اما در پالس اصلی هرچه شدت را افزایش دهیم، هم در حالت پهنای ثابت و هم در انرژی ثابت، بهره افزایش می‌یابد. این نمودارها نشان می‌دهند که بهره محیط فعال با توجه به انرژی ثابت پالس به تغییرات شدت وابستگی زیادی دارد.

در نمودار شکل ۵ نیز بیشینه ضرب بهره پس از اعمال پیش‌پالس بهینه و سپس پالس اصلی با اختلاف زمانی ۱۵۰ ps به سطح هدف ژرمانیم در طول موج ۱۹۶ nm و در شدت پالس اصلی $I = 7 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ و برای پهنای متفاوت پالس اصلی رسم شده است. از این شکل درمی‌یابیم که پهنای بهینه‌ای برای این شرایط شبیه‌سازی وجود دارد که برابر با ۱ ps است. این پهنای بهینه پالس کاملاً مورد انتظار است زیرا از نقطه نظر فیزیکی پهنای خیلی کم (به‌عنوان مثال ۰٫۵ ps) فرصت کافی برای افزایش دمای الکترونی و در نتیجه برانگیختگی‌های یونی را به اندازه کافی فراهم نمی‌کند و پهنای زیاد پالس (به‌عنوان مثال ۳ ps) نیز باعث افزایش فرایندهای دیگر درون پلاسما و یا یونش مجدد و از دست رفتن یون‌های لیزینگ شده و این باعث کاهش بهره لیزر پرتو ایکس نرم می‌شود.

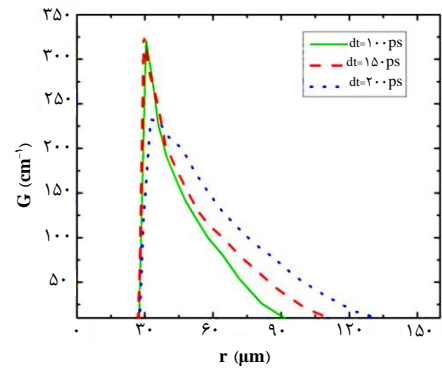
در ادامه، نمودارهای رنگی شکل ۶، ضرب بهره را در حالت کلی تغییرات شدت و پهنای پالس اصلی و برای سه اختلاف زمانی مختلف میان دو پالس نشان می‌دهند. از این نمودارها درمی‌یابیم که هر چه اختلاف زمانی میان دو پالس دمش کم‌تر باشد، پهنای پالس اصلی برای دستیابی به بیشینه بهره نیز بایستی کم‌تر باشد و بالعکس یعنی با افزایش تأخیر زمانی میان دو پالس، بیشینه بهره در پهنای بزرگ‌تر پالس اصلی به دست می‌آید. نتیجه دیگری که از این نمودارها می‌توان گرفت این است که قطعاً یک پهنای بهینه پالس اصلی برای دستیابی به بیشینه بهره وجود دارد. به‌عنوان مثال، در زمان ۱۵۰ ps (شکل ۶-ب) پهنای بهینه ۱ ps به دست آمد که در شکل ۵ نیز مشاهده شد. هم‌چنین مشاهده می‌شود که در همه حالات با افزایش شدت، بیشینه بهره نیز افزایش می‌یابد که این نیز منطبق با نمودار شکل ۴ است.

با استفاده از نتایج شکل ۶، نمودار دویبعدی بهره بر حسب مکان (فاصله از سطح هدف) را در زمانی که بیشینه بهره موجود است، در شکل ۷ رسم کرده‌ایم. همان‌گونه که از شکل ۷ پیداست، بهترین اختلاف زمانی در این شبیه‌سازی‌ها ۱۵۰ ps است که هم دارای بهره بالاست و هم پهنای مکانی نسبتاً خوبی دارد.



شکل ۸. نمودار رنگی بیشینه ضرب بهره در طول موج ۱۹۶ nm برحسب مکان و زمان برای سه اختلاف زمانی میان دو پالس.

در ادامه برای تفسیر این نتایج، پارامترهای هیدرودینامیکی چگالی الکترونی و دمای الکترون خروجی از کد که توصیف‌کننده پلاسمایی با شرایط بهینه برای تولید بیشینه بهره لیزر پرتو ایکس نرم در طول موج ۱۹۶ nm می‌باشد، در شکل ۹ ترسیم شده است. این پارامترها در حالتی که یک پیش‌پالس دمش با شدت $I = 2 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ و پهنای ۳۰۰ ps و سپس پالس اصلی با شدت $I = 7 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ و پهنای ۱ ps با اختلاف زمانی ۱۵۰ ps و با طول موج ۸۰۰ nm به سطح هدف تابیده می‌شود، در سه زمان مختلف به دست آمده است. در شکل ۹ چگالی الکترونی و دمای الکترون‌ها در سه زمان $t = 250 \text{ ps}$ (زمانی که تنها پیش‌پالس اعمال شده)، $t = 301 \text{ ps}$ (زمان اعمال پالس اصلی و در حالت وجود بیشینه

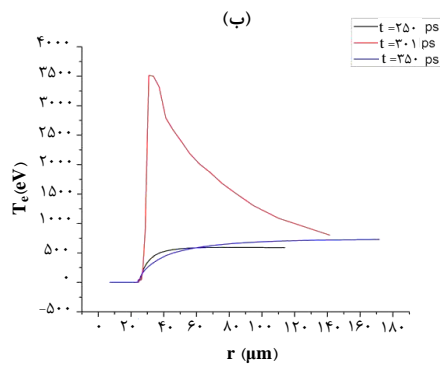


شکل ۷. بیشینه ضرب بهره در طول موج ۱۹۶ nm برحسب مکان برای سه اختلاف زمانی میان دو پالس دمش.

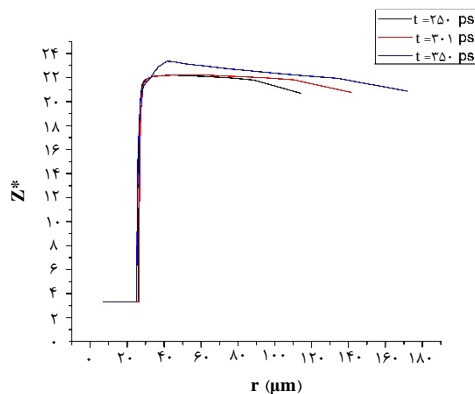
در ادامه نمودار سه‌بعدی ضرب بهره برای یک پالس دمش بهینه با پیش‌پالسی با شدت $I = 2 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ و پهنای ۳۰۰ ps و یک پالس اصلی با شدت $I = 7 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ و پهنای ۱ ps در سه اختلاف زمانی مختلف در فضا و زمان در شکل ۸ ترسیم شده است. همان‌گونه که می‌بینیم با افزایش اختلاف زمانی دو پالس دمش، ناحیه بهره گسترش پیدا می‌کند. این به این دلیل است که وقتی پیش‌پلازما فرصت گسترش دارد، دمای آن کاهش و ظرفیت پلازما افزایش می‌یابد و پیش‌پلازما می‌تواند انرژی بیشتری از پالس اصلی جذب نموده و بنابراین ناحیه بهره بزرگ‌تر می‌شود. از این‌رو، در اختلاف زمانی کم علی‌رغم ضرب بهره بالا، توسعه مکانی خوبی برای پیمایش پرتو ایکس در بهره بالا وجود ندارد و اما در اختلاف زمانی زیاد نیز علی‌رغم توسعه فضایی بهره، به دلیل کاهش چگالی پلازما مقدار بیشینه ضرب بهره کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بهترین حالت، حالت اختلاف زمانی حدود ۱۵۰ ps است که هم بیشینه ضرب بهره بالاست و هم توسعه فضایی نسبتاً خوبی دارد.

این نتایج علاوه بر انطباق با نتایج شبیه‌سازی‌ها از طریق کد EHYBRID [۲۳]، با نتایج تجربی نیز هماهنگ است [۲۴]. هرچند از آنجایی که در این پژوهش از پیش‌پالس با پهنای چند صد پیکوثانیه و مرتبه شدت 10^{13} W/cm^2 استفاده شده است، به ضرایب بهره بالاتری نسبت به مرجع [۲۳] دست یافته‌ایم. هم‌چنین باید توجه داشت که ضرب بهره در شبیه‌سازی‌ها حدود ۲ تا ۳ برابر نتایج آزمایشات تجربی است و این قابل قبول می‌باشد زیرا بهره‌ی اندازه‌گیری‌شده در آزمایشات مجموعه‌ای از مقادیر بهره در فضا و زمان است و شکست پرتو ایکس در طول پلازما باعث کاهش ضرب بهره لیزر پرتو ایکس می‌شود [۳۱].





شکل ۹. شبیه‌سازی پارامترهای هیدرودینامیکی هدف ژرمانیم تحت تابش دو پالس لیزر با تأخیر زمانی ۱۵۰ ps در سه زمان متفاوت. (منحنی سیاه زمانی است که فقط پیش‌پالس وارد شده ($t=250$ ps)، منحنی قرمز زمان بیشینه ضریب بهره یون ژرمانیم شبه نئون بلافاصله پس از ورود پالس اصلی ($t=301$ ps) و منحنی آبی در زمان $t=350$ ps پس از شروع شبیه‌سازی هاست. الف) چگالی الکترون، ب) دمای الکترون.



شکل ۱۰: شبیه‌سازی میانگین درجه یونش (بار میانگین محیط) برای پلاسمای هدف ژرمانیم تحت تابش دو پالس لیزر با تأخیر زمانی ۱۵۰ ps در سه زمان متفاوت. (منحنی سیاه زمانی است که فقط پیش‌پالس وارد شده ($t=250$ ps)، منحنی قرمز زمان بیشینه ضریب بهره یون ژرمانیم شبه نئون بلافاصله پس از ورود پالس اصلی ($t=301$ ps) و منحنی آبی در زمان $t=350$ ps پس از شروع شبیه‌سازی هاست.

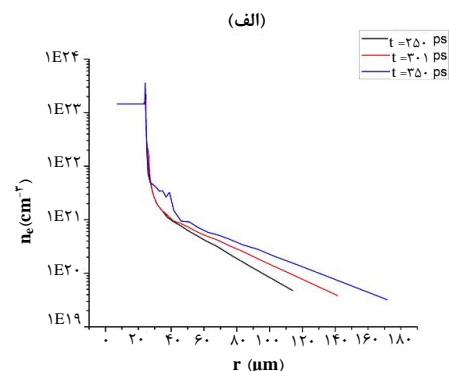
در نهایت در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ ضریب بهره لیزر پرتو ایکس نرم ژرمانیم شبه نئون در طول‌موج‌های ۲۳/۲۲ nm و ۲۳/۶۲ nm برای پهنا و شدت‌های متفاوت پالس اصلی و سه اختلاف زمانی مختلف میان دو پالس دمش شبیه‌سازی شده است. این شکل‌ها در مقایسه با شکل ۶ (در طول‌موج ۱۹/۶ nm) نشان می‌دهند که در این سه طول‌موج، رفتار ضریب بهره در پهنا و شدت‌های مختلف، مشابه بوده با این تفاوت که مقدار ضریب بهره با افزایش طول‌موج خروجی کاهش می‌یابد.

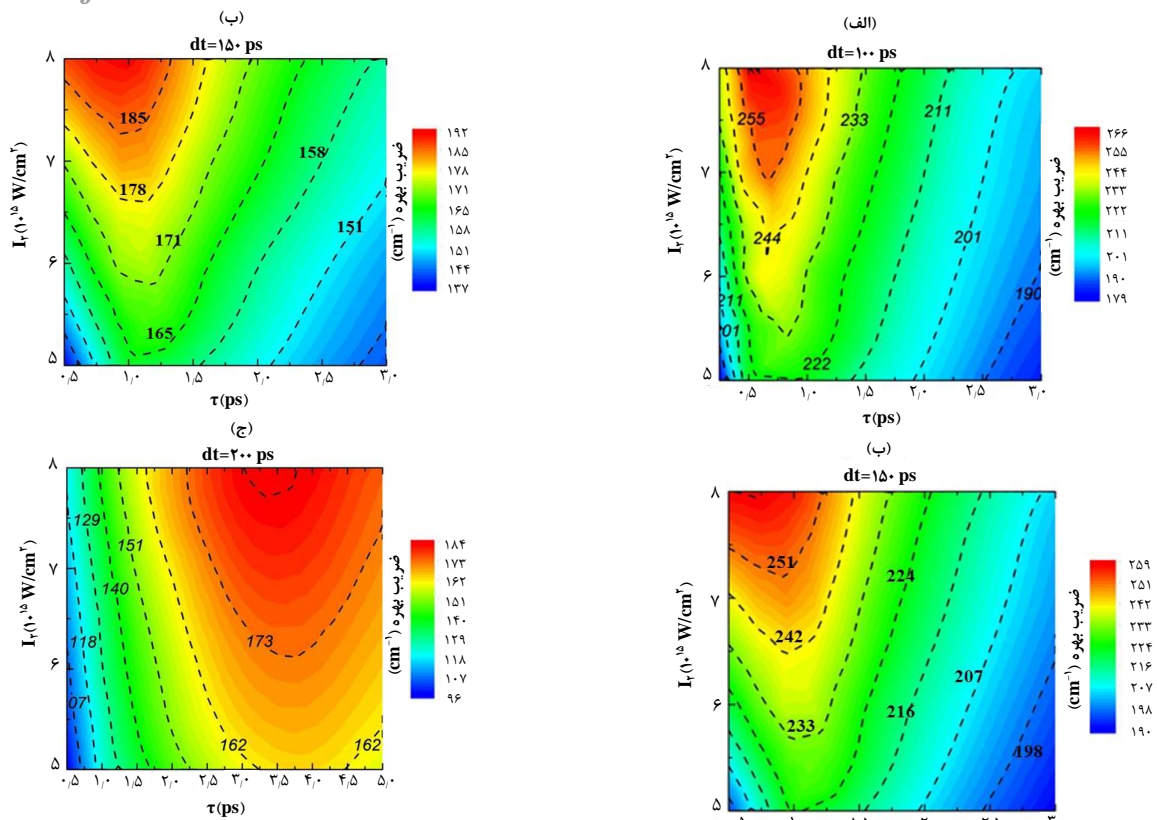
ضریب بهره) و $t=350$ ps (زمانی که هر دو پالس اعمال شده) ترسیم شده است. با توجه به در نظر گرفتن ضخامت $25 \mu\text{m}$ برای سطح هدف، افزایش ناگهانی چگالی در محدوده $25 \mu\text{m}$ در شکل ۹- الف نشان‌دهنده موج ضربه می‌باشد. هم‌چنین گرادیان چگالی الکترون نزدیک نقطه بیشینه بهره که با توجه به شبیه‌سازی‌های گذشته (به‌عنوان مثال شکل ۷) در فاصله ۳۰ تا ۴۰ میکرومتر از سطح هدف رخ می‌دهد، خیلی بالاست. شکل ۹- ب نیز نشان می‌دهد که دمای الکترون در این فاصله از سطح هدف هم‌زمان با دمش پالس اصلی یعنی در زمان $t=301$ ps (زمان بیشینه بهره) افزایش چشمگیری دارد. بنابراین مشاهده می‌شود در مکانی که چگالی الکترونی و به‌ویژه دما مقادیر قابل‌توجهی دارند، تولید پرتو ایکس نرم بیش‌تر است.

همان‌گونه که از روابط ۶ تا ۱۰ مشخص است، شدت بهره با افزایش جمعیت تراز بالایی گذار لیزری افزایش می‌یابد. تراز بالایی گذار لیزر نیز به چگالی الکترونی و آهنگ برانگیختگی‌ها وابسته است. آهنگ برانگیختگی‌های برخوردی از حالت پایه یون شبه نئون به حالت برانگیخته و هم‌چنین میان حالت‌های برانگیخته وابسته به دمای الکترون است. این آهنگ‌ها با افزایش دمای الکترون افزایش می‌یابند [۳۵]. بنابراین افزایش هم‌زمان چگالی و دمای الکترونی شرایط مناسب برای افزایش بهره لیزر پرتو ایکس را فراهم می‌نماید.

در نتیجه با استفاده از کد MED103 می‌توان با تنظیم پارامترهای لیزر دمش، پارامترهای بهینه پلاσμα را برای دستیابی به بهره‌های بالا در طول‌موج‌های لیزر پرتو ایکس نرم به‌دست آورد.

شکل ۱۰ میزان یونش پلاσμα را در سه زمان مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل ۱۰ مشخص است، در زمان $t=301$ ps، بیش‌ترین مقدار یون ژرمانیم شبه نئون (۲۲ بار یونیده) مشاهده می‌شود، زیرا این نمودار دارای یکنواختی در فاصله بیش‌تری برای یون ژرمانیم ۲۲ بار یونیده می‌باشد. بنابراین در این زمان بایستی بهره لیزر پرتو ایکس نرم در طول‌موج ۱۹/۶ nm بیشینه باشد که در شکل ۸- ب نیز همین‌گونه بوده است و همه شکل‌های مربوط به بیشینه ضریب بهره نیز در همین زمان ترسیم شده‌اند.

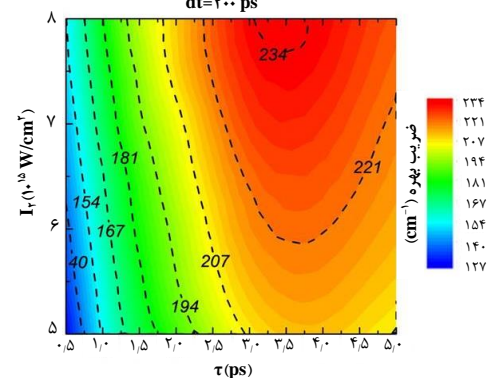




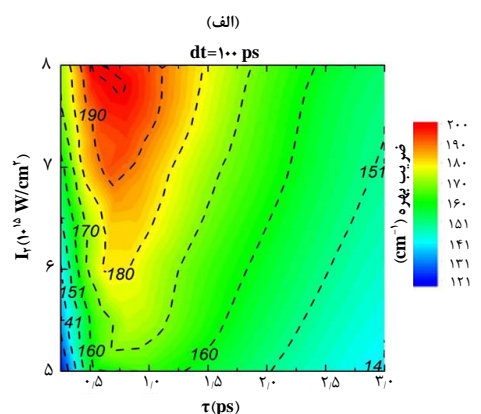
شکل ۱۲. بیشینه ضریب بهره برای طول‌موج ۲۳٫۶۲ nm در پهنای و شدت‌های متفاوت پالس اصلی سه اختلاف زمانی مختلف میان دو پالس دمش (الف) ۱۰۰ ps؛ (ب) ۱۵۰ ps؛ (ج) ۲۰۰ ps.

۵. نتیجه‌گیری

محیط فعال پلاسمایی حاصل از برهم‌کنش یک لیزر دو پالسی با سطح هدف ژرمانیم در شرایط خاص منجر به تولید لیزر پرتو ایکس نرم خواهد شد. در این پژوهش به بررسی اثر تغییرات شدت، پهنای پالس و اختلاف زمانی میان دو پالس دمش پرداخته شده و شرایط بهینه برای دستیابی به بیشینه بهره محیط فعال پلاسمایی لیزر پرتو ایکس نرم به‌دست آمده است. از این شبیه‌سازی‌ها که با استفاده از کد هیدرودینامیکی یک‌بعدی MED103 انجام شده است، درمی‌یابیم که برای دستیابی به بیشینه بهره، لیزر پیش‌پالس دمش باید دارای شدت و پهنای بهینه باشد، ولی در بررسی پالس اصلی لیزر دمش به این نتیجه رسیدیم که با افزایش شدت، بهره نیز افزایش می‌یابد، اما قطعاً یک پهنای بهینه برای پالس اصلی وجود دارد. همچنین هر چه اختلاف زمانی میان دو پالس لیزر دمش کم‌تر باشد، پهنای پالس اصلی برای دستیابی به بیشینه بهره نیز بایستی کم‌تر باشد و بالعکس یعنی با افزایش اختلاف زمانی میان دو پالس، بیشینه بهره در پهنای بزرگ‌تر پالس اصلی به‌دست می‌آید. همچنین در یک شرایط ثابت شدت و پهنای، یک اختلاف زمانی بهینه نیز موجود است زیرا در تأخیر زمانی خیلی کم، پلازما فرصت گسترش ندارد و ظرفیت آن کم می‌باشد و در تأخیرهای زیاد نیز چگالی پلازما برای تولید بیشینه بهره لیزر پرتو ایکس کاهش می‌یابد که در هر دو حالت باعث کاهش بهره لیزر پرتو ایکس نرم خواهد شد.



شکل ۱۱. بیشینه ضریب بهره برای طول‌موج ۲۳٫۲۲ nm در پهنای و شدت‌های متفاوت پالس اصلی برای سه اختلاف زمانی مختلف میان دو پالس دمش (الف) ۱۰۰ ps؛ (ب) ۱۵۰ ps؛ (ج) ۲۰۰ ps.



18. J. Dunn et al. *Demonstration of transient gain x-ray lasers near 20 nm for nickellike yttrium, zirconium, niobium, and molybdenum*, *Opt. Lett.* **24**, 101 (1999).
19. M. P. Kalachnikov et al. *Saturated operation of a transient collisional x-ray laser*, *Phys. Rev. A* **57**, 4778 (1998).
20. Y. L. Li et al. *Saturated tabletop x-ray laser system at 19 nm*, *J. Opt. Soc. Am. B* **17**, 1098 (2000).
21. K. A. Janulewicz et al. *Influence of pump pulse parameters on the collisionally pumped germanium X-ray laser in the transient gain regime*, *Opt. Commun.* **168**, 183-193 (1999).
22. P. B. Holden et al. *A computational investigation of the neon-like germanium collisionally pumped laser*, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **27**, 341-367 (1994).
23. S. B. Healy et al. *Transient high gains at 196 Å produced by picosecond pulse heating of a preformed germanium plasma*, *Opt. Commun.* **132**, 442-448 (1996).
24. P. J. Warwick et al. *Observation of high transient gain in the germanium x-ray laser at 19.6 nm*, *J. Opt. Soc. Am. B* **15**, 6, 1808-1814 (1998).
25. S. Eliezer, *The Interaction of High-Power Lasers with Plasmas*, (IOP Publishing Ltd, Philadelphia, 2002).
26. P. Gibbon, *short pulse laser interactions with matter: An introduction*, (Imperial College Press, London, 2005).
27. 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.* **25**, 2745-2762 (1992).
28. A. Djaoui, *A user guide for the laser-plasma simulation code: MED103*, *PAL-TR-96-099* (1996).
29. Y. J. Li, X. Lu, J. Zhang, *Effects of delay time on transient Ni-like x-ray lasers*, *Phys. Rev. E* **66**, 046501, (2002).
30. X. Lu, Y. J. Li, J. Zhang, *Transient characteristics of a neon-like x-ray laser at 19.6 nm*, *Physics Of Plasmas*, **9**, 4, 1412-1415 (2002).
31. X. Lu, Y. J. Li, J. Zhang, *Optimization of Drive Pulse Configuration for a High-Gain Transient X-Ray Laser at 19.6 nm*, *CHIN. PHYS. LETT.* **18**, 10, 1353 (2001).
32. D. Alessi et al. *High repetition rate operation of saturated tabletop soft x-ray lasers in transitions of neon-like ions near 30 nm*, *Opt. Express*, **13**, 2093 (2005).
33. D. Alessi et al. *Efficient Excitation of Gain-Saturated Sub-9-nm-Wavelength Tabletop Soft-X-Ray Lasers and Lasing Down to 7.36 nm*, *Phys. Rev. X* **1**, 2, 021023 (2011).
34. G. Ghani Moghadam et al. in: *7th conference on engineering and physics of plasma*, (Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran, 2019) (In Persian).
35. X. Lu et al. *Numerical optimization of a picosecond pulse driven Ni-like Nb x-ray laser at 20.3 nm*, *Physics Of Plasmas*, **10**, 7, 2978 (2003).

در نهایت دیده شد، این شرایط بهینه لیزر دمش باعث افزایش چشمگیر دمای الکترونی پلاسما می شود که با افزایش برانگیختگی های برخوردی همراه بوده و منجر به تولید بیشینه ضریب بهره لیزر پرتو ایکس نرم خواهد شد.

مراجع

1. H. Daido, *Review of soft x-ray laser researches and developments*, *Rep. Prog. Phys.* **65**, 1513-1576 (2002).
2. S. Suckewer and P. Jaegle, *X-Ray laser: past, present, and future*, *Laser Phys. Lett.* **6**, 411-436 (2009).
3. G. J. Tallents, *The physics of soft x-ray lasers pumped by electron collisions in laser plasmas*, *J. Phys D: Appl. Phys.* **36**, R259 (2003).
4. B. Rus, et al. *Multi-millijoule, deeply saturated x-ray laser at 21.2 nm for applications in plasma physics*, *Plasma Phys. Control. Fusion* **44**, B207-B223 (2002).
5. T. Mocek et al. *Beam properties of a deeply saturated, half-cavity zinc soft-x-ray laser*, *J. Opt. Soc. Am. B* **20**, 1386 (2003).
6. G. Ghani-Moghadam, A. H. Farahbod, *Investigation of self-filtering unstable resonator for soft X-ray lasers*, *Opt. Commun.* **371**, 154 (2016).
7. G. Ghani Moghadam and A. H. Farahbod, *General formula for calculation of amplified spontaneous emission intensity*, *Opt. Quant. Electron.* **48**, 227 (2016).
8. D. L. Matthews et al. *Demonstration of a soft x-ray amplifier*, *Phys. Rev. Lett.* **54**, 110 (1985).
9. P. Jaegle et al. *High gain-production efficiency and large brightness X-UV laser at Palaiseau*, *AIP Conference Proceedings* **332**, 25 (1995).
10. A. Carillon et al. *Saturated and near-diffraction-limited operation of an XUV laser at 23.6 nm*, *Phys. Rev. Lett.* **68**, 2917 (1992).
11. J. A. Koch et al. *Observation of gain-narrowing and saturation behavior in Se x-ray laser line profiles*, *Phys. Rev. Lett.* **68**, 3291 (1992).
12. J. Nilsen et al. *Prepulse technique for producing low-Z Ne-like x-ray lasers*, *Phys. Rev. A* **48**, 4682 (1993).
13. G. F. Cairns et al. *Using low and high prepulses to enhance the J= 0-1 transition at 19.6 nm in the Ne-like germanium XUV laser*, *Opt. Commun.* **123**, 777 (1996).
14. J. Nilsen and J. C. Moreno, *Nearly Monochromatic Lasing at 182 Å in Neonlike Selenium*, *Phys. Rev. Lett.* **74**, 3376 (1995).
15. A. Behjat et al. *The effects of multi-pulse irradiation on X-ray laser media*, *Opt. Commun.* **135**, 49 (1997).
16. 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**, 056408, (2010).
17. J. Dunn et al. *Demonstration of x-ray amplification in transient gain nickel-like palladium scheme*, *Phys. Rev. Lett.* **80**, 2825 (1998).

استناد به این مقاله

غزاله غنی مقدم، سمیه رضایی، محمدجعفر جعفری، امیرحسین فرهید (۱۴۰۰)، بهینه سازی شرایط لیزر دمش در تولید بیشینه بهره لیزر پرتو ایکس نرم ژرمانیم شبه نئون،

۸۷-۷۸، ۹۶

DOI: 10.24200/nst.2021.1203

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1203.html

