مجله علوم و فنون هسته ای، جلد ۹۶، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۰

Journal of Nuclear Science and Technology Vol. 96, No. 3, 2021

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

غزاله غنی مقدم<sup>®۱</sup>، سمیه رضایی<sup>۲</sup>، محمدجعفر جعفری<sup>۲</sup>، امیرحسین فرهبد<sup>۲</sup>

۱. دانشگاه حضرت معصومه(س)، صندوق پستی: ۱۴۵–۱۷۷۱۵، قم- ایران

۲. پژوهشکده پلاسما و گداخت هستهای، پژوهشگاه علوم و فنون هستهای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۵۱۱۱۵–۱۴۳۹۹، تهران- ایران \*Email: gh.ghani@hmu.ac.ir

مقالەي پژوھشى

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

### چکیدہ

پلاسماهای لیزری بهعنوان یکی از منابع تولید لیزر پرتو ایکس نرم حایز اهمیت می،اشد. 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 تقویت کننده پلاسمایی میتابد و بهره لیزر پرتو ایکس نرم در طول موج ۱۹٬۶ 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 شبیه سازی 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 حالی که با افزایش شدت پالس اصلی دمش، این مقدار بهطور پیوسته افزایش مییابد. هم چنین مناطق بهینه مکانی و زمانی بهره مییابد در حالی که با افزایش شدت پالس اصلی دمش، این مقدار بهطور پیوسته افزایش مییابد. هم چنین مناطق بهینه مکانی و زمانی بهره

كليدواژهها: برهم كنش ليزر - پلاسما، ژرمانيم شبه نئون، ليزر پرتو ايكس نرم، محيط فعال پلاسمايي

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

#### G. Ghani Moghadam<sup>1\*</sup>, S. Rezaei<sup>2</sup>, M. J. Jafari<sup>2</sup>, A. H. Farahbod<sup>2</sup>

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, AEOI, 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 geranium 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

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 تداخل سنجی و رادیوگرافی سوختهای فشرده شده در حوزه گداخت محصورسازی لختی (ICF) <sup>۱</sup> استفاده می شود [۲]. پلاسماهای لیزری یا همان پلاسماهای تولیدشده از طریق لیزرهای اپتیکی پرتوان یکی از منابع تولید لیزر پرتو ایکس نرم هستند که در بسیاری از تحقیقات تجربی و نظری مورد استفاده قرارگرفتهاند [۸–۳]. اولین تجربه آزمایشگاهی برای تولید لیزر پرتو ایکس نرم در سال ۱۹۸۵ به استفاده از سلنیم ۲۴ بار یونیده (Se<sup>+۲۴</sup>) بهعنوان محیط فعال باز می گردد [۸]. سپس پیشرفت چشم گیری به صورت نظری و تجربی با استفاده از روش های مختلف دمش لیزری پرتو ایکس حاصل شد [۲]. از انواع مختلف روش دمش، دمش برخوردی گسترش پیدا کرد و بهره اشباع در طولموجهای 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 مریی بر روی هدف متمرکز و محیط پلاسما ایجاد میشود. پس از آن، انبوهی وارون ترازهای 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 خودبه خودی تقویتشده (ASE) <sup>۲</sup> بهوجود میآید. از آنجایی که بازدهی تولید لیزر پرتو ایکس از لیزرهای اپتیکی نسبتاً پایین بود، از یک پیش پالس برای تقویت بازدهی تولید لیزرهای پرتو ایکس نرم شبه نئون در چندین آزمایش بهصورت موفقیتآمیزی استفاده گردید [۱۲و۱۳]. تحقیقات نشان میدهد استفاده از محیط فعال پلاسمایی و به کارگیری رهیافت دمش برخوردی با استفاده از دمش گذرا بیشترین بهره را در تولید پرتو ایکس نرم دارد[٣]. برای یونهای شبه نئون شرایط پلاسمایی بایستی بهگونهای بهینه شود که بیشینه نرخ برانگیختگی برخوردی حاصل شود. به این منظور با استفاده از یک پیش پالس 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 پیش پالس، بیشتر و میزان کمتری از انرژی صرف گسترش پلاسما می شود. 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 می شود. این افزایش سریع دمای الکترونی از طریق تابش پلاسمای تولید شده با یک پالس لیزری کوتاه (چند پیکوثانیه) و شدت بالا ممکن می شود. این پالس به قدری سریع است که

از فرايندهايي مثل واهلش، هدايت گرمايي، گسترش و یونیزاسیون مجدد و یا فرایندهای معکوس در حین دمش جلوگیری می شود. در آزمایش های متعدد محاسباتی و تجربی از یک پیش یالس با پهنای نانوثانیه و یک پالس اصلی با پهنای پیکوثانیه و تأخیر زمانی حدود چند نانوثانیه استفاده شده است [۲۲-۱۷]. در این آزمایشها، شدت و پهنای پیش پالس برای تولید پیش پلاسمایی با چگالی بالای یونهای شبه نئون به اندازه کافی قوی نیست و تنها پیش پلاسمایی سرد با گرادیان چگالی پایین تولید می کنند. بههمین دلیل پالس اصلی بایستی علاوه بر توليد جمعيت وارون گذار، پيش پلاسما 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 ۱۰۰cm<sup>-۱</sup> برای لیزر پرتو ایکس شبه نئون ژرمانیم در طولموج ۱۹٬۶ nm با استفاده از پیش پالسی با پهنای ۱ ns و شدت W / cm<sup>۲</sup> و پالس اصلی با پهنای ps و پالس اصلی با EHYBRID شدت  $I = 1 \cdot \sqrt{W/cm}$  با استفاده از کد  $I = 1 \cdot \sqrt{W/cm}$ پیشبینی شد[۲۳]. اگرچه در آزمایشات تجربی، بیشینه ضریب بهره در حدود نصف یا کمتر از نتایج شبیهسازی بهدست آمد [۲۴]. این میزان اختلاف بهدلیل شکست پرتو در طول پلاسما و شرایط واقعی محیط آزمایش مورد انتظار است. از آنجایی که تعيين شرايط بهينه شكل ليزر دمش بهصورت تجربى بهدليل وجود پارامترهای متعدد، آسان نیست، شبیهسازیها و مطالعات محاسباتی در این حوزه میتواند بسیار مفید واقع شود. در این یژوهش شرایط لیزر دمش برخوردی با استفاده از دو پالس دمش برای تولید بیشینه بهره لیزر پرتو ایکس نرم شبه نئون ژرمانیم در طولموجهای ۲۳٬۲۲nm ،۱۹٬۶nm و ۲۳٬۶۲nm با استفاده از کد هیدرودینامیکی یکبعدی MED103 مورد بررسی قرار گرفته است و تأثیر پارامترهای مختلف پالس دمش بر روى بهره محيط فعال پلاسماى ليزر يرتو ايكس نرم شبیهسازی 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 می شود پیش پلاسمایی با درجه یونش بالا تولید و پالس اصلی با یهنای خیلی کم تنها باعث تولید جمعیت وارون گذار و در نتيجه افزايش بهره ليزر يرتو ايكس نرم شود.

### ۲. کد هیدرودینامیکی MED103

در برهم کنش لیزر پرشدت پالس کوتاه با ماده از سه مدل ذرهای، جنبشی و سیالی استفاده میشود [۲۵و۲۶]. در مدل سیالی همواره فرض بر این است که پلاسما در تعادل موضعی حرارتی بوده و بهعبارتی تابع توزیع ذرات آن، تابع ماکسول با دمای مشخص T<sub>e</sub> و T میباشد [۲۶]. تحت این شرایط، پلاسما با متغیرهای ماکروسکوپیک آن مثل چگالی، فشار، سرعت سیال و غیره توصیف میشود. در مدل تک سیالی و دو دمایی



<sup>1.</sup> Inertial Confinement Fusion

<sup>2.</sup> Amplified spontaneous emission

خودبهخودی، N<sub>i</sub> انبوهی تراز i و n<sub>e</sub> چگالی الکترونی است. آهنگهای برخورد الکترونی با توزیع سرعت ماکسولی برای الکترونها بهصورت زیر محاسبه میشوند.

$$C_{kl} \approx 1/\mathcal{F} \times 1 \cdot \frac{1}{2} \frac{f_{lk} < G >}{\Delta E_{lk} \sqrt{kT_e}} e^{-\Delta E_{lk} / kT_e}$$
(V)

$$C_{kl} \approx \frac{g_l}{g_k} C_{lk} e^{\frac{\Delta E_{lk}}{kT_e}} \tag{A}$$

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

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

$$g_{.}(v = v_{.}) = (N_{k} - \frac{g_{k}}{g_{l}} N_{l}) \sigma_{stim}(v = v_{.})$$
(9)

سطح مقطع گسیل القایی در  $v = v_{.}$  است و به صورت زیر محاسبه می شود.

$$\sigma_{stim}(\nu) = \Phi(\nu) \frac{\lambda^{\mathsf{Y}}}{\lambda \pi} A_{kl} \tag{(1)}$$

در این رابطه،  $\lambda$  طول موج لیزر و ( $\psi(v)$  تابع شکل خط طیف است که به پهن شدگی طیفی در محیط بهره وابسته است. اگر فقط شکل خط را داپلری در نظر بگیریم و آن را در مرکز بخواهیم، داریم:

$$\Phi_D(\cdot) = \lambda \left(\frac{m}{\mathrm{Y}\pi kT_i}\right)^{1/\mathrm{Y}} \tag{11}$$

که *m* جرم اتمی یونهای مولد لیزر و *T* 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 می کند و مختصات و حجم هر سلول یک گام زمانی جلوتر از دما و فشار الکترونی محاسبه می شود. هم چنین این مقدار گام زمانی با میزان تغییرات نسبی دما و حجم نیز محدود می شود. 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 می شود و از این معادلات بقای جرم، تکانه و انرژی با روابط ۱ تا ۴ بیان میشود [۲۵].

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

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla ..(\rho u u) = -\nabla .(P_i + P_e) \tag{(Y)}$$

$$\frac{\partial \rho E_i}{\partial t} + \nabla [\rho E_i u + (P_i)u] = S_i + \nabla q_i \tag{(7)}$$

$$\frac{\partial \rho E_e}{\partial t} + \nabla [\rho E_e u + (P_e)u] = S_e + \nabla .q_e \tag{(f)}$$

در این معادلات،  $\rho$  چگالی، u بردار سرعت،  $P_i$  و  $P_i$  فشار یون و الکترون،  $E_e$  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  $q_i$  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].

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

در رابطه ۵،  $\rho$   $(\partial U/\partial p) = C_V = C_V = (\partial U/\partial p) = B_T$  است که U انرژی درونی سیستم میباشد. S منبع انرژی خارجی سیستم است که در توصیف هیدرودینامیکی، انرژی لیزر بهصورت منبع انرژی خارجی در نظر گرفته میشود. مجموعه این معادلات با معادله حالت کامل میشوند که ارتباط فشار و انرژی درونی را بهصورت تابعی از چگالی و دما بیان میکنند.

در پژوهش حاضر به منظور بررسی و مطالعه محیط فعال پلاسمایی طی برهم کنش لیزر با پلاسما از کد شبیه سازی هیدرودینامیکی یک بعدی MED103 استفاده شده است [۲۸و۲۸]. این کد از رهیافت لاگرانژی برای حل معادلات خودسازگار هیدرودینامیکی، برانگیختگی، یونش پلاسمای لیزری و معادلات نرخ، بهره می گیرد. گذار میان حالتهای برانگیخته و حالت پایه شامل تقریب میانگین اتمی می باشد. در پلاسمایی که شامل مراحل مختلف یونش یک عنصر مشخص می بشد، اگر گونه های یونی متفاوت تنها با یک یون میانگین جایگزین شوند آن گاه تحولات فرایند یونش به نسبت ساده می شود. کد MED103 برای بررسی رفتار ضریب بهره محیط پلاسمایی از معادلات نرخ مدل ۲۷ ترازی استفاده می کند. انبوهی ترازها در حالت شبه ایستا با رابطه ۶ داده می شود [1].

$$\frac{dN_i}{dt} = \sum_j C_{ij} n_e N_j + \sum_j A_{ij} N_i \tag{9}$$

در این معادلات  $C_{ij}$  آهنگ برانگیختگیها و فروافتهای برخوردی بین ترازهای i و j j j

طریق در هر گام زمانی انرژی پالس دمش محاسبه و در معادلات بالا جایگزین پارامتر S می شود. در نهایت پارامترهای ماکروسکوپیک مثل دما و چگالی الکترونی پلاسما، یونش و نیز بهره تولید پرتو ایکس نرم از طریق کد محاسبه می شود.

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 بهوسیله 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 بهوسیله 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 الكتروني پلاسما از مرتبه چند صد الكترونولت است. از سوى دیگر برای این که برانگیختگی برخوردی محتمل باشد، چگالی بالا و از مرتبه <sup>۳۰</sup> ۲۰<sup>۰۰</sup> مورد نیاز است. در نهایت انواع يون هايي كه بيشترين تناسب را براي اين سازوكار 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 ساز وکار دمش تولید شده است [۹-۲۴]. با این حال روشهای متفاوتی برای تولید پلاسما مورد استفاده قرار گرفته است که یکی از آن ها دمش گذرا میباشد (شکل ۱). این روش، شامل دو پالس دمش با تأخیر زمانی چند صد ps است. پالس اول (پیش پالس) پالسی طولانی با پهنای چند صد ps به هدف جامد برخورد مینماید و پلاسما را با درجه یونش لازم تولید مىكند. پالس دوم (پالس اصلى) كه پالسى كوتاه با پهناى زمانی چند ps است الکترونهای آزاد را به سرعت و در زمانی کوتاهتر از زمان یونش پلاسما، تا چند صد eV گرم میکند. در نتيجه، شرايط لازم براى دمش يون هاى فعال ليزر بهوسيله برانگیختگی برخوردی آماده میشود بهگونهای که بهره لیزر یرتو ایکس نرم بالا باشد [۳۲ و ۳۳]. هدف استفاده شده در این تحقيق ژرمانيم با عدد اتمي ٣٢ است كه يون شبه نئون آن دارای ۲۲ بار یونیده (Ge<sup>+۲۲</sup>) می باشد. در واقع بهره از گذار میان ترازهای ۲p<sup>۵</sup>۳p و ۲p<sup>۵</sup>۳۶ در یونهای شبه نئون اتفاق می افتد.

#### ۴. شبیهسازی و نتایج

در پژوهش اخیر، از یک لیزر دوپالسی با پهناهای پیکوثانیه در برخورد با سطح ژرمانیم استفاده شده و شرایط لیزر دمش در تولید بیشینه بهره لیزر پرتو ایکس نرم در طولموج ۱۹٬۶ nm مورد بررسی قرار گرفته است [۳۴]. در این پژوهش نیز پس از بررسی کامل پارامترهای لیزر دمش، شرایط بهینه پالس دمش برای پالسهای پیکوثانیهای و یون ژرمانیم شبه نئون در طولموج nm ارایه و مناطق بهینه مکانی و زمانی بهره لیزر پرتو ایکس نرم در شرایط مختلف اختلاف زمانی دو پالس ترسيم شده است. همچنين پارامترهاي هيدروديناميكي پلاسما که باعث تولید این شرایط بهینه می شوند، 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 طولموج ۲۳٬۲۲ nm و ۲۳٬۶۲ نیز شبیهسازی شده است.

### ۱.۴ بررسی خصوصیات پیش پالس لیزر دمش

در این پژوهش، ابتدا یک پیش پالس با شدتهای متفاوت و پهنای ps و در نتیجه با انرژیهای مختلف و طول موج ۸۰۰ nm به سطح هدف ژرمانیم با ضخامت ۲۵ µm تابیده می شود. سیس یالس اصلی با شدت  $I = Y \times 1 \cdot^{10} \text{ W} / \text{ cm}^{2}$  و پهنای ۱ ps با همان طول موج و اختلاف زمانی ۱۵۰ میان بیشینههای دو پالس وارد می شود. در این حالت یعنی پهنای ثابت پیش پالس، ضریب بهره محیط فعال پلاسمای تولید شده برای لیزر پرتو ایکس نرم شبه نئون در طولموج ۱۹٬۶ nm برای شدتهای مختلف پیش پالس را بهدست می آوریم (شکل ۲). همان طور که از شکل ۲ دیده می شود، بهره در یک مقدار شدت و در نتیجه یک مقدار انرژی، بیشینه می شود. این انرژی برای این شبیهسازی برابر با J/cm<sup>۲</sup> است. سیس این انرژی بهینه را ثابت فرض کرده و بهره را در شدتها و در نتیجه با پهناهای متفاوت ترسیم می کنیم که در این حالت انرژی ثابت، باز هم یک شدت و پهنای بهینه خواهیم داشت.  $I = \mathsf{T} imes \mathsf{I} \cdot \mathsf{I}^{\mathsf{T}} \mathbf{W} / \mathbf{cm}^{\mathsf{T}}$  این شدتو پهنای بهینهی پیش پالس و ۳۰۰ ps بهدست آمد.



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

مجله علوم و فنون هستهای جلد ۹۶، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۰، ص ۷۸–۸۷





شکل ۲. بیشینه ضریب بهره برای طول موج ۳m ۱۹٬۶ در شدتهای متفاوت پیش پالس دمش برای پهنای ثابت ۳۰۰ (■) و برای انرژی ثابت ۱٫۰۰۴×۱۰۴ J/cm<sup>۲</sup> (●).

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  $V / cm^{\gamma} = I = X \times 10^{10} \text{ W} / cm^{\gamma}$  مقادیر علاوه بر داشتن بیشینه بهره، بیش ترین 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  $V \cdot cm^{-1}$  موجود است که جهت تقویت پرتو لیزر ایکس نرم بسیار مفید خواهد بود زیرا در این صورت پرتو لیزر ایکس نرم میتواند مسافت بیش تری در ضریب بهره بالا طی کرده و تقویت بیش تری صورت گیرد.

### ۲.۴ بررسی خصوصیات پالس اصلی لیزر دمش

در بخش قبل با استفاده از شبیهسازی، یک پیشیالس بهینه برای دستیابی به بیشینه بهره لیزر پرتو ایکس نرم در طولموج ۱۹٬۶ nm بهدست آمد. در ادامه با استفاده از این پیش پالس، خصوصیات پالس اصلی را بررسی میکنیم. برای این کار ابتدا یک پیش یالس با شدت  $I = r \times 1 \cdot^{1^{\mathsf{W}}} W / \mathrm{cm}^{\mathsf{T}}$  و پهنای ۳۰۰ps و طولموج ۸۰۰ nm به سطح هدف ژرمانیم تابیده می شود. محاسبات قبلی نشان می دهد این یالس یک یلاسما با ضریب بهره لیزر پرتو ایکس نرم بهینه را در یونهای شبه نئون ژرمانیم در طولموج ۱۹٬۶ 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 پیش پالس 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 می گیریم. بیشینه ضريب بهره محيط فعال پلاسماى توليد شده براى ليزر پرتو ایکس نرم شبه نئون در شدتهای متفاوت پالس اصلی برای این دو یهنای ثابت یالس در شکل ۴- الف ترسیم شده است.

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 ۱۹٬۶ موجود است؛ الف) در شدتها و انرژی های متفاوت پیش پالس اما با پهنای ثابت ps ۳۰۰ و ب) در شدتها و پهنای متفاوت پیش پالس اما با انرژی ثابت.



**شکل ۴.** بیشینه ضریب بهره در شدتهای متفاوت پالس اصلی برای طولموج ۱۹٬۶ m (الف) برای دو پهنای ثابت پالس اصلی و (ب) برای یک انرژی ثابت.

Journal of Nuclear Science and Technology Vol. 96, No 3, 2021, P 78-87

تفاوت این نمودارها با شکل ۲ این است که در شکل ۲ و با تغییر شدت پیش پالس، به یک شدت بهینه رسیدیم که در شدتهای بیش تر از آن، بهره کاهش پیدا می کرد، 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 ضریب بهره پس از اعمال پیش پلاس بهینه و سپس پلاس اصلی با اختلاف زمانی ۱۵۰ ps به سطح هدف ژرمانیم در طول موج ۱۹/۶ m و در شدت ۱۹/۵ ۳ ۲ ۲ ۲ ۲ پالس اصلی و برای پهناهای متفاوت پلاس اصلی رسم شده است. از این شکل درمی یابیم که پهنای بهینه ای برای این شرایط شبیه سازی وجود دارد که برابر با بهینه ای برای این شرایط شبیه سازی وجود دارد که برابر با ps است. این پهنای بهینه پالس کاملاً مورد انتظار است زیرا ز نقطه نظر فیزیکی پهنای خیلی کم (به عنوان مثال ps (۰/۵ فرصت کافی برای افزایش دمای الکترونی و در نتیجه زیاد پالس (به عنوان مثال ۳ ps) نیز باعث افزایش فرایندهای زیاد پالس (به عنوان مثال ۳ ps) نیز باعث افزایش فرایندهای زیاد پالس (به عنوان مثال ۳ ps) نیز باعث افزایش فرایندهای زیاد پالس (به عنوان مثال ۳ ps) نیز باعث افزایش فرایندهای زیاد پالس (به عنوان مثال ۳ ps) نیز باعث افزایش فرایندهای زیاد پالس (به عنوان مثال ۳ ps) نیز باعث افزایش فراینده ی زیاد پالس (به عنوان مثال ۳ ps) نیز باعث افزایش فراینده و می ای زیاد پالس (به عنوان مثال ۳ ps) نیز باعث افزایش فراینده و در نتیجه زیاد پالس (بعنوان مثال ۳ ps) نیز باعث افزایش فراینده و می می کند و پهنای زیاد پال می درون پلاسما و یا یونش مجدد و از دست رفتن یون های می شود.

در ادامه، نمودارهای رنگی شکل ۶، ضریب 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 پهناهای بزرگتر پالس اصلی بهدست 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 ۱۵۰ps (شکل 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 دوبعدی بهره برحسب مکان (فاصله از سطح هدف) را در زمانی که بیشینه بهره موجود است، در شکل ۷ رسم کردهایم. همان گونه 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 ۵. بیشینه ضریب بهره در طولموج nm منهاوت . پالس اصلی برای پالس اصلی با شدت  $I = V \times 10^{10}$  W / cm<sup>7</sup> .



**شکل ۶**. بیشینه ضریب بهره برای طولموج nM در پهناها و شدتهای متفاوت پالس اصلی برای سه اختلاف زمانی مختلف میان دو پالس دمش الف) ۱۹۰۶؛ ب) so بالس دمش الف) ۲۰۰ یا





**شکل ۷.** بیشینه ضریب بهره در طولموج n۹،۶ m برحسب مکان برای سه اختلاف زمانی میان دو پالس دمش.

در ادامه نمودار سهبعدی ضریب بهره برای یک پالس دمش بهینه با پیشپالسی با شدت  $I = r \times 1 \cdot W / cm^{r}$  و یهنای  $I = \mathsf{Y} imes \mathsf{I} \cdot \mathsf{i}^{\mathsf{a}} \, \mathrm{W} \, / \, \mathrm{cm}^{\mathsf{r}}$ و یک پالس اصلی با شدت  $\mathsf{rr}$ و پهنای ۱ ps در سه اختلاف زمانی مختلف در فضا و زمان در شکل ۸ ترسیم شده است. همان گونه که می بینیم با افزایش اختلاف زمانی دو پالس دمش، ناحیه بهره گسترش پیدا مى كند. اين به اين دليل است كه وقتى پيش پلاسما فرصت گسترش دارد، دمای آن کاهش و ظرفیت پلاسما افزایش می یابد و پیش پلاسما می تواند انرژی بیش تری از پالس اصلی جذب نموده و بنابراین ناحیه بهره بزرگتر می شود. از این و، در اختلاف زمانی کم علی رغم ضریب بهره بالا، توسعه مکانی خوبی برای پیمایش پرتو ایکس در بهره بالا وجود ندارد و اما در اختلاف زمانی زیاد نیز علی رغم توسعه فضایی بهره، بهدلیل كاهش چگالی پلاسما مقدار بیشینه ضریب بهره كاهش می یابد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که بهترین حالت، حالت اختلاف زمانی حدود ۱۵۰ ps است که هم بیشینه ضریب 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 پیش پالس با پهنای چند صد پیکوثانیه و مرتبه شدت ۲<sup>۲</sup> ۲۰<sup>۲</sup> استفاده شده است، به ضرایب بهره بالاتری نسبت به مرجع [۲۳] دست یافتهایم. همچنین باید توجه داشت که ضریب بهره در شبیهسازیها حدود ۲ تا ۳ برابر نتایج آزمایشات تجربی است و این قابلقبول میباشد زیرا بهرهی اندازه گیری شده در آزمایشات مجموعهای از مقادیر بهره در فضا و زمان است و شکست پرتو ایکس در طول پلاسما باعث کاهش ضریب بهره لیزر پرتو ایکس می شود [۳۱].



**شکل ۸.** نمودار رنگی بیشینه ضریب بهره در طولموج ۱۹،۶ m 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 طولموج nm /۹/۶ میباشد، در شکل ۹ ترسیم شده است. این پارامترها در حالتیکه یک پیش پالس دمش با شدت V / cm' و پهنای پیش پالس دمش با شدت V / cm' و پهنای ایش پالس دمش با شدت ۲ N / ۲ × ۲ = 1 و پهنای پیش پالس دمش با شدت ۲ × ۱۰ × ۲ = 1 و پهنای پیش پالس دمش با شدت ۲ ما / ۲ × ۲ = 1 و پهنای ۲۰۰۳ و سپس پالس اصلی با شدت ۲ × ۱۰ × ۲ = 1 منده است. در شکل ۹ چگالی الکترونی و دمای الکترونها در سه زمان ۲۵۰ps (زمانی که تنها پیش پالس اعمال شده)، سه زمان توجود بیشینه

ضریب بهره) و t=۳۵۰ ps (زمانی که هر دو پالس اعمال شده) ترسیم شده است. با توجه به در نظر گرفتن ضخامت μμ ۲۵ برای سطح هدف، افزایش ناگهانی چگالی در محدوده μμ ۲۵ 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 شکل ۹- ب نیز نشان میدهد که دمای الکترون در این فاصله از سطح هدف همزمان با دمش پالس اصلی یعنی در زمان بنابراین مشاهده میشود در مکانی که چگالی الکترونی و بهویژه دما مقادیر قابلتوجهی دارند، تولید پرتو ایکس نرم بیشتر است.

همان گونه 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[۲۵]. 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 پلاسما را برای دستیابی به بهرههای بالا در طولموجهای لیزر پرتو ایکس نرم بهدست آورد.

شکل ۱۰ میزان یونش پلاسما را در سه زمان مختلف نشان می دهد. همان گونه که از شکل ۱۰ مشخص است، در زمان د = ۳۰۱ps ، بیش ترین مقدار یون ژرمانیم شبه نئون (۲۲ بار یونیده) مشاهده می شود، زیرا این نمودار دارای یکنواختی در فاصله بیش تری برای یون ژرمانیم ۲۲ بار یونیده می باشد. بنابراین در این زمان بایستی بهره لیزر پرتو ایکس نرم در طول موج ۱۹/۶ nm بیشنه باشد که در شکل ۸- ب نیز همین گونه بوده است و همه شکل های مربوط به بیشینه ضریب بهره نیز در همین زمان ترسیم شدهاند.





شکل ۹. شبیه سازی پارامترهای هیدرودینامیکی هدف ژرمانیم تحت تابش دو پالس لیزر با تأخیر زمانی ۱۵۰ ps در سه زمان متفاوت. (منحنی سیاه زمانی است که فقط پیش پالس وارد شده (t=۲۵۰ ps)، منحنی قرمز زمان بیشینه ضریب بهره یون ژرمانیم شبه نئون بلافاصله پس از ورود پالس اصلی (t=۳۰۱ ps) و منحنی آبی در زمان rav ps پس از شروع شبیه سازی 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 در سه زمان متفاوت. (منحنی سیاه زمانی است که فقط پیشپالس وارد شده (T۵۰ ps)، منحنی قرمز زمان بیشینه ضریب بهره یون ژرمانیم شبه نئون بلافاصله پس از ورود پالس اصلی (t=۳۰۱ ps) و منحنی آبی در زمان t=۳۵۰ ps

در نهایت در شکلهای ۱۱ و ۱۲ ضریب بهره لیزر پرتو ایکس نرم ژرمانیم شبه نئون در طولموجهای ۳۳/۲۲ nm و سه 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 است. این شکلها در مقایسه با شکل ۶ (در طولموج نمایه بهره در پهنا و شدتهای مختلف، مشابه بوده با این تفاوت که مقدار ضریب بهره با افزایش طولموج خروجی کاهش مییابد.





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





شکل ۱۲. بیشینه ضریب بهره برای طولموج ۲۳٬۶۲ در پهناها و شدتهای متفاوت پالس اصلی برای سه اختلاف زمانی مختلف میان دو پالس دمش الف) ۲۰۰۹؛ ب) ۱۵۰ بج) ۲۰۰ به ۲۰۰۶.

### ۵. نتیجهگیری

محيط فعال پلاسمايي حاصل از برهم کنش يک ليزر دو پالسي 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 محيط فعال پلاسمايي ليزر پرتو ايکس نرم بهدست آمده است. از این شبیهسازیها که با استفاده از کد هیدرودینامیکی یکبعدی MED103 انجام شده است، درمی ابیم 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 می ابد، 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 پهناهای بزرگتر پالس اصلی بهدست میآید. همچنین در یک شرایط ثابت شدت و پهنا، یک اختلاف زمانی بهینه نیز موجود است زیرا در تأخیر زمانی خیلی کم، پلاسما فرصت گسترش ندارد و ظرفیت آن کم میباشد و در تأخیرهای زمانی زیاد نیز چگالی پلاسما برای تولید بیشینه بهره لیزر پرتو ایکس کاهش می ابد که در هر دو حالت باعث كاهش بهره ليزر پرتو ايكس نرم خواهد شد.

مجله علوم و فنون هستهای جلد ۹۶، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۰، ص ۷۸–۸۷

- 18. J. Dunn et al. Demonstration of transient gain xray 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).
- P. B. Holden et al. A computational investigation 22. 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, (Imperical College Press, London, 2005).
- 27. A. Djaoui and S.J. Rose, Calculation of the timedependent excitation and ionization in a laserproduced 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).
- X. Lu, Y. J. Li, J. Zhang, Transient characteristics 30. 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  $\hat{x}$ -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 برانگیختگیهای 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).
- S. Suckewer and P. Jaegle, X-Ray laser: past, 2. 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 xray 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).
- G.Ghani-Moghadam, A. H. Farahbod, Investigation 6. 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-diffractionlimited 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. È. 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 فرهبد (۱۴۰۰)، بهینهسازی شرایط لیزر دمش در تولید بیشینه بهره لیزر پرتو ایکس نرم ژرمانیم شبه نئون، 14-44 .46

DOI: 10.24200/nst.2021.1203 Url: https://jonsat.nstri.ir/article\_1203.html

Journal of Nuclear Science and Technology

