

## مقایسه بهره یون های شبه نئون ژرمانیوم و کریپتون در گذار اتمی یکسان

غزاله غنی مقدم<sup>۱\*</sup>، محمدجعفر جعفری<sup>۲</sup> و سمیه رضایی<sup>۳</sup><sup>۱</sup> دانشگاه حضرت معصومه (س)، قم [gh.ghani@hmu.ac.ir](mailto:gh.ghani@hmu.ac.ir)<sup>۲</sup> پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران [jafari\\_mjafar@yahoo.com](mailto:jafari_mjafar@yahoo.com)<sup>۳</sup> پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران [somaveh.rezaei@gmail.com](mailto:somaveh.rezaei@gmail.com)\*آدرس رایانامه نویسنده مسئول: [gh.ghani@hmu.ac.ir](mailto:gh.ghani@hmu.ac.ir)

کلید واژه: بهره، گذار اتمی، یون شبه نئون

## چکیده

پلاسماهای لیزری یکی از منابع تولید لیزر پرتو ایکس نرم هستند. در این پژوهش با استفاده از کد هیدرودینامیکی MED103، بهره لیزر پرتو ایکس نرم در گذار اتمی  $2p^53p^1S_0 \rightarrow 2p^53s^3P_1$  در پلاسمای تولید شده با دو ماده هدف ژرمانیوم و کریپتون بررسی و مقایسه شده است. بدین منظور، یک لیزر دمش دو پالسی با پهنای پیش پالس ۳۰۰ ps و شدت  $2 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$  و پالس اصلی با پهنای ۱ ps و شدت  $7 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$  با اختلاف زمانی ۱۵۰ ps و طول موج ۸۰۰ nm بر ماده هدف وارد شده و ضریب بهره در زمان ها و مکان های مختلف برای یون شبه نئون ژرمانیوم و یون شبه نئون کریپتون در این گذار مشخص به دست آمده است. همچنین نمودار پارامترهای هیدرودینامیکی برای هر دو یون ترسیم شده است. نتایج نشان می دهد در شرایط یکسان، رفتار ضریب بهره در هر دو یون کاملاً مشابه، فقط با این تفاوت که مقدار بیشینه ضریب بهره برای یون ژرمانیوم شبه نئون بیشتر است. می توان گفت این نتیجه ناشی از اختلاف اندک طول موج های تابشی این گذار در این دو عنصر می باشد.

## Comparison of gain for Ne-like Ge and Kr ions in the same atomic transition

Ghazaleh Ghani-Moghadam<sup>1</sup>, Mohammad Jafar Jafari<sup>2</sup> and Somayeh Rezaei<sup>2</sup><sup>1</sup> Hazrat-e Masoumeh University, Qom<sup>2</sup> Research school of plasma physics and nuclear fusion, Nuclear Reaserch Institue, North-Kargar, Tehran\*corresponding e-mail: [gh.ghani@hmu.ac.ir](mailto:gh.ghani@hmu.ac.ir)

## Abstract

Laser plasmas are one source of soft X-ray production. In this research, using hydrodynamic code MED103, the gain of soft X-ray laser in atomic transition  $2p^53p^1S_0 \rightarrow 2p^53s^3P_1$  in plasma produced with two target materials germanium and krypton has been investigated and compared. For this purpose, a two-pulse driving laser with a pre-pulse width of 300 ps and an intensity of  $2 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$  and a main pulse with width of 1 ps and intensity of  $7 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$  with a time difference of 150 ps and wavelengths of 800 nm have been applied to the target material and the gain coefficient is obtained at different times and places for Ne-like Ge and Ne-like Kr ions in this particular transition. Graphs of hydrodynamic parameters are also plotted for both ions. The results show that under the same conditions, the behavior of the gain coefficient in both ions is quite similar, except that the value of the gain coefficient for the Ne-like Ge ion is slightly higher. It can be said that this result is due to the slight difference between the radiative wavelengths of this transition in the two elements.

**Keywords:** Atomic transition, gain, Ne-like ion

## مقدمه

## شرایط شبیه سازی

در اینجا با استفاده از کد هیدرودینامیکی یک بعدی MED103، محیط فعال پلاسمایی ژرمانیوم شبه نئون و کریپتون شبه نئون در شرایط دمش یکسان و در گذار اتمی مشابه بررسی و با هم مقایسه شده است. بدین منظور از یک لیزر دمش دو پالسی با پارامترهای بهینه که موجب بیشینه ضریب بهره در یون ژرمانیوم شبه نئون می گردد و در پژوهش اخیر مورد بررسی قرار گرفته، استفاده شده است [۶]. لیزر دمش دو پالسی با پهنای پیش پالس ۳۰۰ ps و شدت  $2 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$  و پالس اصلی با پهنای ۱ ps و شدت  $7 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$  با اختلاف زمانی ۱۵۰ ps میان بیشینه دو پالس و با طول موج ۸۰۰ nm بر ماده هدف وارد می شود. با توجه به ترازهای اتمی ژرمانیوم شبه نئون و کریپتون شبه نئون، دیده شده است که گذار  $2p^5 3p^1 S_0 \rightarrow 2p^5 3s^3 P_1$  دارای بهره بالایی است [۷ و ۸]. بنابراین در این پژوهش، ضریب بهره برای این گذار مورد بررسی قرار گرفته است. گذار  $2p^5 3p^1 S_0 \rightarrow 2p^5 3s^3 P_1$  در ژرمانیوم شبه نئون با طول موج ۱۹/۶ nm و در کریپتون شبه نئون با طول موج ۱۶/۷ nm رخ می دهد.

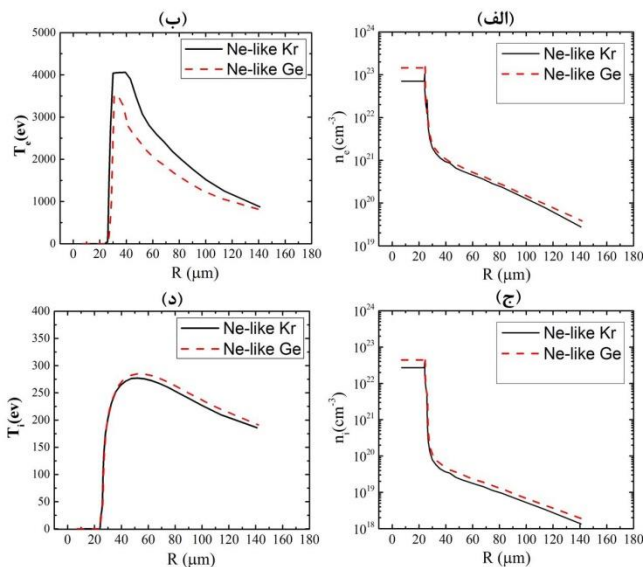
## نتایج و بحث

در شکل ۱ نمودار رنگی بیشینه ضریب بهره برحسب مکان و زمان برای گذار  $2p^5 3p^1 S_0 \rightarrow 2p^5 3s^3 P_1$  رسم شده است. همانطور که از شکل ۱ دیده می شود، بشینه بهره در هر دو عنصر در زمان  $t=301 \text{ ps}$  اتفاق می افتد. همچنین مشاهده می شود، رفتار بهره در هر دو یون یکسان ولی ضریب بهره در عنصر ژرمانیوم بیشتر از عنصر کریپتون است.

سپس پارامترهای هیدرودینامیکی در زمان بیشینه بهره یعنی  $t=301 \text{ ps}$  رسم شده است. شکل ۲ پارامترهای هیدرودینامیکی (چگالی و دمای الکترون و یون) را برای دو یون ژرمانیوم شبه نئون و کریپتون شبه نئون نشان می دهد. با مقایسه این نمودارها می توان دید که رفتار دما و چگالی های الکترون و یون در هر دو مورد کاملاً مشابه هستند. با این تفاوت که چگالی های الکترون و یون در ژرمانیوم شبه نئون اندکی بیشتر و بالعکس دمای الکترونی

پلاسمای تولید شده با لیزرهای اپتیکی پرتوان یکی از منابع تولید لیزرهای پرتو ایکس نرم هستند [۴-۱]. در این تحقیقات با استفاده از محیط فعال پلاسمایی و به کارگیری رهیافت دمش برخوردی ضریب بهره را در تولید پرتو ایکس نرم به دست می آورند. اشباع در تولید پرتو ایکس نرم در یون های شبه نئون و شبه نیکل روی می دهد. از آن جایی که آخرین تراز یون شبه نئون بسته می باشد، کندن الکترون بعدی نیاز به انرژی بیشتری دارد و حساسیت آن به شرایط پلاسما نسبت به یون شبه نیکل کمتر است. در این حالت برای یون های شبه نئون شرایط پلاسمایی بایستی به گونه ای بهینه شود که بیشینه نرخ برانگیختگی برخوردی حاصل شود. به این منظور با استفاده از یک پیش پالس و یا تکنیک های چند پالسی می توان به بهره لیزر بالا دست پیدا کرد. 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 نتیجه انرژی درونی پلاسما افزایش یافته و به علت کاهش گرادیان چگالی در عین حال که مقدار چگالی هم چنان به میزان کافی بالا است، پلاسمای تولید شده برای بهره گیری لیزر پرتو ایکس نرم مناسب می باشد. تحقیقات نشان می دهد با افزایش ناگهانی دمای الکترونی در ناحیه ای که چگالی یون های شبه نئون زیاد است، پیشرفت چشمگیری 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 فرآیندهایی مثل واهلش، هدایت گرمایی، گسترش و یونیزاسیون مجدد و یا فرآیندهای معکوس در حین دمش جلوگیری می شود.

در این پژوهش نیز از تکنیک دمش دوپالسی برای دو ماده هدف ژرمانیوم با عدد اتمی ۳۲ و کریپتون با عدد اتمی ۳۶ استفاده شده و پارامترهای هیدرودینامیکی با استفاده از کد هیدرودینامیکی MED103 [۵] ترسیم و مقایسه شده است. همچنین ضریب بهره لیزر پرتو ایکس نرم در گذار  $2p^5 3p^1 S_0 \rightarrow 2p^5 3s^3 P_1$  به دست آمده و نتایج بررسی شده اند.



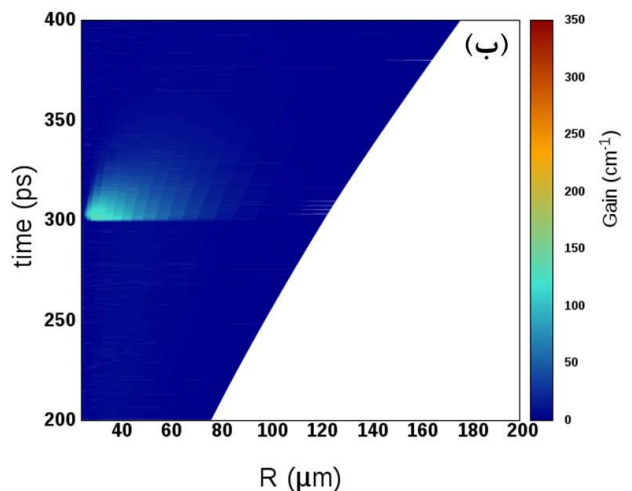
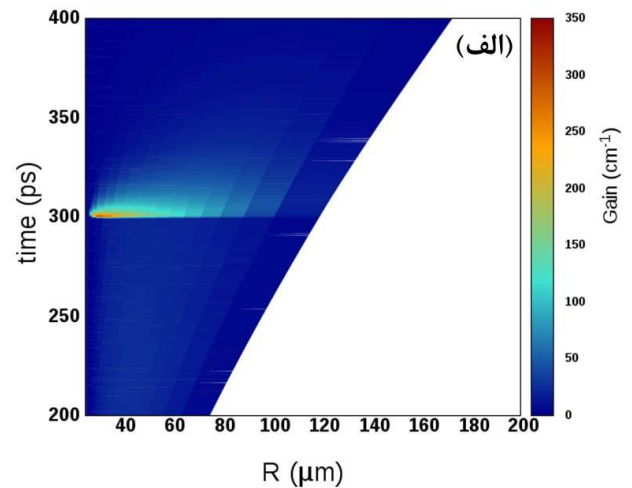
شکل ۲: شبیه سازی پارامترهای هیدرودینامیکی هدف های ژرمانیم و کریپتون تحت تابش دو پالس لیزر با تأخیر زمانی ۱۵۰ ps در زمان بیشینه بهره (الف) چگالی الکترون، (ب) دمای الکترون، (ج) چگالی یون (د) دمای یون.

این رفتار را می توان با استفاده از روابط محاسبه ضریب بهره توصیف نمود. کد MED103 برای بررسی رفتار ضریب بهره محیط پلاسمایی از معادلات نرخ مدل ۲۷ تراز استفاده می کند. با در نظر گرفتن پهن شدگی طیفی داپلری در محیط بهره پلاسماهای داغ، ضریب بهره را می توان به صورت زیر نوشت [۸]:

$$G = \frac{1}{8\pi} \left( \frac{M}{2\pi k T_i} \right)^{1/2} A_{ul} \lambda_{ul}^3 g_u \left( \frac{N^u}{g_u} - \frac{N^l}{g_l} \right) \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $M$  جرم اتمی یون،  $k$  ثابت بولتزمن،  $T_i$  دمای یون،  $\lambda_{ul}$  طول موج گذار بین تراز بالایی  $u$  و تراز پایینی  $l$  و  $g_u$  و  $g_l$  تبهگنی ترازها و  $N^u$  و  $N^l$  تعداد یون ها در واحد حجم برای هر یک از ترازهای بالایی و پایینی است. همانطور که از این رابطه دیده می شود، ضریب بهره علاوه بر پارامترهای هیدرودینامیکی و جمعیت ترازهای بالایی و پایینی لیزینگ، به طول موج تابشی گذار نیز بستگی دارد. از آنجایی که گذار  $2p^5 3p^1 S_0 \rightarrow 2p^5 3s^3 P_1$  در یون ژرمانیوم شبه نئون با طول موج ۱۹/۶ nm و در یون کریپتون شبه نئون در طول موج ۱۶/۷ nm تابش می کند و بهره نیز با توان سوم طول موج تابشی رابطه مستقیم دارد، می توان نتیجه گرفت

در آن کمتر از کریپتون شبه نئون است. دلیل عملکرد مشابه این پارامترها به چیدمان ترازهای اتمی آن ها مربوط می گردد که آخرین تراز پر شده در هر دو عنصر 4p می باشد. اختلاف اندک آن ها نیز به جهت تفاوت در عدد اتمی آن هاست که کریپتون دارای عدد اتمی ۳۶ و ژرمانیوم دارای عدد اتمی ۳۲ است.



شکل ۱: نمودار رنگی بیشینه ضریب بهره بر حسب مکان و زمان برای گذار  $2p^5 3p^1 S_0 \rightarrow 2p^5 3s^3 P_1$  با لیزر دمش دوپالسی و سطح هدف (الف) ژرمانیوم (ب) کریپتون

نکته قابل توجه این است که با وجود رفتار کاملاً مشابه پارامترهای هیدرودینامیکی در دو عنصر هدف و حتی دارا بودن دمای الکترونی بیشتر در عنصر کریپتون ولی بیشینه ضریب بهره در کریپتون شبه نئون کمتر از ژرمانیوم است.

### مرجع ها

- [1] Li, Y. L., Dunn, J., Nilsen, J., Barbee, T. W., Osterheld, A. L., and Shlyaptsev, V. N. (2000). Saturated tabletop x-ray laser system at 19 nm. *J. Opt. Soc. Am. B* 17, 1098.
- [2] Janulewicz, K. A., Healy, S. B., Kalachnikov, M. P., Warwick, P. J., Nikles, P. V., Sandner, W. and Pert, G. J. (1999). Influence of pump pulse parameters on the collisionally pumped germanium X-ray laser in the transient gain regime. *Opt. Commun.* 168, 183-193.
- [3] Benredjem, D., Kuba, J., Mo'ller, C., and Zabaydullin, O. Z. (2003). Modeling of saturation and refraction in x-ray lasers. *Phys. Rev. A.*, 67, 043816.
- [4] Oliva, E., Zeitoun, Ph., Velarde, P., Fajardo, M., Cassou, K., Ros, D., Sebban, S., Portillo, D., and le Pape, S. (2010). Hydrodynamic study of plasma amplifiers for soft-x-ray lasers: A transition in hydrodynamic behavior for plasma columns with widths ranging from 20  $\mu\text{m}$  to 2 mm. *Phys. Rev. E* 82, 056408.
- [5] Djaoui, A. (1996). A user guide for the laser-plasma simulation code: MED103. *PAL-TR-96-099*.
- [6] Ghani-Moghadam, G., Rezaei, S., Jafari, M. J., Farahbod, A. H. (2021). Parametric study of plasma active medium and gain saturation region in a Ne-like soft X-ray laser. *Contributions to Plasma Physics*, under review.
- [7] P.B. Holden, P. B., Healy, S. B., Lightbody, M. T. M., Pert, G. J., Plowes, J. A., A.E. Kingston, A. E., Robertson, E., Lewis, C. L. S., Neeley, D. (1994). A computational investigation of the neon-like germanium collisionally pumped laser. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 27, 341-367.
- [8] Kim, D. S., Kim, D. E. (1998). The Effect of Radiation Trapping in Gain for Ne-like Kr. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 37, 2693-2698.

افزایش ضریب بهره در یون ژرمانیوم با شرایط یکسان نسبت به یون کریپتون به دلیل اختلاف در طول موج تابشی گذار  $2p^5 3p^1 S_0 \rightarrow 2p^5 3s^3 P_1$  در دو یون ژرمانیوم و کریپتون می باشد. از نقطه نظر فیزیکی نیز این اختلاف طول موج به این معنی است که ترازهای گذار مورد بحث در یون ژرمانیوم نسبت به یون کریپتون، به هم نزدیک تر هستند بنابراین انرژی کمتری برای برانگیخته شدن نیاز دارند و در نتیجه بهره بیشتری برای تولید لیزر پرتو ایکس نرم با طول موج ۱۹/۶ nm خواهند داشت.

### نتیجه گیری

در این پژوهش، محیط فعال پلاسمایی حاصل از برهمکنش لیزر دمش دوپالسی و دو ماده هدف (ژرمانیوم و کریپتون) به طور مجزا با استفاده از کد هیدرودینامیکی MED103 مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور یک لیزر دمش دو پالسی به ماده هدف برخورد و ضریب بهره برای گذار  $2p^5 3p^1 S_0 \rightarrow 2p^5 3s^3 P_1$  در یون های شبه نئون ژرمانیوم و کریپتون در همه مکان ها و زمان ها به دست آمده و سپس پارامترهای هیدرودینامیکی در زمان بیشینه بهره برای هر دو یون رسم و مقایسه شده است. با توجه به آخرین تراز مشابه در دو عنصر، همانطور که انتظار می رفت پارامترهای هیدرودینامیکی و حتی ضریب بهره رفتار مشابهی دارند، اما اختلاف بیشینه ضریب بهره در این دو عنصر را می توان به دلیل اختلاف طول موج تابشی این گذار در دو یون ژرمانیوم و کریپتون دانست. کریپتون دارای عدد اتمی ۳۶ و یون شبه نئون آن ۲۶ بار یونیده و طول موج گذار تابشی  $2p^5 3p^1 S_0 \rightarrow 2p^5 3s^3 P_1$  در آن ۱۶/۷ nm و ژرمانیوم دارای عدد اتمی ۳۲ و یون شبه نئون آن ۲۲ بار یونیده و طول موج گذار  $2p^5 3p^1 S_0 \rightarrow 2p^5 3s^3 P_1$  ۱۹/۶nm است. با توجه به روابط محاسباتی، ضریب بهره علاوه بر پارامترهای هیدرودینامیکی، به طول موج تابشی گذار نیز به طور مستقیم وابسته است. بنابراین اختلاف در بیشینه ضریب بهره در شبیه سازی های این دو عنصر هدف، کاملاً قابل قبول می باشد.