



بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴۰۰-۱۲ بهمن



مطالعه اثر دمش ناهمدوس بر گسیل القایی پلاسمای القاییده لیزری مس

فاطمه سادات تحصیلداران^{۱و۲}، امیر حسین فرهبد*^۲، رسول ملک فر^۱

^۱ گروه فیزیک اتمی و مولکولی، بخش فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۲ پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، ۱۴۳۹۹-۵۱۱۱۳، تهران، ایران

*afarabod@aeoi.org.ir

چکیده - در تحقیق حاضر رفتار فضایی-زمانی پلاسمای نوری پلاسمای القاییده لیزری اتم مس به کمک حل معادلات جنبشی برای توصیف سازوکار نوسان لیزر مورد مطالعه عددی قرار گرفته است. برای این منظور گردابیان تابش و چگالی ترازهای دو گذار مرئی در طول موج ۵۱۰/۵ و ۵۷۸/۲ نانومتر اتم مس به همراه گذارهای دمش مرتبط در یک سیستم چهارترازی شبیه سازی شده است. نتایج، افزایش شدت نور گسیل یافته از محیط فعل پلاسما در جهت رو به جلو و عقب را تایید می کند. این ایده جدید نشان داد که دمش ناهمدوس پلاسمای لیزری به کمک لامپ درخش می تواند جایگزین روش پر هزینه دمش همدوس با لیزر برای بهبود روش شناسایی بینابی مواد باشد.

کلید واژه- پلاسمای القاییده لیزری، لامپ درخش زنون، مدل برخورده-تابشی.

Study of incoherent pumping on stimulated emission of laser-induced copper plasma

Fatemeh S. Tahsildaran^{1,2}, Amir Hossein Farahbod^{2*}, Rasoul Malekfar^{1,2}

¹Atomic and Molecular Physics Group, Department of Physics, Faculty of Basic Sciences,
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

²Research School of Plasma Physics and Nuclear Fusion, Research Institute of Nuclear
Sciences and Technologies, AEOI, Tehran, Iran.

*afarabod@aeoi.org.ir

Abstract- In the present research, the spatio-temporal evolution of the flashlamp-pumped laser-induced copper plasma by a collisional-radiative model based on kinetic equations has been calculated to describe the mechanism of the laser oscillation. The gradient of total population density and the stimulated emission intensity at 510.5 and 578.2 nm of Cu atoms and their pumping transitions were simulated by a four-levels system. Results confirm the enhancement of stimulated emission of the active medium of the Cu plasma at forward and backward directions. This noble idea showed that the flashlamp-pumped laser-induced plasma (LIP) can be replaced with more expensive laser-pumped LIP for improvement of the LIBS method.

Keywords: Laser-Induced Plasma, Xe-flashlamp, Collisional-Radiative Model.

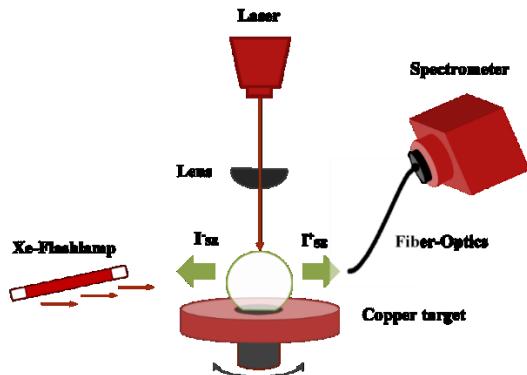
ساختار تجربی

مقدمه

مطابق با شرایط تجربی، فرض می شود محیط فعال پلاسمای مس، با تمرکز باریکه لیزر Nd:YAG بر هدفی از مس با هندسه کروی و با قطر 5 mm پدید آمده است و بازگرمايش پر پلاسما با تابش نور لامپ درخش به صورت عمود بر راستای تابش نور لیزر انجام می شود. نور تابشی در فواصل مختلف از سطح هدف در راستای محور x در دو جهت I_{SE}^{\pm} با احتساب همزمان تاخیرهای زمانی از لحظه کندوسوز به صورت عددی محاسبه می شود. در شکل ۱ رفتار زمانی تپ لامپ درخش با نمایه عرضی گاوی و پهنای زمانی τ_L تقریب زده شده است.

$$I_L = I_0 \exp\left(-\frac{1}{4} \frac{\ln 2(t - t_0)^2}{\tau_L^2}\right) \quad (1)$$

شدت بیشینه، $I_L = \frac{E_L}{\pi r^2 \tau_L}$ ، $I_0 (\text{J s}^{-1} \text{cm}^{-3})$ است که انرژی تپ لامپ و t اندازه لکه تابش لامپ در موضع برخورد با پلاسما در زمان t_0 است.



شکل ۱: ساختار تجربی مدل شده در محاسبات نظری.

ترازهای اتمی مس و معادلات حاکم

ترازهای اتمی مس و گذارهای موثر در جمعیت دهی و تخلیه جمعیت ترازهای پایه، شبه پایدار و نوسانی در شکل ۲ نشان داده شده است. دو تراز بالائی به دلیل اختلاف انرژی 0.03 eV یک تراز جفت شده موثر می باشند. لذا برای سادگی محاسبات ترازهای انرژی اتم مس به یک سیستم چهار ترازی تقلیل می یابد. وارونی جمعیت مورد نیاز آستانه بهره با بازترکیب یون های Cu^{+} ، گذارهای

تا کنون، بهره نوری در پلاسمای القاییده لیزر (LIP)، علی رغم قدمت و اهمیت آن که به اواخر دهه ۱۹۷۰ میلادی باز می گردد [۱]، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. با اینحال لیزرهای حاصل از LIP دسته متفاوتی از لیزرهای شمار می آیند که محیط فعال آن پر پلاسما است. این نوع لیزرهای به عنوان منابع نوری همدوس کاربردهای متنوعی دارند. اخیراً ایده تقویت نوری درون پلاسمای القاییده لیزری و گسیل لیزر از آن با دمش نوری برای بیناب نگاری لیزری و سایر کاربردها مورد توجه قرار گرفته است [۲]. پیش از این دمش پلاسمای القاییده لیزری هدف Al بر اساس معادلات جنبشی به منظور تولید وارونی جمعیت و گسیل تقویت شده مدل سازی شده است [۲]. این مدل با در نظر گرفتن تمامی فرآیندهای پلاسما، درک روشی از گردایان چگالی ترازهای اتمی و برهمنکش پلاسما با نور لیزر و نهایتاً شرایط اتمی دستیابی به بهره را فراهم می آورد. در این پژوهش اتم مس به دلیل نرخ بالای گذار و گسیل خودبخودی خطوط تابشی، از مرتبه 10^{-7} s^{-1} و شناخت پارامترهای فیزیکی آن و سابقه مطالعات گسترده بر روی لیزر بخار مس در ناحیه مرئی بیناب انتخاب شده است [۳].

در این مقاله ابتدا به معرفی سیستم اتمی مس به عنوان محیط فعال لیزر و فرآیندهای جذبی و تابشی موثر بر تقویت و تلفات نور القاییده تابشی از لحظه دمش تا پایان پلاسما می پردازیم. سپس، براساس نتایج حل عددی معادلات نرخ، دینامیک پارامترهای پلاسما به همراه تحلیل آن ها ارائه می شود. فرآیندهای حاکم در دو بازه زمانی بررسی می شود. بازه اول که 5 میکروثانیه فرض می شود و به علت تعادل ترمودینامیکی محاسبه چگالی و دمای پلاسما انجام می شود. بازه دوم از تعادل حرارتی است و از $5 \mu\text{s}$ تا 5 پمپ نوری که حدود $6 \mu\text{s}$ است ادامه دارد. در این بازه علاوه بر خاموشی تابش های برم-اشترالانگ، سهم گونه های یک بار یونیده و خنثی در گسیل القایی غالب بر سهم دیگر گونه ها است.

تابش $I_i(x, t)$ تابعی از توزیع فوتون‌ها با طول موج λ در نقطه x و زمان t و دو جهت x^+ و x^- در نظر گرفته شدند. $P_{ij}(\nu)$ تابع شکل خط گذار متناظر و Ω^\pm زاویه فضایی انتشار تابش گسیل یافته در جهات $+$ و $-$ است. شرط مرزی چگالی تابش تمام گذارها در لحظه اولیه به استثنای I_1^+ که معادل شدت دمش است، برابر با صفر فرض می‌شود.

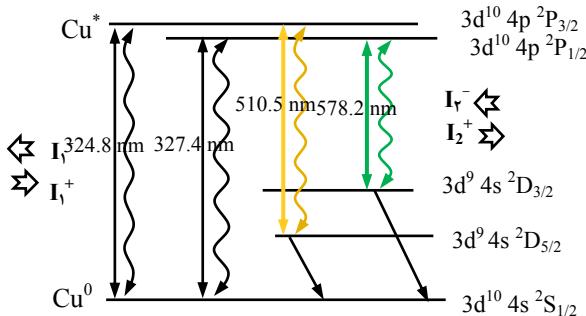
$$\begin{aligned}\frac{\partial n_2(x, t)}{\partial t} &= (n_1\sigma_{12} - n_2\sigma_{21})(I_1^+ + I_1^-) + (n_3\sigma_{32} - n_2\sigma_{23})(I_2^+ + I_2^-) \\ &\quad + (\sigma_{42}n_4 - \sigma_{24}n_2)(I_3^+ + I_3^-) - n_2(A_{21} + A_{23} + A_{24}) \\ \frac{\partial n_3(x, t)}{\partial t} &= (n_2\sigma_{23} - n_3\sigma_{32})(I_1^+ + I_1^-) + n_2A_{23} - n_3A_{31} \\ \frac{\partial n_4(x, t)}{\partial t} &= (n_2\sigma_{24} - n_4\sigma_{42})(I_3^+ + I_3^-) + n_2A_{24} - n_4A_{41} \\ n_1 &= n_{tot} - (n_2 + n_3 + n_4) \\ \frac{1}{c} \frac{\partial I_1^+(x, t, \lambda)}{\partial t} &= -\frac{\partial I_1^+}{\partial x} + (\sigma_{21}n_2 - \sigma_{12}n_1)I_1^+ + n_2A_{21}\Omega^+P_{21}(\lambda) \\ \frac{1}{c} \frac{\partial I_1^-(x, t, \lambda)}{\partial t} &= +\frac{\partial I_1^-}{\partial x} + (\sigma_{21}n_2 - \sigma_{12}n_1)I_1^- + n_2A_{21}\Omega^-P_{21}(\lambda) \\ \frac{1}{c} \frac{\partial I_2^+(x, t, \lambda)}{\partial t} &= -\frac{\partial I_2^+}{\partial x} + (\sigma_{23}n_2 - \sigma_{32}n_3)I_2^+ + n_2A_{23}\Omega^+P_{23}(\lambda) \\ \frac{1}{c} \frac{\partial I_2^-(x, t, \lambda)}{\partial t} &= +\frac{\partial I_2^-}{\partial x} + (\sigma_{23}n_2 - \sigma_{32}n_3)I_2^- + n_2A_{23}\Omega^-P_{23}(\lambda) \\ \frac{1}{c} \frac{\partial I_3^+(x, t, \lambda)}{\partial t} &= -\frac{\partial I_3^+}{\partial x} + (\sigma_{24}n_2 - \sigma_{42}n_4)I_3^+ + n_2A_{24}\Omega^+P_{24}(\lambda) \\ \frac{1}{c} \frac{\partial I_3^-(x, t, \lambda)}{\partial t} &= +\frac{\partial I_3^-}{\partial x} + (\sigma_{24}n_2 - \sigma_{42}n_4)I_3^- + n_2A_{24}\Omega^-P_{24}(\lambda) \quad (2)\end{aligned}$$

سطح مقطع گسیل تقویت شده و جذب بین ترازها با عبارت استاندارد ۳ محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned}\sigma_{ij}(\nu) &= A_{ij} \frac{\lambda^2}{8\pi} P_{ij}(\nu) \\ \sigma_{ji}(\nu) &= \frac{g_i}{g_j} \sigma_{ij}(\nu)\end{aligned}\quad (3)$$

A_{ij} ضریب اینشتین گسیل خودبخودی گذار متناظر، g_i و g_j وزن‌های آماری تراز i و j است. پارامترهای طیف سنجی مورد نیاز مس در پایگاه داده‌های جهانی NIST قابل دسترسی است [۵]. رفتار فضا-زمان چگالی ترازها، شدت دمش و تابش گذارهای $\frac{578.2}{510.5}$ nm و $\frac{510.5}{578.2}$ nm در شکل ۳ نشان داده شده است. در حالت تعادل اولیه چگالی تراز پایه n_1 برابر با 10^{15} cm^{-3} است و با آغاز دمش کاهش می‌یابد تا در نواحی نزدیک به هدف به مقدار 10^{15} cm^{-3} می‌رسد. تاثیر دمش پلاسمای برای فواصل دورتر

آبشاری و گذار تشیدی $3d^{10} 4s^2 S_{1/2} - 3d^{10} 4p^2 P_{3/2}$ و $3d^{10} 4s^2 S_{1/2} - 3d^{10} 4p^2 P_{1/2}$ از طریق جذب تابش فرابینفس نور لامپ درخش، تامین می‌شود. جمعیت قابل توجه به دام افتاده در ترازهای تفکیک شده می‌اسپینی $2P_{3/2}$ و $2P_{1/2}$ اتم‌های مس با طول عمر دهم میکروثانیه، برآثر گسیل تقویت شده تشیدی $3d^9 4s^2 - 3d^{10} 4p^2 P_{3/2}$ و $3d^9 4s^2 - 3d^{10} 4p^2 P_{1/2}$ دو خط قوی به ترتیب سبز و زرد، محتمل ترین گذارهای نوسانی پلاسمای مس، شکل می‌گیرند. میدان‌های گسیلی از گذارهای $2/3 \leftrightarrow 4, 1 \leftrightarrow 2/3$ در دو جهت رو به جلو و عقب در شکل ۱ با پیکان‌های تو خالی و نمادهای به ترتیب I_1 , I_2 و I_3 مشخص شده‌اند.



شکل ۲: ساختار گذارهای دو خط پر بازده اتم مس به همراه گذارهای دمش آن‌ها، درخش‌ها برانگیختگی بازترکیب برخورده، پیکان‌های موج، فروافت و برانگیختگی خودبخودی، پیکان‌های خط چین گذارهای یونش-بازترکیب سه تابی و خطوط مورب فروافت‌های سریع می‌باشند.

معادلات آهنگ وابسته به مکان، زمان و طول موج برای سیستم چهار ترازی حاوی خطوط سبز و زرد و گذارهای دمش آن‌ها به صورت عددی حل می‌شوند و چگونگی تغییر چگالی جمعیت و تابش هر تراز حین دمش تا رسیدن به حالت تعادل پلاسمای نشان داده می‌شود. دینامیک گسیل تقویت شده به ازاء هر گذار به کمک حل ده معادله دیفرانسیل جفت شده غیر خطی مرتبه اول با روش رانگ-کوتا به صورت معادله ۲ محاسبه شده است [۶]. در هر تراز i چگالی جمعیت (x, t) و n_i می‌رسد. تاثیر دمش پلاسمای برای فواصل دورتر

از I_1^+ است. لحظه‌ای که چگالی برانگیخته ترازهای نوسانی ۲ و ۳ به اندازه کافی از ترازهای شبه پایدار بیشتر شود بازدهی افروده شده و گسیل القایی $4 - \frac{3}{2} - 5 - \frac{3}{2}$ در هر دو جهت I_2^{\pm} و I_3^{\pm} آغاز می‌شود. پس از μs ، تراز های برانگیخته تخلیه می‌شوند و به دلیل تعادل حرارتی کامل پلاسمما به حالت اولیه باز می‌گردد، شکل ۳(ج، خ، د، ذ). در فواصل دورتر از محل برخورد لیزر و مس، کاهش دما کاهش تعداد اتم‌های برانگیخته را به همراه دارد. نتایج مدل پیشنهادی نشان می‌دهد با افزایش فاصله از سطح از بهره محیط کاسته می‌شود تا برای خط زرد در ۶ میلی‌متری و خط سبز در ۳ میلی‌متری از سطح به صفر بررسد.

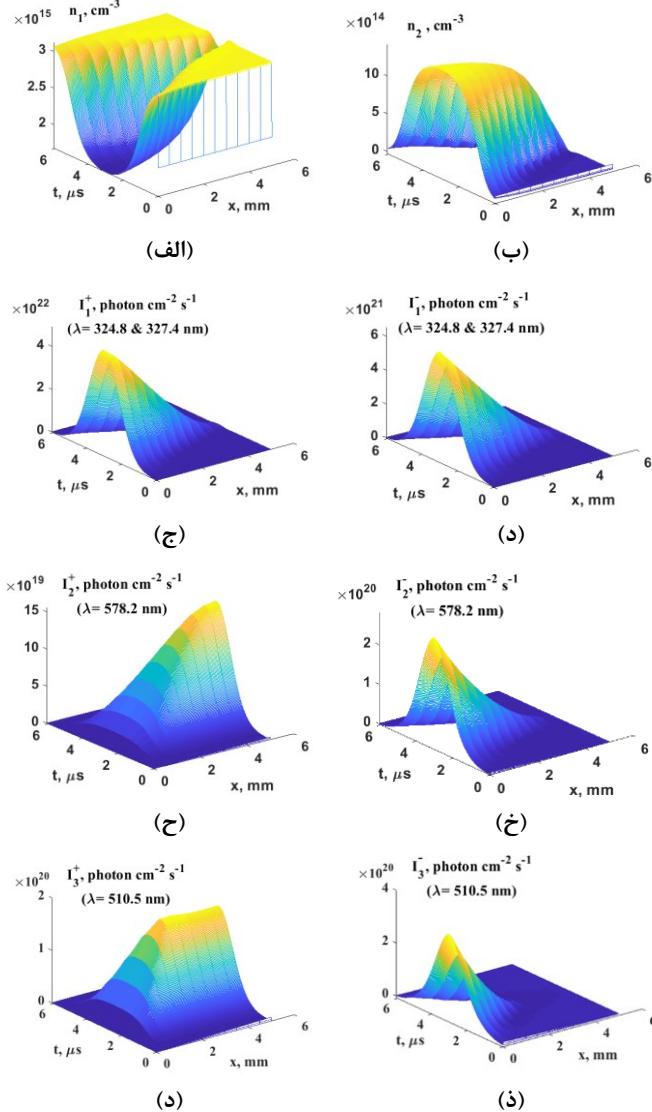
نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهند که دمشنوری ناهمدوس به کمک لامپ درخش می‌تواند تقویت تابش گذارهای اتمی محیط فعال پلاسمای القاییده لیزری را بدنبال داشته باشد. این رویکرد می‌تواند برای ارتقای حساسیت روش LIBS و جایگزین نمودن آن با روش پرهزینه دمشنوری لیزری پلاسمما مورد استفاده قرار گیرد.

مرجع‌ها

- [1] W. T. Silfvast, L. H. Szeto, and O. R. Wood II, “Recombination lasers in expanding CO₂ laser-produced plasmas of argon, krypton, and xenon,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 31, no. 5, pp. 334–337, 1977.
- [2] I. Gornushkin, R. Glaus, and L. Nagli, “Stimulated emission in aluminum laser-induced plasma: kinetic model of population inversion,” *Appl. Opt.*, vol. 56, no. 3, pp. 695–701, 2017.
- [3] J. J. Kim and N. Sung, “Stimulated emission in optically pumped atomic-copper vapor,” *Opt. Lett.*, vol. 12, no. 11, pp. 885–887, 1987.
- [4] J. T. Verdeyen, “Laser electronics,” *Laser Electron. Ed.*, 1989.
- [5] “Lines_Form @ Physics.Nist.Gov.” [Online]. Available: https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html.

از سطح هدف ضعیفتر و با تاخیر زمانی بیشتر همراه است. در مقابل چگالی تراز n_2 در یک میلیمتری سطح مس در تاخیر زمانی $3\mu\text{s}$ ، به عدد $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ نزدیک می‌شود، شکل ۳ (الف و ب).



شکل ۳: تحول فضا-زمانی چگالی جمعیت ترازها (الف-پ)، شدت فوتون گذار ۱-۲، شدت گذار ۲-۴ و شدت گذار ۵-۷.

تابش دمشنوری I_1^+ رو به جلوی لامپ درخش در گذار ۱ به ۲ یا ۳ جذب شده و در لحظه ۳ میکروثانیه اندازه آن به $5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ می‌رسد، شکل ۳(ج). شکل ۳(د) شدت تابش گذار ۳ و ۲ را در جهت منفی نشان می‌دهد که تنها گذارهای خودبخودی را در بر می‌گیرد و در قله برابر با $10^{22} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ است که یک مرتبه بزرگی کوچک‌تر