بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۲-۱۴ بهمن ۱۴۰۰

مطالعه اثر دمش ناهمدوس برگسیل 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، ۵۱۱۱۳-۱۴۳۹۹، تهران، ایران
***afarahbod@aeoi.org.ir**

چکیده – در تحقیق حاضر رفتار فضایی-زمانی پلاسمای حاصل از دمش ناهمدوس 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 گرادیان 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 فعال 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 برخوردی-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]
[1]Atomic and Molecular Physics Group, Department of Physics, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
[2]Research School of Plasma Physics and Nuclear Fusion, Research Institute of Nuclear Sciences and Technologies, AEOI, Tehran, Iran.
***afarahbod@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.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]

مقدمه

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 لیزرها به شمار می آیند که محیط فعال آن پر پلاسما است. این نوع لیزرها 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 روشنی از گرادیان چگالی ترازهای اتمی و برهمکنش پلاسما با نور لیزر و نهایتاً شرایط آرمانی دستیابی به بهره را فراهم می آورد. در این پژوهش اتم مس به دلیل نرخ بالای گذار و گسیل خودبخودی خطوط تابشی، از مرتبه $۱۰^{۷}\ s^{-۱}$ و شناخت پارامترهای فیزیکی آن و سابقه مطالعات گسترده بر روی لیزر بخار مس در ناحیه مرئی بیناب انتخاب شده است [۳].

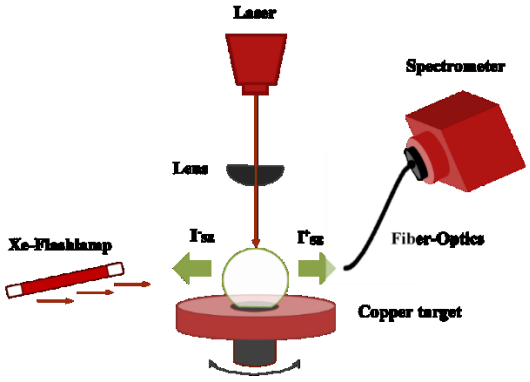
در این مقاله ابتدا به معرفی سیستم اتمی مس به عنوان محیط فعال لیزر و فرآیندهای جذبی و تابشی موثر بر تقویت و تلفات نور القاییده تابشی از لحظه دمش تا پایان پر پلاسما می پردازیم. سپس، براساس نتایج حل عددی معادلات نرخ، دینامیک پارامترهای پلاسما به همراه تحلیل آن ها ارائه می شود. فرآیندهای حاکم در دو بازه زمانی بررسی می شود. بازه اول که ۵ میکروثانیه فرض می شود و به علت تعادل ترمودینامیکی محاسبه چگالی و دمای پلاسما انجام می شود. بازه دوم دور از تعادل حرارتی است و از ۵ µs تا پایان پمپ نوری که حدود ۶ µs 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.

ساختار تجربی

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 ۵ mm پدید آمده است و بازگرمایش 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 $I^{\pm}_{SE}$ 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 گاوسی و پهنای زمانی τ_L تقریب زده شده است.

$$I_L = I_0 \exp(-\frac{1}{4}\frac{\ln 2(t-t_0)^2}{\tau_L^2}) \qquad (۱)$$

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



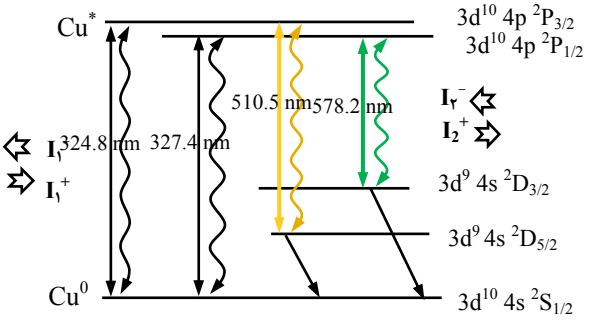
شکل ۱: ساختار تجربی مدل شده در محاسبات نظری.

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 بالایی به دلیل اختلاف انرژی ۰/۰۳ 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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]

آبشاری و گذار تشدیدی $3d^{10}\,4s\,{}^2S_{1/2}$ - $3d^{10}\,4p\,{}^2P_{3/2}$ و $3d^{10}4s\,{}^2S_{1/2}$ - $3d^{10}4p\,{}^2P_{1/2}$ از طریق جذب تابش فرابنفش نور لامپ درخش، تامین می شود. جمعیت قابل توجه به دام افتاده در ترازهای تفکیک شده ی اسپینی ${}^2P_{1/2}$ و ${}^2P_{3/2}$ اتم های مس با طول عمر دهم میکروثانیه، براثر گسیل تقویت شده تشدیدی $3d^9\,4s^2$ -$3d^{10}4p\,{}^2P_{3/2}$ ${}^2D_{5/2}$ و $3d^9\,4s^2\;{}^2D_{3/2}$- $3d^{10}\,({}^1s)\,4p\,{}^2P_{1/2}$ دو خط قوی به ترتیب سبز و زرد، محتمل ترین گـــذارهای نوسانی پلاسمای مس، شکل می گیرند. میدان های گسیلی از گذارهای۲/۳ ↔ ۱، ۴ ↔ ۲/۳ و ۵ ↔ ۲/۳ در دو جهت رو به جلو و عقب در شکل ۱ با پیکان های تو خالی و نمادهای به ترتیب I_1، I_2 و I_3 مشخص شده اند.



شکل ۲: ساختار گذارهای دو خط پر بازده اتم مس به همراه گذارهای دمش آن‌ها، درخش ها برانگیختگی/بازترکیب برخوردی، پیکان های مواج، فروافت و برانگیختگی خودبخودی، پیکان های خط چین گذارهای یونش-بازترکیب سه تایی و خطوط مورب فرو افت های سریع می باشند.

معادلات آهنگ وابسته به مکان، زمان و طول موج برای سیستم چهار ترازی حاوی خطوط سبز و زرد و گذارهای دمش آن ها به صورت عددی حل می شوند و چگونگی تغییر چگالی جمعیت و تابش هر تراز حین دمش تا رسیدن به حالت تعادل پلاسما نشان داده می شود. 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[۴]. در هر تراز i چگالی جمعیت $n_i\,(x,\,t)$ و چگالی تابش $I_i\,(x\,,\,t\,,\,\lambda)$ تابعی از توزیع فوتون ها 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 $\Omega^{\pm}$ 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 می شود.

$$
\begin{aligned}
&\frac{\partial n_2(x,t)}{\partial t} = (n_1\sigma_{12} - n_2\sigma_{21})(I_1^+ + I_1^-) + (n_3\sigma_{32} - n_2\sigma_{23})(I_2^+ + I_2^-) \\
&\qquad + (\sigma_{42}n_4 - \sigma_{24}n_2)(I_3^+ + I_3^-) - n_2(A_{21} + A_{23} + A_{24}) \\
&\frac{\partial n_3(x,t)}{\partial t} = (n_2\sigma_{23} - n_3\sigma_{32})(I_2^+ + I_2^-) + n_2A_{23} - n_3A_{31} \\
&\frac{\partial n_4(x,t)}{\partial t} = (n_2\sigma_{24} - n_4\sigma_{42})(I_3^+ + I_3^-) + n_2A_{24} - n_4A_{41} \\
&n_1 = n_{tot} - (n_2 + n_3 + n_4) \\
&\frac{1}{c}\frac{\partial I_1^+(x,t,\lambda)}{\partial t} = -\frac{\partial I_1^+}{\partial x} + (\sigma_{21}n_2 - \sigma_{12}n_1)I_1^+ + n_2A_{21}\Omega^+P_{21}(\lambda) \\
&\frac{1}{c}\frac{\partial I_1^-(x,t,\lambda)}{\partial t} = +\frac{\partial I_1^-}{\partial x} + (\sigma_{21}n_2 - \sigma_{12}n_1)I_1^- + n_2A_{21}\Omega^-P_{21}(\lambda) \\
&\frac{1}{c}\frac{\partial I_2^+(x,t,\lambda)}{\partial t} = -\frac{\partial I_2^+}{\partial x} + (\sigma_{23}n_2 - \sigma_{32}n_3)I_2^+ + n_2A_{23}\Omega^+P_{23}(\lambda) \\
&\frac{1}{c}\frac{\partial I_2^-(x,t,\lambda)}{\partial t} = +\frac{\partial I_2^-}{\partial x} + (\sigma_{23}n_2 - \sigma_{32}n_3)I_2^- + n_2A_{23}\Omega^-P_{23}(\lambda) \\
&\frac{1}{c}\frac{\partial I_3^+(x,t,\lambda)}{\partial t} = -\frac{\partial I_3^+}{\partial x} + (\sigma_{24}n_2 - \sigma_{42}n_4)I_3^+ + n_2A_{24}\Omega^+P_{24}(\lambda) \\
&\frac{1}{c}\frac{\partial I_3^-(x,t,\lambda)}{\partial t} = +\frac{\partial I_3^-}{\partial x} + (\sigma_{24}n_2 - \sigma_{42}n_4)I_3^- + n_2A_{24}\Omega^-P_{24}(\lambda)
\end{aligned}
\qquad (۲)
$$

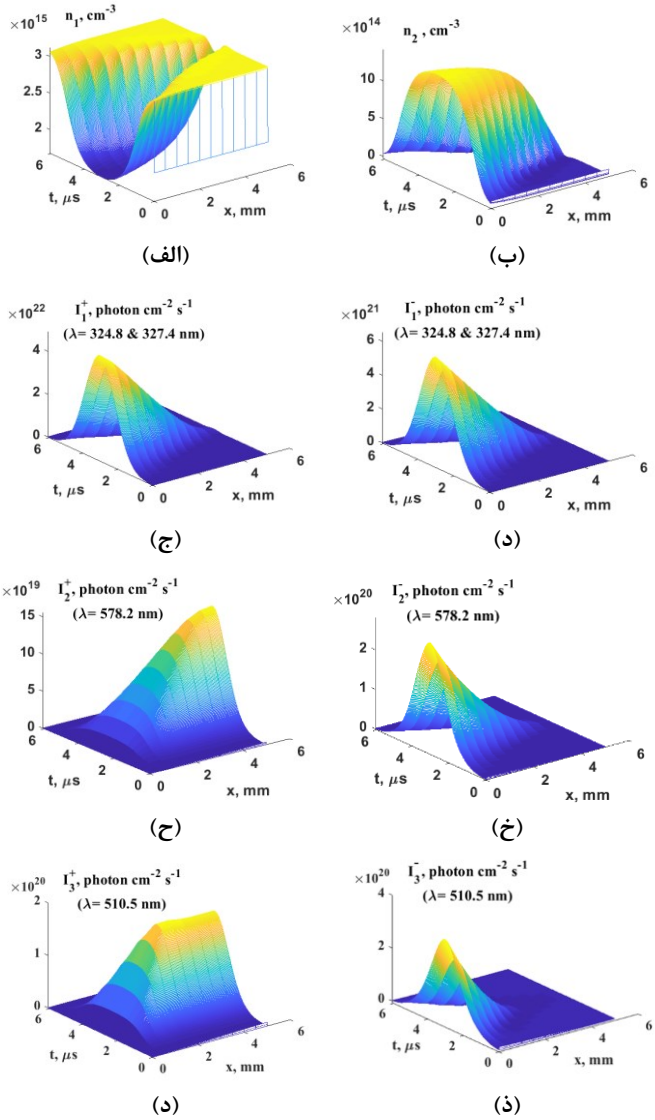
سطح مقطع گسیل تقویت شده و جذب بین ترازها با عبارت استاندارد ۳ محاسبه می شود.

$$
\sigma_{ij}(\nu) = A_{ij}\frac{\lambda^2}{8\pi}P_{ij}(\nu) \qquad (۳)
$$
$$
\sigma_{ji}(\nu) = \frac{g_i}{g_j}\sigma_{ij}(\nu)
$$

A_{ij} ضریب اینشتین گسیل خودبخودی گذار متناظر، g_i و g_j وزن های آماری تراز i و j است. پارامترهای طیف سنجی مورد نیاز مس در پایگاه داده های جهانی NIST قابل دسترسی است [۵]. رفتار فضا-زمان چگالی ترازها، شدت دمش و تابش گذارهای ۵۷۸/۲ و ۵۱۰/۵ نانومتر در شکل ۳ نشان داده شده است. در حالت تعادل اولیه چگالی تراز پایه n_1 برابر با ۳×۱۰^{۱۵} cm^{-3} است و با آغاز دمش کاهش می یابد تا در نواحی نزدیک به هدف به مقدار $cm^{-۳}$ $۱/۷\times۱۰^{۱۵}$ می‌رسد. تاثیر دمش پلاسما برای فواصل دورتر

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]

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 ۳μs، به عدد 3×10^{15} cm^{-3} نزدیک می شود، شکل ۳ (الف و ب).



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

تابش دمش I^+_1 رو به جلوی لامپ درخش در گذار ۱ به ۲ یا ۳ جذب شده و در لحظه ۳ میکروثانیه اندازه آن به 5×10^{22} $cm^{-2}s^{-1}$ می‌رسد، شکل ۳(ج). شکل ۳(د) شدت تابش گذار ۳ و ۲ را در جهت منفی نشان می دهد که تنها گذارهای خودبخودی را در بر می گیرد و در قله برابر با $0/6\times10^{22}$ $cm^{-2}s^{-1}$ است که یک مرتبه بزرگی کوچک تر از I^+_1 است. لحظه ای که چگالی برانگیخته ترازهای نوسانی ۲ و۳ به اندازه کافی از ترازهای شبه پایدار بیشتر شود بازدهی افزوده شده و گسیل القایی ۴ - ۳/۲ و ۵ - ۳/۲ در هر دو جهت $I^{\pm}_2$ و $I^{\pm}_3$ آغاز می شود. پس از ۶ μs، تراز های برانگیخته تخلیه می شوند و به دلیل تعادل حرارتی کامل پلاسما به حالت اولیه باز می گردد، شکل ۳(ح، خ، د، ذ). در فواصل دورتر از محل برخورد لیزر و مس، کاهش دما کاهش تعداد اتم های برانگیخته را به همراه دارد. نتایج مدل پیشنهادی نشان می دهد با افزایش فاصله از سطح از بهره محیط کاسته می شود تا برای خط زرد در ۶ میلی متری و خط سبز در ۳ میلی متری از سطح به صفر برسد.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان می دهند که دمش نوری ناهمدوس به کمک لامپ درخش می تواند تقویت تابش گذارهای اتمی محیط فعال پلاسمای القاییده لیزری را بدنبال داشته باشد. این رویکرد می تواند برای ارتقای حساسیت روش LIBS و جایگزین نمودن آن با روش پرهزینه دمش لیزری پلاسما 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.**

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]