بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

تعیین تجربی دمای الکترونی پلاسمای ناشی از فرآیند فروشکست اپتیکی در برهمکنش لیزر پالسی نانوثانیه با هدف مس در هوا

علیرضا ضرغامی، حسین مظفری و محمدحسین مهدیه

دانشگاه علم و صنعت ایران، نارمک، تهران، ایران

چکیده – در این مقاله دمای الکترونی در پلاسمای مس تولید شده با لیزر، با استفاده از طیف‌سنجی نشری اپتیکی توسط روش بولتزمن اندازه‌گیری گردید. در فرآیند شکست اپتیکی، پلاسما طی برهمکنش لیزر *Nd:YAG* پرتوان با طول موج ۱۰۶۴*nm* و طول پالس ۱۰~ *ns* با نمونه جامد مس در هوا تولید شده است. جهت تعیین دمای الکترون ۵ خط اتم مس *(Cu I)* در طول موج‌های ۴۲۷/۵۱، ۴۶۵/۱۱، ۵۱۰/۵۵، ۵۱۵/۳۲ و ۵۲۱/۸۲ نانومتر مورد استفاده قرار گرفت. با تغییر شدت لیزر در محدوده ۱۸/۲۳۱-۵/۲۱ *GW/cm^2* دمای الکترون برای دو حالت با در نظر گرفتن تابش پیوسته و با کاستن آن از طیف محاسبه شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با بررسی طیف با درنظر گرفتن تابش پیوسته، با تغییر انرژی پالس لیزر مورد استفاده دمای الکترون از ۱۰۸۷۳ تا ۱۳۳۴۲ کلوین تغییر می‌کند. همچنین نتایج نشان می‌دهند که با حذف تابش پیوسته در بررسی طیف تابشی این دما در محدوده ۹۷۰۵ تا ۱۰۸۴۶ تغییر می‌یابد.

کلید واژه- دمای الکترون؛ طیف سنجی؛ فروشکست القایی لیزر؛ گسیل پلاسما؛ مس.

Experimental estimation of electron temperature of plasma in laser induced breakdown by nanosecond pulsed laser interaction with a solid copper target in air

AliReza Zarghami, Hossein Mozaffari, and Mohammad Hossein Mahdieh

Iran University of Science and Technology, Narmak, Tehran, Iran

Abstract- In this paper, electron temperature of a laser induced copper plasma experiment were measured using Optical Emission Spectroscopy (OES) by Boltzmann plot method. The plasma was produced in laser induced breakdown via the interaction of high power Nd:YAG laser operating at fundamental wavelength of 1064 nm and pulse duration ~10 ns with a plane solid copper target in ambient air. Five Cu I lines at 427.51 nm, 465.11 nm, 510.55 nm, 515.32 nm and 521.82nm are used for determination of electron temperature (Te). The electron temperature was determined for the condition of laser intensity varying from 5.21 to 18.231 GW/cm2. The temperature was estimated using two different analyzing methods for emitted spectrum: i) considering continuum emission and lines emissions of the spectrum and ii) removing the continuum contribution from the emitted spectrum and analyzing only the line emissions. The results show a small differences between the two approches. According to our results within the applied laser pulse energy ranges, the estimated temperature increases from 10873 to 13342 K in the first approch and from 9705 to 10846 K for the second approach.

Keywords: electron Temperature; spectroscopy; laser induced Breakdown; plasma emission; copper.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

۱- مقدمه

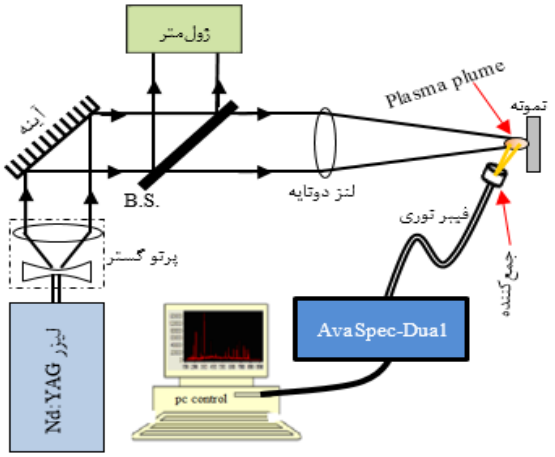
در برهمکنش یک پالس لیزر پرتوان با فلزات، انرژی لیزر در سطح ماده جذب و موجب افزایش دمای ماده و همچنین ایجاد پلاسما می‌گردد. در صورتی که شدت پرتو لیزر افزایش یابد فرآیند یونیزاسیون شدیدتری در محل تابش دهی رخ خواهد داد و در نتیجه پلاسمایی داغ با چگالی بالا تشکیل می‌گردد[۱]. الکترون‌هایی که از یونیزه شدن ماده‌ی هدف تولید شده‌اند با جذب انرژی از پرتو لیزر، با فرآیندهای برخوردی می‌توانند بر حجم یونیزه شده‌ی ماده‌ی هدف بیفزایند. حجم بوجود آمده از مواد پرتاب شده از سطح را توده پلاسمایی[۱] گویند. این توده حاوی ذرات باردار برانگیخته شامل الکترون‌ها و یون‌ها می‌باشد که در پی کاهش سطح انرژی آنها از طریق تابش فوتون، می‌توان پلاسما را به عنوان چشمه‌ی امواج الکترومغناطیس مورد بررسی قرار داد[۱]. فرآیند تولید پلاسما با استفاده از پرتو لیزر بطور کلی در مواد رسانا، نیمه رسانا و دی الکتریک‌ها امکان‌پذیر است که تحت عنوان شکست اپتیکی معرفی می‌گردد.

فرآیند شکست اپتیکی دارای کاربردهای مختلفی در پزشکی[۲]، طیف‌سنجی فروشکست القایی لیزری، تحقیقات همجوشی و Laser micro-fabrication می‌باشد[۳]. با استفاده از روش‌های مختلفی مانند تداخل سنجی[۴, ۵]، عکس‌برداری سریع[۶]، سایه‌نگاری[۵]، پراکندگی تامسون[۷]، کاوهٔ لانگمویر[۸] و طیف‌سنجی نشری اپتیکی[۹, ۱۰] مشخصه‌یابی پلاسما توسط محققان گزارش شده است.

در این مقاله با استفاده از برهم‌کنش لیزر نانوثانیه با هدف مس در هوا، تولید پلاسما شده است و تغییرات دمای الکترون‌های پلاسما به کمک روش طیف سنجی نشری اپتیکی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این روش با بررسی طیف حاصل از پلاسمای تولید شده، دمای پلاسما و وابستگی آن به انرژی لیزر به کمک روش بولتزمن محاسبه گردید. علاوه بر این، مانند روش به کار برده شده برای کاستن طیف پیوسته در مرجع [۱۱]، دمای الکترون استخراج گردیده است. در این تحقیق دو رویکرد در آنالیز اطلاعات طیف مورد استفاده قرار گرفته است. در رویکرد اول طیف تشعشع شده پلاسما با در نظر گرفتن تابش پیوسته و تابش خط بطور ترکیبی مورد استفاده قرار گرفته است. در رویکرد دوم فقط طیف تابشی خط پلاسما در آنالیز طیفی استفاده شده است و سهم طیف تابشی پیوسته حذف شده است.

۲- آزمایش

طرحواره‌ای از چیدمان آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده است. با استفاده از پرتو لیزر پالسی Nd:YAG با طول موج ۱۰۶۴ nm و طول پالس ۱۰ ns~ فرآیند فروشکست اپتیکی بر روی سطح هدف مسی ایجاد شده است. پرتو لیزر توسط یک لنز دوتایه[۲] با فاصله ی کانونی ۱۸ سانتیمتر بر روی سطح نمونه متمرکز گردید. طیف گسیلی از پلاسما، با استفاده از سیستم اپتیکی مناسب جمع‌آوری شده، سپس از طریق یک رابط (فیبر نوری)، اطلاعات به دستگاه طیف‌سنج AvaSpec-Dual مجهز به CCD انتقال داده می‌شود. پس از آن با استفاده از نرم افزار مخصوص، اطلاعات جهت آنالیز و تحلیل به نمایش درآمده و ثبت می‌گردد. در این آزمایش، شکست اپتیکی برای نمونه مس قرار داده شده در هوای با فشار اتمسفر و دمای اتاق مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱: طرحواره‌ای از چیدمان آزمایش. B.S. شکافنده پرتو می‌باشد.

۳- مبانی نظری

پلاسمای داغ تولید شده در فرآیند فروشکست اپتیکی، از طریق فرآیندهایی نظیر انبساط توده و تابش پلاسما (که از پلاسما خارج می‌شود) سرد می‌گردد. تابش‌ترمزی (گذار آزاد-آزاد)، تابش بازترکیب الکترون-یون (گذار آزاد-مقید) و گسیل خط (گذار مقید-مقید) از جمله مهمترین فرآیندهای تابشی می‌باشند. طیف ثبت شده از پلاسما که مجموعه‌ای از

[۱] Plasma plume

[۲] Doublet lens

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

یک تابش پیوسته‌ی ناشی از دو نوع گذار اول و تابش خط ناشی از گذار سوم است، حاوی اطلاعات مفیدی از گونه‌های تشکیل دهنده آن می‌باشد. زمانی که پلاسما در شرایط تعادل ترمودینامیکی موضعی (LTE) باشد، چگالی جمعیت در هر تراز انرژی با استفاده از توزیع بولتزمن بصورت زیر داده می‌شود[۱۲]:

$$N_{n,z}=\left(\frac{N_z g_{n,z}}{P_z(T)}\right)\exp\left(-\frac{E_{n,z}}{k_B T}\right) \qquad (۱)$$

در رابطه (۱) زیرنویس Z به مرحله یونیزاسیون مربوط است، T دمای پلاسما، $P_Z(T)$ تابع پارش، $g_{n,Z}$ و $E_{n,Z}$ به ترتیب تبهگنی و انرژی تراز بالا و k_B ثابت بولتزمن است.

از طرفی، شدت خطوط طیفی I_Z گسیل شده در گذار از تراز بالای انرژی n به تراز پایین انرژی m با رابطه (۲) بیان می‌شود.

$$I_Z=\frac{hc}{4\pi\lambda_{nm,Z}}A_{nm,Z}N_{n,Z}L \qquad (۲)$$

که $A_{nm,Z}$ احتمال گذار، h ثابت پلانک، c سرعت نور و $\lambda_{nm,Z}$ طول موج گذار خط نام دارد.

با ترکیب روابط (۱) و (۲) و با گرفتن لگاریتم طبیعی داریم:

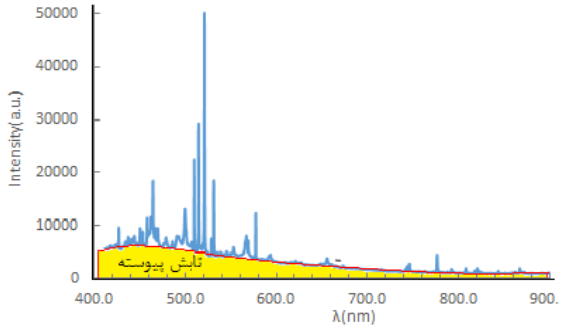
$$\ln\left(\frac{I_Z\lambda_{nm,Z}}{g_{n,Z}A_{nm,Z}}\right)=-\frac{E_{n,Z}}{k_B T}+\ln\left(\frac{hcN_Z L}{4\pi P_Z(T)}\right) \qquad (۳)$$

با استفاده از رابطه‌ی (۳) و رسم نمودار $\ln(I\lambda/gA)$ برحسب انرژی E_n خطی با شیب $-1/k_B T$ بدست می‌آید که از روی آن می‌توان دمای الکترون را محاسبه کرد. بدست آوردن دما با روش ذکر شده به روش بولتزمن معروف است.

۴- نتایج

در شکل ۲ طیف پلاسمای حاصل از برهمکنش لیزر با هدف مسی در شدت لیزر ۵/۲۱ GW/cm^2 نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می شود، طیف بدست آمده شامل هر دو نوع تابش پیوسته و خط می باشد. در مراحل مختلف تشکیل تا سرد شدن پلاسما، به علت تغییرات دمایی و چگالی، نوع گذار غالب متفاوت است. به طور مثال در مراحل ابتدایی تشکیل پلاسما به علت دمای زیاد آن، علاوه بر وجود گذارهای مقید-مقید، گذارهای آزاد-آزاد و آزاد-مقید حضور دارند. معمولا در بررسی دمای پلاسما با استفاده از طیف گسیلی روش‌هایی به مانند استفاده از زمان تاخیر به کار برده می‌شود تا از شدت طیف پیوسته‌ی ثبت شده کاسته شود[۹] چرا که در روش بولتزمن نیاز به شدت نسبی خطوط گذار مقید-مقید است و محاسبات با تابش پیوسته ممکن است دمای پلاسما را غیر واقعی نشان دهد[۱۲]. روش دیگری که به منظور کاستن طیف پیوسته از طیف کلی بدست آمده در آزمایش گزارش شده است، معادل سازی آن با یک تابع چند جمله‌ای می‌باشد. این تابع با استفاده از روش برازش منحنی محاسبه می‌گردد[۱۱]. در این مقاله، تابش پیوسته بصورت یک تابع شش جمله‌ای بصورت رابطه (۴) محاسبه شد و از طیف کلی کسر گردید.

$$y=-2\times10^{-11}x^6+7\times10^{-8}x^5-0.0001x^4 +0.1066x^3-53.578x^2+14165x-2\times10^6 \qquad (۴)$$



شکل ۲: طیف پلاسمای تولید شده از مس در فرآیند شکست اپتیکی با شدت لیزر ۵/۲۱ Gw/cm^2.

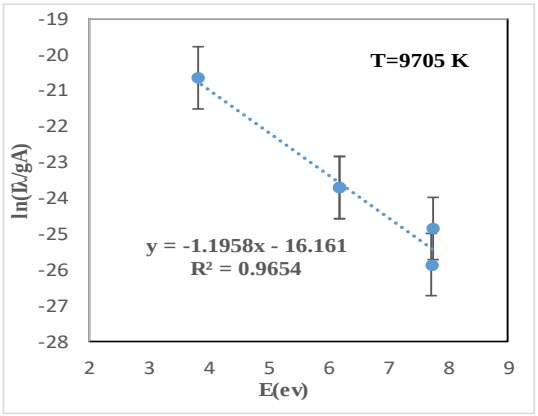
به کمک اطلاعات موجود در پایگاه داده‌ی مرجع NIST می‌توان اطلاعات مربوط به خطوط طیفی مس را استخراج کرد (جدول ۱). با استفاده از اطلاعات خطوط طیفی جدول (۱) و روش بولتزمن می‌توان دمای پلاسمای تولید شده از نمونه‌ی مس را محاسبه کرد. شکل ۳ دمای اندازه‌گیری شده مربوط به پلاسما با کاستن تابش پیوسته و استفاده از ۵ خط اتم مس (Cu I) برای شدت لیزر ۵/۲۱ GW/cm^2 را نشان می‌دهد.

جدول ۱: اطلاعات طیفی مورد استفاده اتم مس (مرجع NIST).

$\lambda(nm)$	$A_{nm}(\times10^{+7}s^{-1})$	$E_n(ev)$	g_n
۴۲۷/۵۱	۳/۴۵	۷/۷۳۷	۸
۴۶۵/۱۱	۳/۸	۷/۷۴	۸
۵۱۰/۵۵	۰/۲	۳/۸۱۶۶	۴
۵۱۵/۳۲	۶/۰	۶/۱۹۱	۴
۵۲۱/۸۲	۷/۵۰	۶/۱۹۲	۶

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

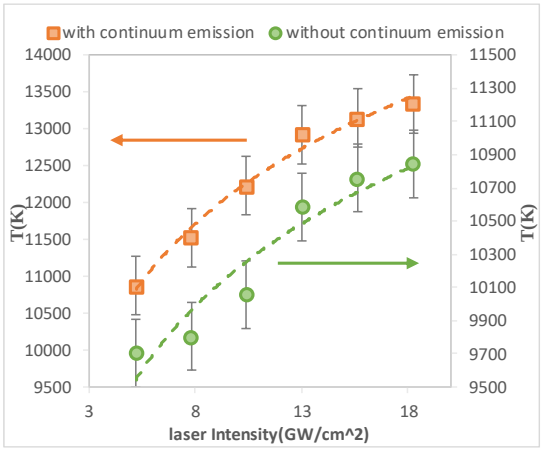


شکل ۳: نمودار بولتزمن خطوط Cu I برای تعیین دما.

با تکرار محاسبات در شدت‌های مختلف لیزر، مقایسه روند تغییرات دمای الکترون برای دو حالت: در نظر گرفتن تابش پیوسته و بدون در نظر گرفتن آن، برحسب انرژی لیزر نیز در شکل ۴ نشان داده شده است. در شکل ۴ مشاهده می‌شود، دمای بدست آمده برای طیف شامل تابش پیوسته، بیشتر از طیفی می‌باشد که تابش پیوسته از آن کم شده است. در واقع در ابتدای فرآیند فروشکست اپتیکی و تشکیل پلاسما، الکترون‌های آزاد بیشتری در اثر برهمکنش لیزر با ماده در محیط وجود داشته، بطوری‌که در پلاسما گذارهای آزاد-آزاد و آزاد-مقید نیز اتفاق می‌افتند. در نتیجه با در نظر گرفتن این گذارها(تابش پیوسته) دمای پلاسما بیشتر از زمانی است که این تابش در نظر گرفته نشود. همچنین با افزایش شدت لیزر، احتمال انتقال انرژی به لایه‌های پایین‌تر هدف نیز وجود دارد. این انتقال انرژی می تواند موجب یونیزاسیون بیشتر هدف و در نتیجه تولید الکترون‌های بیشتر گردد. چگال‌تر شدن پلاسما باعث می‌شود، جذب فوتون‌های لیزر نیز افزایش یابد. در نتیجه با افزایش احتمال برخوردها می‌توان انتظار داشت دمای پلاسمای تولید شده افزایش یابد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله پدیده‌ی شکست اپتیکی نمونه مس در هوا با لیزر پالسی نانوثانیه بررسی شد. نتایج بدست آمده از آزمایش نشان می‌دهد: دما در حضور تابش پیوسته بیشتر از زمانی است که تابش پیوسته از طیف کم گردید. همچنین دمای پلاسمای تولید شده به انرژی لیزر بستگی دارد و با افزایش شدت لیزر، دمای پلاسمای تولید شده نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۴: مقایسه روند تغییرات دمای الکترون برای دو حالت: در نظر گرفتن تابش پیوسته (نقاط مربعی) و با کاستن آن از طیف (نقاط دایره‌ای) به انرژی لیزر با روش بولتزمن.

سپاسگزاری

از آقای دکتر اسماعیل اسلامی که در انجام این پژوهش کمک زیادی کرده‌اند تشکر و قدردانی می‌نماییم.

مراجع

[1] M. Stafe, A. Marcu, and N. Puscas, *Pulsed Laser Ablation of Solids: Basics, Theory and Applications*, Springer Science & Business Media, Vol. 53, 2013.

[2] L. Habbema, R.verhagen, "Minimally invasive non-thermal laser technology using laser-induced optical breakdown for skin rejuvenation", J Biophotonics, Vol. 5, No. 2, pp. 194-199, 2012.

[3] M.H. Mahdieh, M. Akbari, J., Z. Bababei, "Optical transmission and reflection of a plasma produced in nanosecond laser induced air breakdown", In XX International Symposium on High-Power Laser Systems and Applications, pp. 92554H, 2015.

[4] Y. Seong Oh, C. lim, "Experimental study of laser-induced air plasma using a Nomarski interferometer", Japanese Journal of Applied Physics 54, No.7, pp. 076101, 2015.

[5] M. Hauer, DJ. Funk, T. Lippert, A Wokaun, "Laser ablation of polymers studied by ns-interferometry and ns-shadowgraphy measurements", Applied Surface Science, Vol. 208, pp.107-112, 2003.

[6] S.S.Harilal, "Spatial and temporal evolution of argon sparks", Applied optics, Vol. 43, No. 19, pp.3931-7, 2004.

[7] A. Mendys, K. Dzierzega, "Investigations of laser-induced plasma in argon by Thomson scattering", Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy 66, N0.9, 691-7, 2011.

[8] J.M. Hendron, CM. Mahony, "Langmuir probe measurements of plasma parameters in the late stages of a laser ablated plume", Journal of Applied Physics, Vol. 81, No. 5, pp. 2131-2134, 1997.

[9] A.M.E. Sherbini, A. Aamer, "Measurement of Plasma Parameters in Laser-Induced Breakdown Spectroscopy Using Si-Lines", World Journal of Nano Science and Engineering, Vol.02, No.04, p.206, 2012.

[10] M. Hanif, M. Salik, and M.A. Baig, "Quantitative studies of copper plasma using laser induced breakdown spectroscopy", Optics and Lasers in Engineering, Vol. 49, No. 12, pp. 1456-1461, 2011.

[11] W. Luo, W. Zhao, Y. Duan, H. Wang, "Diagnostics of air plasma ablated by 1064 nm laser pulses", Chinese Optics Letters, Vol. 9, No. s1, p. 10303, 2011.

[12] H.R. Griem, *Principles of plasma spectroscopy*, Vol. 2, Cambridge University Press, 2005.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]