



لیزر
پلاسمای
دینامیک

بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه ۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز



مطالعه دینامیک پلاسمای ضخیم اپتیکی با رویکردی نوین، بر مبنای روابط مناسب تئوری و استفاده از چیدمان‌های تجربی در تکنیک اسپکتروسکوپی فروشکست القاییده لیزری

فاطمه رضائی و سید حسن توسلی

تهران، اوین، دانشگاه شهید بهشتی، پژوهشکده لیزر و پلاسما

چکیده - این مقاله، روش جدیدی جهت مطالعه پلاسمای ضخیم آلومنیوم در شرایط LTE^1 معرفی می‌نماید. روش ارائه شده بطور بسیار ساده و دقیقی پارامترهای پلاسما اعم از دمای پلاسما، چگالی ذرات آن، انتشار موج شوک و نیز تابع ابزاری سیستم آزمایشگاهی را از داده‌های خطوط طیفی خودجذب شده محاسبه می‌نماید. آزمایش $LIBS^2$ بر روی نمونه آلومنیومی در هوای اتمسفریک با ترکیب دو تکنیک اسپکتروسکوپی و سایه‌نگاری³ انجام شده است. بایستی خاطرنشان کرد که در محاسبات این تحقیق، پارامترهای پلاسما زمانی بطور دقیق برآورد می‌شوند که چگالی الکترون، طول پلاسما و شدت سه خط طیفی از یک عنصر از آزمایش بدست آمده باشند.

کلید واژه - سایه‌نگاری، پلاسمای القاییده لیزری و خودجذبی.

Studying the dynamic of optical thick plasma based on suitable theoretical equations and using experimental set ups in laser induced breakdown spectroscopy technique

Fatemeh Rezaei, Seyyed Hassan Tavassoli

Tehran, Evin, Shahid Beheshti University, Laser and Plasma Research Institute

Abstract- In this paper, a new method for studying of aluminum thick plasma in LTE condition is introduced. The presented method calculates very simple and accurate the plasma parameters such as temperature, particle densities, shock wave expansion and instrumental function of system from the data of the spectral self absorbed lines. The LIBS experiment is done on aluminum sample at atmospheric air by combination of two techniques of spectroscopy and shadowgraphy. It should be mentioned that in this calculation, the plasma parameters can be evaluated exactly when electron density, plasma length and three intensities of spectral lines from specific element were obtained from experiment.

Keywords: Shadowgraphy, Laser induced breakdown spectroscopy, Self absorption.

¹ Local thermodynamic equilibrium

² Laser Induced Breakdown Spectroscopy

³ Shadowgraphy

$$SA = \frac{(1 - e^{-kl})}{kl}. \quad (3)$$

در معادله بالا، k ضریب جذب در سیستم دو ترازی مدنظر می‌باشد که در برگیرنده سهمهای جذب توسط اتم‌های تراز پایینی و گسیل القایی اتم‌های تراز بالایی تحت اثر تابش می‌باشد [۳]:

$$k = \frac{g_u A_{ul} N_{Al} \lambda_0^2}{8\pi Z} e^{-\frac{E_l}{k_b T}} (1 - e^{-\frac{hv_0}{k_b T}}) L(v, v_0). \quad (4)$$

در معادله فوق l طول پلاسمای باشد. با جاگذاری معادلات (۲)، (۳) و (۴) در معادله (۱) شدت خطوط طیفی در پلاسمای ضخیم از رابطه زیر تخمین زده می‌شود:

$$I_{thick} = \frac{(1 - e^{-kl})}{(1 - e^{-\frac{hc}{\lambda_0 k_b T}})} \frac{C8\pi}{\lambda_0^2} e^{-\frac{(E_u - E_l)}{k_b T}}. \quad (5)$$

کمیت Z تابع پارش ذرات پلاسمای باشد که طبق مراجع [۵، ۶] از مدل دو و سه ترازی محاسبه می‌گردد. بمنظور محاسبه پارامترهای چگالی ذرات و دمای پلاسمای نیز تابع ابزاری سیستم، شدت خطوط طیفی آلومینیوم در پلاسمای ضخیم اپتیکی برای سه خط دلخواه از یک عنصر بصورت زیر در نظر گرفته می‌شود. در واقع از جفت‌شدن سه معادله مشابه با معادله (۶) برای سه خط متفاوت طیفی، پارامترها محاسبه می‌گردند.

$$I_{thick_i} - \frac{(1 - e^{-k_i l})}{(1 - e^{-\frac{hc}{\lambda_{0i} k_b T}})} \frac{C8\pi}{\lambda_{0i}^2} e^{-\frac{(E_{ul} - E_{li})}{k_b T}} = 0 \quad (6)$$

با تقسیم نمودن شدت دو به دوی سه خط فوق و نیز انجام محاسبات عددی، پارامترهای مذبور بطور کمی برآورد می‌گردد. سایر پارامترهای ورودی معادله فوق نظیر طول پلاسمای l ، از تکنیک سایه‌نگاری در هر لحظه بدست می‌آمده است. همچنین چگالی الکترونی از پهنهای خط نیتروژن هوا در طول موج ۷۴۲.۳۶ nm محاسبه گردیده است [۶]:

$$\Delta\lambda_{stark} = \frac{2\omega n_e}{10^{16}} \quad (7)$$

پارامتر استارک مربوط به این خط از مرجع [۷] اتخاذ گردیده است. در این آزمایش، در انرژی لیزر 50 mJ و در زمان تاخیری $1 \mu\text{s}$ ، چگالی الکtron از مرتبه 10^{23} m^{-3} برآورد شده است.

۳- چیدمان تجربی

در این تحقیق، چیدمان تجربی‌ای که از دو تکنیک سایه‌نگاری و اسپکتروسکوپی LIBS جهت آنالیز پارامترهای پلاسمای استفاده می‌کند، در شکل ۱ ارائه شده است. جهت تولید پلاسمای از یک

۱- مقدمه

بطور کلی اغلب روش‌های متداول در تکنیک LIBS، جهت محاسبه پارامترهای پلاسمای بر مبنای ارزیابی میزان گسیل از پلاسمای نازک اپتیکی می‌باشد. به عنوان مثال تعیین چگالی الکترونی از پهنهای استارک و همچنین اندازه‌گیری دما از نمودار بولتزمن و یا از نسبت دو خط بر اساس استفاده از خطوط نازک اپتیکی فرمول نویسی شده‌اند، در حالی که برای اغلب خطوط قوی طیف LIBS، پلاسما ضخیم محسوب می‌گردد. در این شرایط، بعلت پدیده خودجذبی و بدليل برآورد غلطی از پهنهای خطوط و شدت طیف‌ها، چگالی الکترونی و دمای پلاسما با مقادیر نادرستی محاسبه می‌گردد. در این تحقیق پارامترهای پلاسمای اسپکتروسکوپی سیستم طی روشن جدیدی با ترکیب چیدمان‌های اسپکتروسکوپی و سایه‌نگاری محاسبه گردیده‌اند.

۲- تئوری و معادلات ریاضی

بطور کلی شدت تابش طیفی در امتداد پروفایل خط در گذار بین دو تراز u و l از حاصلضرب شدت خط نازک خودجذب نشده در ضریب خودجذبی بدست می‌آید:

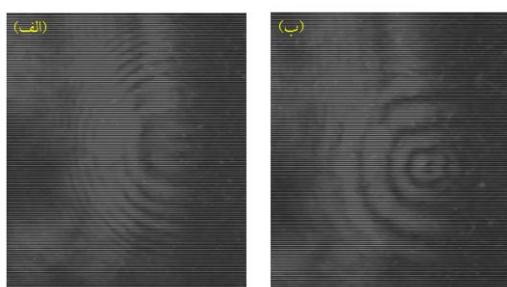
$$I_{thick} = SA \times I_{thin}. \quad (1)$$

در رابطه فوق، SA و I_{thin} به ترتیب ضریب خودجذبی و شدت تابش مربوط به خط نازک طیفی می‌باشند که شدت خط نازک بدون اثرات خودجذبی از معادله زیر محاسبه می‌گردد [۱]:

$$I_{thin}(v) = C \frac{g_u N_{Al} A_{ul} h v_0}{Z} e^{-\frac{E_u}{k_b T}} L(v, v_0). \quad (2)$$

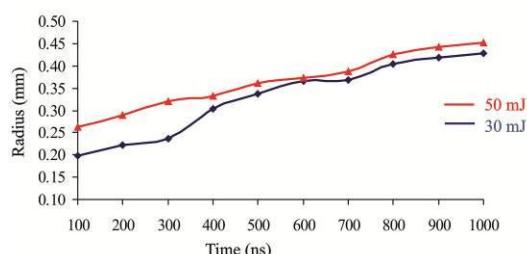
در این رابطه h و E_u ، g_u ، N_{Al} ، A_{ul} و Z به ترتیب ثابت پلانک، احتمال گذار بین تراز بالایی u و تراز پایینی l ، چگالی تعداد کل اتم‌ها، تبهگنی تراز بالا، فرکانس مرکزی گذار، انرژی تراز نام و تابع پارش می‌باشند. در این معادله، $L(v, v_0)$ پروفایل لورنتس بعلت اثر استارک می‌باشد که بدليل حضور فراوان یون‌ها در پلاسمای LIBS این پروفایل در نظر گرفته شده است. فاکتور تجربی C که تابع ابزاری سیستم آزمایشگاه می‌باشد، بازده اپتیکی سیستم جمع‌کننده نور اعم از اسپکترومتر، آشکارساز و نیز هندسه چیدمان را دربرمی‌گیرد. علاوه ضریب خودجذبی SA در معادله (۱) از نسبت شدت خط ضخیم اپتیکی به تابش خط نازک مربوط به خط مذبور، بدین صورت محاسبه می‌گردد [۲]:

در روش سایه‌نگاری، پرتو موازی پهنه‌ی از یک ناحیه اختلالی (در اینجا پلاسمای پلاسما) می‌گذرد. اگر اختلال مزبور، دارای ضرب شکست متغیری باشد، اشعه‌های نور عبوری از این ناحیه اختلالی به طور مجازی شکست می‌یابند و از مسیرهای اصلی‌شان منحرف می‌شوند. این موضوع سبب می‌گردد که توزیع شدت بر روی پرده، به صورت سایه‌ای از تغییرات میدان ضرب شکست پلاسمای پلاسما نمایان شود. شکل ۲ تصاویری از امواج شوک ثبت شده در پلاسمای طی چیدمان سایه‌نگاری، توسط یک CCD معمولی، پس از کندگی هدف آلومنیومی در زمان‌های 200 ns و $1\text{ }\mu\text{s}$ نشان می‌دهد که به دنبال آن طول پلاسمای محاسبه می‌گردد.



شکل ۲: تصاویری از پلاسمای اسکن شده در زمان‌های (الف) 200 ns و (ب) $1\text{ }\mu\text{s}$.

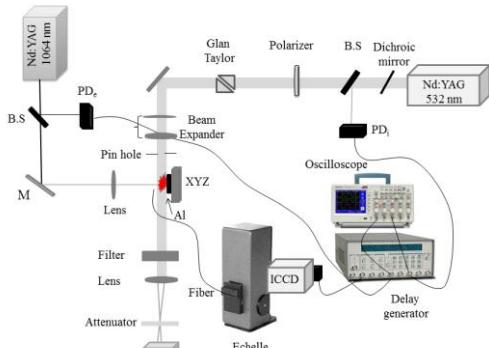
با درنظر گرفتن طول پلاسمای از تصاویر مربوط به امواج شوک در هر لحظه زمانی، می‌توان تحولات زمانی ابعاد پلاسمای را در راستای موازی با لیزر پمپ در انرژی‌های 30 mJ و 50 mJ از بخش سایه‌نگاری این چیدمان، در شکل ۳ ترسیم نمود.



شکل ۳: رفتار فضایی جبهه موج شوک بر حسب تاخیر زمانی بین پالس‌های پمپ و گمانه در انرژی‌های لیزر 30 mJ و 50 mJ .

سپس با درنظر گرفتن ابعاد پلاسمای سایه‌نگاری و نیز ملاحظه نمودن رفتار زمانی شکل ۳، سرعت موج شوک در هر لحظه برآورد می‌گردد. از این‌رو تحولات زمانی مربوط به سرعت پلاسمای برای انرژی‌های لیزر 30 mJ و 50 mJ در شکل ۴ نشان داده شده است.

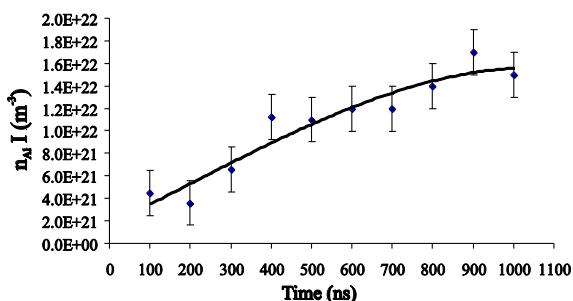
لیزر سوئیچ Q, Nd:YAG با طول موج 1064 nm ، پهنه‌ی پالس 10 ns و نرخ تکرار 2 Hz به عنوان لیزر پمپ استفاده شده است. این لیزر بر روی نمونه استاندارد آلمینیوم 1100 cm^2 واقع در هوای اتمسفر، توسط لنزی با فاصله کانونی 18 cm متراکز می‌گردد. انرژی لیزر بر روی نمونه دارای مقادیر 30 mJ , 44 mJ , 50 mJ و 60 mJ باشد که این انرژی توسط ژول متر در هر مرحله قبل از انجام آزمایش اندازه‌گیری می‌شود. با درنظر گرفتن قطر لکه لیزر در محل تابش نمونه، فلوئنس لیزر دارای مقادیر بین $1\times 10^{26.5}\text{ }\mu\text{J}$ تا $1.2\times 10^5\text{ }\mu\text{J}$ می‌باشد. لیزر گمانه که بمنظور درخشنادی پلاسمای استفاده می‌گردد، هارمونیک دوم Nd:YAG با طول موج 532 nm طول پالس 10 ns و آهنگ تکرار 2 Hz می‌باشد. مطابق شکل، دو شکافنده پرتو، لیزرهای پمپ و گمانه را به ترتیب به سمت فوتودیودهای PD_1 و PD_2 هدایت می‌کنند. فوتودیودهای مذکور به یک اسیلوسکوپ دیجیتال متصل شده‌اند تا رفتار زمانی دو پالس پمپ و گمانه را در حین آزمایش نمایش دهند. یک تاخیرانداز دیجیتال با مدل ۵۳۵ Stanford DSG، زمان نورگیری دوربین ICCD و تاخیر بین دو لیزر را تنظیم می‌نماید. آنالیز زمانی طیف‌های ثبت شده، با کنترل زمان تاخیری و پهنه‌ی نورگیری دوربین ICCD صورت می‌پذیرد.



شکل ۱: چیدمان آزمایشگاهی آنالیز تابش‌های پلاسمای ضخیم اپتیکی با ترکیب روش‌های سایه‌نگاری و طیفسنجی.

۴- نتایج و بحث

از مزایای محاسبات فوق این است که حتی اگر خط مدنظر دچار خودجذبی نشده باشد، کمیت SA بطور اتومات یک محاسبه می‌گردد و همچنان روابط فوق صادق می‌باشند. از این‌رو تئوری ارائه شده، در هر دو شرایط پلاسمای نازک و ضخیم و نیز برای هر دو مورد خطوط خودجذب شده و نشده قابل کاربرد می‌باشد.



شکل ۶: تغییرات زمانی چگالی آلومینیوم در انرژی 50 mJ

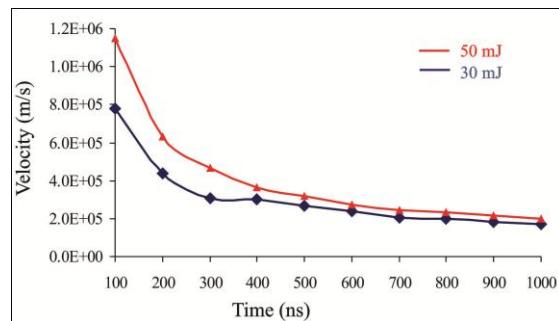
در پایان نیز با جاگذاری مقادیر مربوط به چگالی آلومینیوم و دمای پلاسما، تابع ابزاری سیستم آزمایشگاه حدوداً 1.5×10^{-8} برآورد گردیده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تئوری جدیدی بر مبنای استفاده از سه خط خودجذب شده جهت محاسبه پارامترهای پلاسما بطور دقیقی ارائه گردیده است. این مقاله پیشنهاد می‌کند که جهت برآورد دقیقی از پارامترهای پلاسما، بایستی اثر ضخامت اپتیکی که اغلب منجر به خودجذب طیفی می‌گردد، در محاسبات لحاظ گردد.

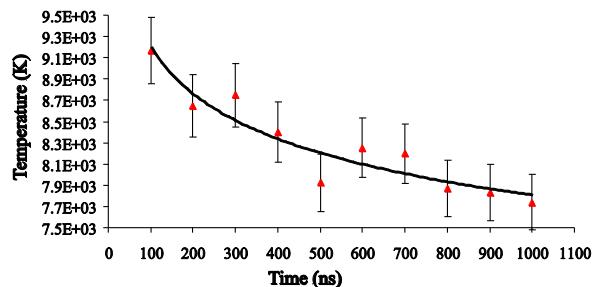
مراجع

- [۱] A.W. Mizolek, V. Palleschi, I. Schechter, *Laser induced breakdown spectroscopy*, Cambridge University Press, (2006).
- [۲] H. Y. Moon, K. K. Herrera, N. Omenetto, B.W. Smith, J. D. Winefordner, *On the usefulness of a duplicating mirror to evaluate self-absorption effects in laser induced breakdown spectroscopy*, Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 64 702-713, (2009).
- [۳] W. Lochte-Holtgreven, *Plasma Diagnostics*, (1968).
- [۴] G. Colonna, M. Capitelli, *A few level approach for the electronic partition function of atomic systems*, Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 64 863-873, (2009).
- [۵] F. Rezaei, S. Tavassoli, *Developing the model of laser ablation by considering the interplay between emission and expansion of aluminum plasma*, Physics of Plasmas, 20 013301, (2013).
- [۶] I. B. Gornushkin, L. A. King, B.W. Smith, N. Omenetto, J. D. Winefordner, *Line broadening mechanisms in the low pressure laser-induced plasma*, Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 54 1207-1217, (1999).
- [۷] N. Konjević, *Plasma broadening and shifting of non-hydrogenic spectral lines: present status and applications*, Physics Reports, 316 339-401, (1999).



شکل ۴: تغییرات سرعت موج شوک بر حسب زمان برای انرژی‌های لیزر 50 mJ و 30 mJ .

با جاگذاری چگالی الکترونی از پهنهای خط نیتروژن، درج طول پلاسما در هر لحظه زمانی از چیدمان سایه‌نگاری و نیز لحظه نمودن ثابت‌های مربوط به خطوط طیفی از جدول داده‌های NIST در معادله (۶)، شدت پلاسمای ضخیم بصورت تابعی از دما، چگالی و تابع ابزاری برآورد می‌گردد. با جفت نمودن سه معادله برای سه خط، در هر لحظه خاص زمانی پارامترهای مذکور محاسبه می‌شوند. از اینرو، شکل ۵ تغییرات زمانی دمای پلاسما را برای انرژی لیزر 50 mJ با رویکردی نوین تشریح می‌کند. همانطور که ملاحظه می‌گردد با گذشت زمان پلاسما تدریجاً سرد گردیده و از دمای آن کاسته می‌گردد.



شکل ۵: تحولات زمانی دمای پلاسما برای انرژی لیزر 50 mJ

با درنظر گرفتن ملاحظات فوق، شکل ۶ تحول زمانی چگالی آلومینیوم خنثی را در انرژی لیزر 50 mJ برای بازه زمانی 100 ns تا $1 \mu\text{s}$ نمایش می‌دهد. رفتار زمانی چگالی گویای این مطلب است که با گذشت زمان، پلاسما سرد شده و بر میزان ذرات خنثی افزوده می‌گردد.