بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

بررسی تجربی سازوکار افزایش شدت تابش پلاسما در روش طیف سنجی فروشکست القایی لیزری دوپالسی

علی صفی، مریم بحرینی و سید حسن توسلی

پژوهشکده لیزر وپلاسما، دانشگاه شهید بهشتی

چکیده – روش طیف سنجی فروشکست القایی لیزری(*LIBS*) دوپالسی، افزایش قابل‌توجهی را برای شدت تابش پلاسما برای خطوط طیفی مختلف نسبت به حالت تک پالس نشان می‌دهد. در این مقاله سازوکار افزایش شدت تابش پلاسما برای پیکربندی موازی در روش طیف سنجی فروشکست القایی لیزری دوپالسی مورد مطالعه قرار گرفته است. در پیکربندی موازی هر دو پرتو لیزر دارای راستای انتشار یکسان و در جهت عمود بر صفحه نمونه تابانده می‌شوند. برای این پیکربندی بعضی از فرضیات اساسی را که به عنوان عامل اصلی افزایش شدت تابشی عنوان‌شده است از جمله تغییر در سازوکار کندگی، کاهش فشار محیطی و افزایش دمای پلاسما مورد مطالعه قرار گرفته است. نمونه مورد آزمایش، نمونه آلومینیومی می باشد و آزمایشات در فشار اتمسفری هوا انجام شده است.

کلید واژه- طیف سنجی فروشکست القایی لیزری، نمونه آلومینیومی، لیزر نانوثانیه ، پلاسما

Experimental Study of Plasma Intensity enhancement mechanism in Double pulse Laser-Induced Breakdown Spectroscopy

Ali Safi, Maryam Bahreini, Seyed Hassan Tavassoli

Laser & Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Evin, Tehran, Iran.

Abstract- Double Pulse Laser-Induced Breakdown Spectroscopy technique significantly indicates increasing for plasma intensity of various spectral emission lines compared to single-pulse scheme. In this paper mechanism of signal enhancement has been studied for collinear configuration of double pulse laser induced breakdown spectroscopy .In collinear configuration Both of laser beam propagation in the same direction and they are irradiated in the perpendicular direction respect to the plane of sample. For this configuration, some of the basic hypotheses that is mentioned as the main cause of increase in the radiation intensity has been studied such as a change in the mechanism of ablation, ambient pressure reduction, increasing plasma temperature. Sample is aluminum and experiments have been carried out at atmospheric pressure.

Keywords: Ablation, Ambient pressure, collinear configuration, Double pulse LIBS, plasma temperature.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]

۱- مقدمه

روش طیف سنجی فروشکست القایی لیزری(LIBS) دوپالسی به منظور غلبه بر حساسیت ضعیف ناشی از روش معمول طیف سنجی فروشکست القایی لیزری مورد استفاده قرار می گیرد. در روش LIBS دو پالسی به جای استفاده از یک پالس لیزر برای ایجاد پلاسما، از دو پالس لیزر بافاصله زمانی مشخص استفاده می‌شود که بسته به نوع پیکربندی استفاده‌شده، یک لیزر یا هر دو لیزر برای کندگی استفاده می‌شود[3-1]. این روش، افزایش قابل‌توجهی را برای شدت تابش پلاسما برای خطوط طیفی مختلف نسبت به حالت تک پالس نشان می‌دهد. ما در این مقاله به دنبال پاسخ به این پرسش هستیم که"در روش LIBS دو پالسی چه عاملی باعث افزایش شدت تابشی پلاسما می‌شود؟"

برای پاسخ دادن به این پرسش ضرورت دارد که سازوکار های مرتبط با ایجاد پلاسما، کندگی نمونه، برهم‌کنش لیزر با پلاسما و پارامترهای دخیل در آن مورد بررسی قرار گیرد. آزمایش‌های متعددی برای LIBS دو پالسی انجام‌شده است که از لحاظ پیکربندی آزمایش، ماتریس نمونه، شرایط آزمایشگاهی و... افزایش شدت تابشی مختلف و متنوعی را نشان می‌دهند. متأسفانه تنوع چیدمان و شرایط آزمایشگاهی استفاده‌شده، مقایسه این نتایج و نوشتن یک چارچوب نظری جامع را سخت و ناممکن می‌کند[4].

در حقیقت علاوه بر پارامترهای آزمایشگاهی مختلف (زمان‌بندی لیزرها، انرژی، فاصله لیزر تا نمونه و...) که قابل‌استفاده می باشد افزایش شدت تابشی مشاهده‌شده وابستگی قوی به هندسه جمع‌آوری پلاسما دارد.

دو پیکربندی اساسی و عمده برای هندسه و جهت پرتوهای لیزر در روش LIBS دو پالسی، پیکربندی متعامد و پیکربندی موازی می باشد که در پیکربندی موازی هر دو پرتو لیزر دارای راستای انتشار یکسان و در جهت عمود بر صفحه نمونه تابانده می‌شوند و در پیکربندی متعامد دو پرتو لیزر مسیر متفاوتی را طی می‌کنند بدین صورت که یکی از پرتوها عمود بر صفحه نمونه و دیگری موازی صفحه نمونه تابانده می‌شود و بستگی به اینکه کدام یک از این پرتوها اول به نمونه برسد به دو نوع پیش کندگی و بازگرمایش تقسیم می شود[5].

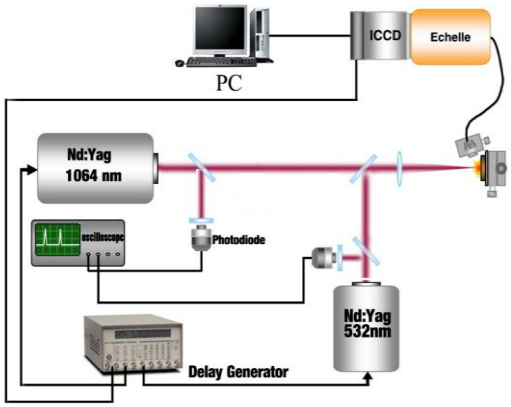
در میان پیکربندی‌های مختلف LIBS دو پالسی، حالت متعامد بازگرمایش سازوکار نسبتاً مشخص و واضح تری نسبت به دو حالت دیگر دارد. بنابراین ما در این بخش تمرکز خود را بروی دو حالت دیگر یعنی حالت متعامد پیش کندگی و حالت موازی جلب می‌کنیم که سازو کار مشابهی برای افزایش شدت تابشی از خود نشان می دهند. بیان این مطلب حائز اهمیت می‌باشد که بر اساس مقالات مختلف و گزارش‌های متعدد علت و سازوکار اصلی افزایش شدت تابشی برای دو حالت موازی و متعامد پیش کندگی هنوز به درستی و به وضوح مشخص نمی‌باشد.

پیکربندی که در این مقاله مورد مطالعه قرار گرفته است پیکربندی موازی می باشد و فاصله زمانی دو پالس لیزر متغیر می باشد. برای این پیکربندی بعضی از فرضیات اساسی را که به عنوان عامل اصلی افزایش شدت تابشی عنوان‌شده است مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- چیدمان تجربی

چیدمان تجربی آزمایش LIBS دوپالسی برای حالت موازی در شکل۱ نشان داده شده است. در این آزمایش از دو لیزر Nd:YAG پالسی با طول موج‌های هماهنگ اصلی ۱۰۶۴ و هماهنگ دوم ۵۳۲ نانومتر با نرخ تکرار ۲ هرتز استفاده می‌شود. هم چنین دو پرتو لیزر با استفاده از عدسی با فاصله کانونی ۱۸ سانتی‌متر برای ایجاد پلاسما بر روی نمونه متمرکز می‌شوند .زمان تاخیر برای این آزمایش ۱ میکرو ثانیه و پنجره زمانی برای طیف گیری ۲۰ میکروثانیه می‌باشد. در این آزمایش نیز نمونه استاندارد آلومینیوم با آلیاژ ۴۰۴۳ مورد بررسی قرار گرفته است. برای حالت تک پالس از پالس لیزر با انرژی ۹۰ میلی ژول و برای حالت دو پالسی از دو پالس ۴۵ میلی ژول (مجموع ۹۰ میلی ژول) استفاده شده است.

.



شکل۱: چیدمان آزمایش

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]

۳- نتایج

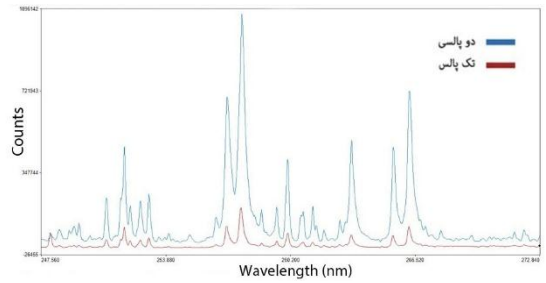
همانطور که در مقدمه عنوان شد آزمایش LIBS دوپالسی افزایش قابل‌توجهی را برای شدت تابش پلاسما برای خطوط طیفی مختلف نسبت به حالت تک پالس نشان می‌دهد. در شکل ۲ بخشی از طیف روش LIBS دو پالسی با حالت تک پالس در پیکربندی موازی مقایسه شده است و همان‌طور که قابل مشاهده می باشد افزایش شدت تابشی قابل ملاحظه ای برای خطوط طیفی تابش پلاسما شاهد هستیم. در شکل ۲ خطوط طیفی آبی رنگ برای حالت دو پالسی و خطوط طیفی قرمز رنگ برای حالت تک پالس می باشد. از آنجایی که هدف این مقاله بررسی سازوکار افزایش شدت تابشی با استفاده از روش LIBS دوپالسی می باشد در ادامه بعضی از عوامل اصلی افزایش شدت تابشی پلاسما، به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است.

برای حالت متعامد پیش کندگی و موازی ۳ دلیل عمده برای افزایش شدت تابشی پیشنهاد شده است که این سه عامل عبارتند از

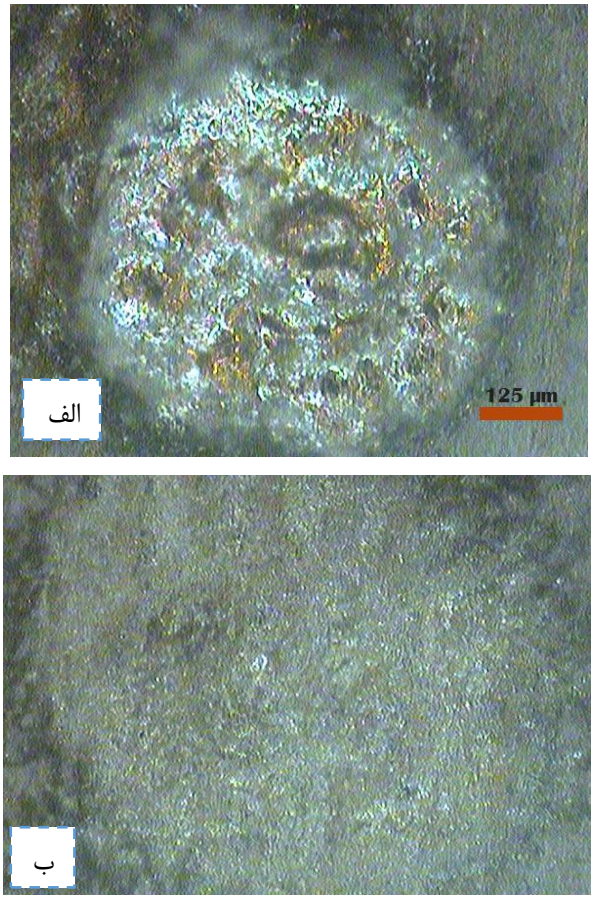
- تغییر در سازوکار کندگی
- کاهش فشار محیطی
- افزایش دمای پلاسما

۳-۱- تغییر در سازوکار کندگی

چندین محقق عامل افزایش شدت تابشی خطوط طیفی پلاسما را تغییر در سازوکار کندگی عنوان می‌کنند بدین صورت که پلاسمای ایجادشده توسط لیزر اول در مقابل نمونه باعث می‌شود، سازوکار برهم‌کنش نمونه با لیزر دوم تغییر کند و جرم مواد کنده شده افزایش یابد. از آن جایی که محققین یک همبستگی شدید بین جرم کندگی و



شکل ۲: مقایسه طیف حاصل از LIBS تک پالس ودو پالسی برای پیکربندی موازی



شکل۳: مقایسه کیفی کندگی برای حالت الف) دوپالسی ب) تک پالس برای نمونه آلومینیوم(حالت موازی)

افزایش شدت تابشی را گزارش نموده‌اند. پس نتیجه می‌گیریم تغییر سازوکار کندگی توسط پلاسمای ایجادشده در هوا باعث افزایش جرم کندگی می‌شود و به دنبال آن افزایش جرم کندگی باعث افزایش شدت تابش پلاسما خواهد شد.

همان طور که در شکل ۳ مشاهده می‌کنید شکل کندگی برای حالت تک پالس و حالت دو پالسی تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای با هم دارند. این تصاویر افزایش در جرم مواد کنده شده و افزایش عمق حفره را تأیید می‌کند.

۳-۲- کاهش فشار محیطی

یکی از عوامل تأثیرگذار بر افزایش شدت تابش برای حالت LIBS دو پالسی کاهش فشار محیط اطراف نمونه می‌باشد که به دلیل تشکیل پلاسمای اول رخ می‌دهد. پلاسمایی که توسط لیزر اول در هوا ایجاد می شود چنین توانایی

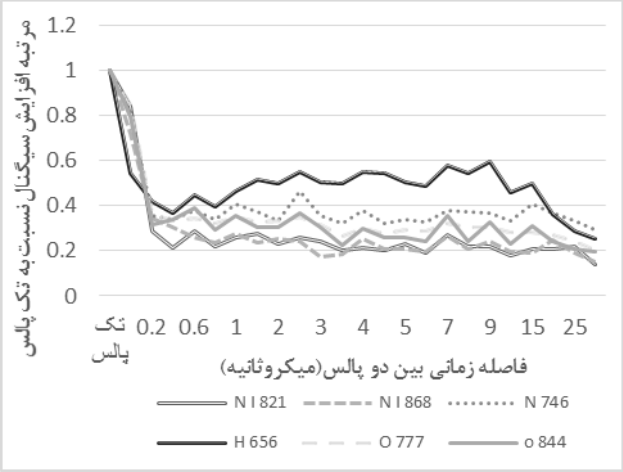
[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]

ندارد که بتواند اطراف نمونه را با گازهای نجیب هلیم و آرگون محاصره کند ولی تأثیر فیزیکی ذاتی آن می‌تواند به صورت جایگزین، فشار اتمسفر و چگالی ذرات هوا را کاهش دهد. ما این عامل را به صورت تجربی مورد مطالعه قرار داده‌ایم و نتایج آن در شکل ۴ ارائه شده است. ما در این آزمایش شدت تابش خطوط طیفی هوا را برای حالت تک پالس و دو پالسی با فواصل زمانی مختلف مقایسه کردیم.

همان طور که مشاهده می‌کنید، نسبت شدت خطوط طیفی حالت دو پالسی (برای همه فواصل زمانی) نسبت به حالت تک پالس کم تر از عدد ۱ می‌باشد بنابراین در حالت LIBS دو پالسی شاهد کاهش شدت تابش عناصر هوا و یا به بیانی دیگر کاهش غلظت عناصر هوا هستیم. این کاهش غلظت عناصر هوا همان طور که اشاره شد تاثیری مشابه با حالت کاهش فشار محیط اطراف نمونه را دارا می‌باشد و سبب افزایش کندگی و شدت تابش پلاسما می‌شود.

۳-۳- افزایش دمای پلاسما

افزایش دمای پلاسما یکی دیگر از پارامترهایی است که به عنوان عامل افزایش شدت تابش پلاسما ذکر می‌شود. به همین منظور، دمای پلاسما درحالت تک پالس و دوپالسی برای نمونه آلومینیوم در فواصل زمانی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. روشی که برای محاسبه دما استفاده شده است روش نمودار بولتزمن می‌باشد. همان طور که مشاهده می‌کنید برای فواصل زمانی مختلف بین دو پالس لیزر، دمای حالت دو پالسی تقریباً ۵۰۰۰ کلوین



شکل۴: تاثیر فاصله زمانی دو پالس لیزر بر افزایش شدت تابش پلاسما برای خطوط طیفی عناصر هوا

شکل ۵: نمودار تغییرات دما برای حالت تک پالس و حالت دو پالسی با فواصل زمانی مختلف

بیش تر از حالت تک پالس می باشد و شاهد دمای پلاسمای به مراتب بیش‌تری برای حالت دو پالسی نسبت به تک پالس هستیم

۴- نتیجه‌گیری

سازوکار افزایش شدت تابش پلاسما برای پیکربندی موازی روش LIBS دوپالسی به تفصیل مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج آزمایشات نشان داد که در حالت دو پالسی شاهد کاهش شدت تابش عناصر هوا هستیم. هم چنین دمای پلاسما در حالت دو پالسی تقریباً ۵۰۰۰ کلوین بیش تر از حالت تک پالس می باشد و جرم مواد کنده شده در حالت دو پالسی نسبت به تک پالس افزایش می یابد.

مراجع

[1] C. Division and L. Alamos, "*Spectrochemical Analysis of Liquids Using the Laser Spark* *," (1984), pp. 721–729.

[2] D. N. Stratis, K. L. Eland, and S. M. Angel, "*Dual-pulse LIBS using a pre-ablation spark for enhanced ablation and emission*," **Applied Spectroscopy**, vol. 54, no. 9, (2000), pp. 1270–1274.

[3] J. Uebbing, J. Brust, W. Sdorra, and F. Leis, "*Reheating of a Laser-Produced Plasma by a Second Pulse Laser*," **Applied Spectroscopy**, vol. 45, no. 9, (1991), pp. 1419–1423.

[4] V. I. Babushok, F. C. D. Jr, J. L. Gottfried, C. A. Munson, and A. W. Miziolek, "*Double pulse laser ablation and plasma: Laser induced breakdown spectroscopy signal enhancement*," **Spectrochim. Acta Part B**, vol. 61, (2006), pp. 999–1014.

[5] S. I. Miziolek AW, Palleschi V, "*Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS): fundamentals and applications*." Cambridge: **Cambridge University Press**, (2006).

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]