بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

اثرات انرژی لیزر و فاصله زمانی بین دوپالس بر افزایش سیگنال در روش طیف‌سنجی فروشکست القایی لیزری دو پالسی با استفاده از پیکربندی بازگرمایش

علی صفی، مریم بحرینی و سید حسن توسلی

پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

چکیده – در روش طیف سنجی فروشکست القایی لیزری دوپالسی از دو پالس لیزر برای افزایش شدت تابش‌های طیفی استفاده می شود. در این روش از پیکربندی‌های مختلفی استفاده می شود. در این مقاله پیکربندی بازگرمایش بر روی نمونه آلومینیومی در فشار اتمسفری هوا مورد مطالعه قرار گرفته است. از پالس‌های لیزر دوم برای گرم کردن و برهم‌کنش با پلاسمای ایجاد شده توسط لیزر اول استفاده می شود. برای این پیکربندی تاثیر انرژی و فاصله زمانی بین دو پالس لیزر بر شدت تابش پلاسما برای خطوط طیفی مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌است. با توجه به نتایج بدست آمده، فاصله زمانی بهینه بین دو پالس لیزر و ترکیب انرژی بهینه برای بیشینه افزایش سیگنال گزارش شده است.

کلید واژه- افزایش سیگنال، پیکربندی بازگرمایش، طیف سنجی فروشکست القایی لیزری دو پالسی، فاصله زمانی بین دو پالس

Effects of laser energy and inter-pulses delay time on signal enhancement in double pulse laser induced breakdown spectroscopy using reheating configuration

Ali Safi, Maryam Bahreini and Seyed Hassan Tavassoli

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

Abstract- In double pulse laser induced breakdown spectroscopy method, two laser pulses are used to increase the intensity of spectral radiation. This method is used various configurations. In this paper reheating configuration of double pulse laser induced breakdown spectroscopy is studied on aluminum sample at atmospheric pressure in air. In this configuration, the second laser pulses are used for heating and interaction with the plasma created by the first laser pulse. For this configuration, the effects of laser pulse energy and delay time between two laser pulses on signal enhancement for various spectral lines are investigated. According to our results, the optimal inter-pulses delay time and energy combination for maximum signal enhancement are reported.

Keywords: Double pulse LIBS, Inter-pulses delay, Reheating configuration, Signal enhancement

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

۱- مقدمه

روش LIBS یکی از روش‌های آنالیز عنصری مواد بر پایه طیف‌سنجی می باشد، که برای تجزیه و تحلیل کمی و کیفی عنصری مواد مختلف بسیار مورد توجه قرار گرفته است. ابزار و وسایل روش LIBS نسبت به دیگر روش‌های متداول، ساده‌تر و ارزان‌تر است به گونه‌ای که می‌توان مجموعه‌ای از این ابزار را بصورت یک وسیله قابل حمل، قدرتمند و قابل استفاده در هر محیطی ساخت. روش LIBS در کنار مزایای فراوانی که دارد معایبی را نیز دارا می باشد، که مهم ترین آن، حساسیت ضعیف این روش در مقایسه با روش های دیگر می باشد. یکی از روش هایی که برای افزایش حساسیت LIBS پیشنهاد شده‌است روش LIBS دو پالسی می باشد که باعث بهبود حساسیت، افزایش دقت، کاهش اثر ماتریس و به طور کلی باعث بهبود معایب روش LIBS شده است. خاستگاه و منشأ اصلی آزمایش LIBS دو پالسی، در آزمایش که توسط کرمر در سال ۱۹۸۴ انجام شد، نهفته است. این آزمایش بر روی محلول آبی و برای بهبود کیفیت آشکارسازی عناصر موجود در محلول و با استفاده از پیکربندی موازی انجام شد[۱]. در روش LIBS دو پالسی از پیکربندی-های مختلفی استفاده می شود که در این مقاله پیکربندی متعامد بازگرمایش مورد بررسی قرار گرفته است [۲].

در پیکربندی بازگرمایش پالس اول مسیر عمود بر صفحه نمونه را طی می‌کند و نقش کندگی را بازی می‌کند. پالس دوم داری مسیر انتشاری موازی صفحه نمونه و عمود بر مسیر انتشار پالس اول می‌باشد و با پلاسمای ایجادشده به وسیله پالس اول برهم‌کنش می‌دهد. این پالس لیزر نقشی در کندگی نمونه ندارد و صرفاً برای برهم‌کنش و گرم کردن مجدد پلاسمای اول استفاده می‌شود.

در سال ۱۹۹۱ اولین بار یوبینگ و دستیارانش به مطالعه پیکربندی LIBS دو پالسی متعامد بازگرمایش بر روی نمونه جامد فلزی پرداخته و بهبودی خوبی برای تابش پلاسما گزارش کردند [۳].

نتایج این آزمایش نشان داد که از آن جا که، مقدار قابل‌توجهی از انرژی پالس لیزر توسط پلاسما جذب می‌شود، می توان نتیجه گرفت که با استفاده از دو پالس یا چند پالس پشت سر هم می‌توان به تحریک و گرم شدن مجدد پلاسما کمک کرد.

روش LIBS دو پالسی کاربردهای وسیعی دارد. به عنوان نمونه می دانیم، لیزر فمتو ثانیه و فوق کوتاه در مقایسه با لیزرهای نانو ثانیه دارای عمق کندگی بهتر، دقیق‌تر و قابل کنترل‌تری هستند، درحالی‌که لیزهای نانو ثانیه در مقایسه با لیزرهای فمتوثانیه دارای تابش پلاسمای قوی تر هستند. یکی از امتیازات رویکرد دو پالسی، ترکیب لیزرهای فمتو ثانیه و نانو ثانیه می‌باشد که باعث افزایش مقدار کندگی و مقدار تابش پلاسما می‌شود، درنتیجه این رویکرد منجر به افزایش حساسیت LIBS می‌شود[۴].

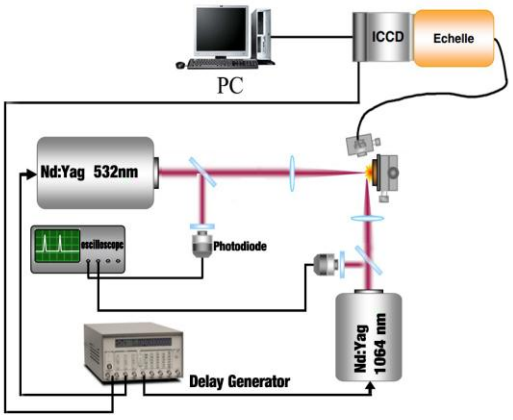
ترکیب‌های مختلفی از طول موج، انرژی، پهنای زمانی، هندسه پرتوهای لیزر و فواصل زمانی بین دو پالس لیزر می‌تواند به صورت بسیار موثری سبب بهینه‌سازی و افزایش عملکردLIBS دو پالسی شود[۵].

در این مقاله و در بخش اول نتایج حالت بازگرمایش، تأثیر فاصله زمانی بین دو پالس لیزر را بر شدت تابش پلاسما مطالعه می‌کنیم و درصدد این هستیم که بازه زمانی بهینه‌ای را که شاهد افزایش شدت تابشی بیشینه هستیم گزارش کنیم. در ادامه در بازه زمانی بهینه تأثیر ترکیب انرژی های مختلف را مطالعه می‌کنیم و ترکیب انرژی بهینه را گزارش خواهیم کرد.

۲- چیدمان تجربی

چیدمان تجربی پیکربندی متعامد بازگرمایش را در شکل۱ نمایش داده شده است. در این آزمایش از دو لیزر Nd:YAG پالسی با طول موج‌های هارمونیک اصلی ۱۰۶۴ و هارمونیک دوم ۵۳۲ نانومتر با نرخ تکرار ۲ هرتز استفاده می‌شود. زمان تاخیر برای این آزمایش ۲ میکرو ثانیه و پنجره زمانی برای طیف گیری ۱۰ میکروثانیه می‌باشد.

نمونه استاندارد آلومینیوم با آلیاژ ۲۰۱۷ در این آزمایش مورد بررسی قرار گرفته است. یک دستگاه مولد تاخیر یرای کنترل فواصل زمانی لیزرها و راه انداختن ICCD استفاده می شود. قدرت تفکیک پذیری طیف سنج در حدود ۰.۰۲ نانومتر می باشد.



شکل ۱: چیدمان آزمایش

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]

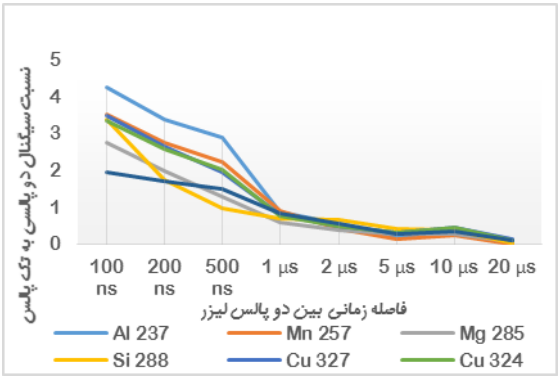
۳- نتایج

همانطور که در مقدمه ذکر شد در ابتدا تأثیر فاصله زمانی بین دو پالس لیزر بر شدت تابش پلاسما مورد مطالعه قرار می گیرد و بازه زمانی بهینه‌ای که شاهد افزایش شدت تابشی بیشینه هستیم گزارش خواهد شد و در ادامه در این بازه زمانی بهینه تأثیر ترکیب مختلف انرژی مورد مطالعه قرار گرفته و ترکیب انرژی بهینه گزارش خواهد شد.

۳-۱- تأثیر فاصله زمانی دو پالس‌لیزر بر شدت تابش پلاسماو تعیین فاصله زمانی بهینه:

فاصله زمانی دو پالس لیزر یک عامل تعیین‌کننده در آزمایش LIBS دو پالسی می‌باشد. بسته به فاصله زمانی دو پالس لیزر، برهم‌کنش لیزر با پلاسما و نمونه تفاوت عمده‌ای خواهند داشت. در ابتدا ما طیف حاصل از آزمایش LIBS تک پالس با انرژی ۶۰ میلی ژول (منحصراً برای کندگی استفاده می‌شود) را با طیف حاصل از آزمایش LIBS دو پالسی با انرژی مجموع ۱۲۰ میلی ژول (۶۰+۶۰) که ۶۰ میلی ژول آن برای لیزر اول که کندگی نمونه را بر عهده دارد و ۶۰ میلی ژول دیگر برای لیزری است که با پلاسمای ایجادشده برهم‌کنش می‌کند. نتایج این آزمایش برای تعدادی از خطوط طیفی آلومینیوم در شکل۲ قابل‌مشاهده می‌باشد.

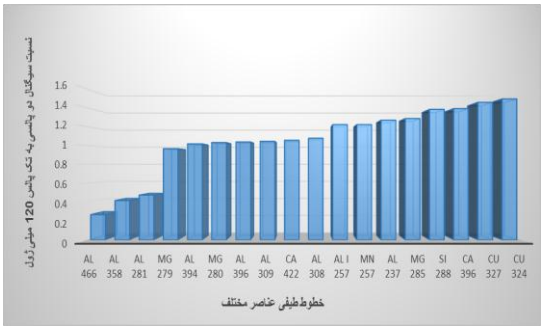
همانطور که مشاهده می‌شود زمانی که از پالس لیزر دوم برای گرم کردن پلاسما استفاده می‌کنیم، افزایش شدت تابشی قابل‌ملاحظه‌ای را خواهیم داشت. مطلب دیگر که از این شکل می‌توان گفت، رفتار مختلف افزایش شدت تابشی بافاصله زمانی می‌باشد. همان طور که از شکل۲ مشخص می‌باشد در فاصله زمانی زیر ۱ میکروثانیه بین دو پالس لیزر شاهد افزایش شدت تابش برای خطوط طیفی مختلف هستیم، درحالی‌که با افزایش فاصله زمانی دو لیزر ،کاهش شدت تابش پلاسما را مشاهده می‌کنیم. بنابراین بازه زمانی موثر برای مشاهده افزایش شدت تابش پلاسما را در فواصل زیر ۱ میکروثانیه در نظر می‌گیریم و هم-چنین بیش‌ترین مقدار افزایش شدت تابش پلاسما را برای فاصله زمانی ۱۰۰ نانو ثانیه بین دو پالس لیزر مشاهده می‌کنیم که این زمان را به عنوان زمان بهینه این آزمایش در نظر می‌گیریم. نتایج آزمایش‌ها مختلف نشان می دهد که چگالی الکترونی و ضریب جذب پلاسما در زمان‌های اولیه تشکیل پلاسما بسیار زیاد می‌باشد و سپس به سرعت افت پیدا خواهد کرد. به همین دلیل، در لحظات اولیه تشکیل پلاسما به دلیل حضور الکترون‌های زیاد، پالس لیزر دوم بر اساس فرآیند معکوس برم اشترلانگ توسط پلاسما جذب می‌شود و دمای آن را بالا می‌برد که نتیجه آن افزایش شدت تابش پلاسما خواهد بود.



شکل۳: تاثیر فاصله زمانی دو پالس لیزر بر شدت تابش پلاسما

۳-۲- مقایسه LIBS تک پالس ۱۲۰ میلی ژول با LIBS دو پالسی با مجموع انرژی ۱۲۰ میلی ژول (۶۰+۶۰)

در این بخش شدت تابش پلاسما را برای حالت تک پالس LIBS با انرژی بر پالس ۱۲۰ میلی ژول نسبت به LIBS دو پالسی با مجموع انرژی ۱۲۰ میلی ژول (۶۰+۶۰) که فاصله دو پالس لیزر ۱۰۰ نانو ثانیه می‌باشد مقایسه می‌کنیم. از آن جایی که در بخش قبل زمان بهینه را ۱۰۰ نانو ثانیه به دست آوردیم، در ادامه از شدت تابش پلاسمای LIBS دو پالسی با این فاصله زمانی استفاده می‌کنیم. نتایج این مقایسه را در شکل ۳ مشاهده می‌کنید. برای مقایسه بهتر، نسبت شدت تابش دو پالسی به شدت تک پالسی را در محور عمودی و همچنین خطوط طیفی مختلف را در محور افقی قرار داده‌ایم. همان‌طور که در این شکل مشاهده می کنید برای این حالت شاهد افزایش شدت تابشی برای حالت دو پالسی نسبت به تک پالس هستیم ولی مقادیر افزایش شدت تابشی قابل توجه نمی باشد و در بیشترین حالت خود به مقدار افزایشی ۱.۶ برابر می رسد.



شکل ۳: نسبت شدت تابش پلاسما در حالت دو پالسی (۱۲۰ میلی ژول،$\Delta T=100$ ns) به حالت تک پالس (۱۲۰ میلی ژول)

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]

۳-۳- مقایسه LIBS تک پالس ۶۰ و ۱۲۰ میلی ژول با LIBS دو پالسی با مجموع انرژی ۱۲۰ میلی ژول (۳۰+۹۰) و (۹۰+۳۰)

در این بخش برای به دست آوردن شرایط بهینه در آزمایش دو پالسی، تأثیر ترکیب انرژی بر افزایش شدت تابشی پلاسما مورد مطالعه قرار می‌گیرد. دو ترکیب انرژی زیر برای LIBS دوپالسی در نظر گرفته شده است:

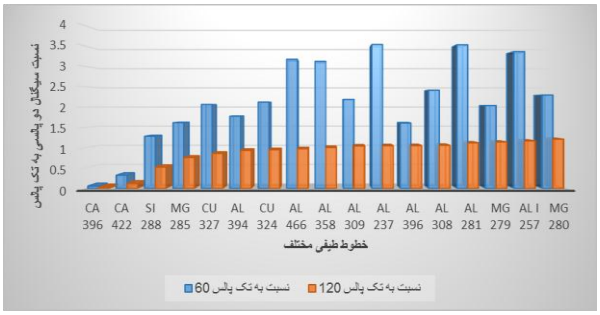
۳-۳- الف- انرژی لیزر کندگی۳۰ میلی ژول،انرژی لیزر باز گرمایش۹۰ میلی ژول

نتایج این ترکیب انرژی را در شکل۴ مشاهده می‌کنید. محور عمودی نسبت شدت تابش حالت دو پالسی به تک پالس برای این ترکیب انرژی و در محور افقی خطوط طیفی مختلف را مشاهده می‌کنید. برای هر خط طیفی دو ستون در نظر گرفته شده است، که ستون سمت راست شدت تابش دو پالسی به تک پالس با انرژی ۱۲۰ میلی ژول و ستون سمت چپ نسبت به تک پالس ۶۰ میلی ژول می‌باشد.

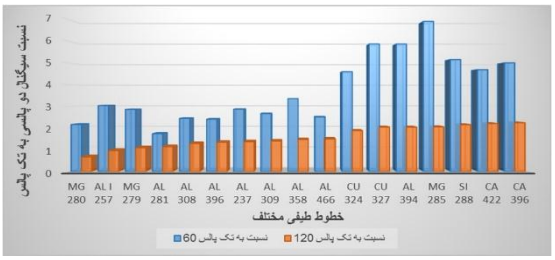
شکل۴ نشان می‌دهد که این ترکیب انرژی، تفاوت چندانی با ترکیب انرژی ۶۰+۶۰ ندارد و نسبت به حالت تک پالس ۶۰ میلی ژول افزایش خوبی دیده می‌شود ولی نسبت به حالت تک پالس ۱۲۰ میلی ژول افزایش خوبی مشاهده نمی‌گردد.

۳-۳- ب-انرژی لیزر کندگی:۹۰ میلی ژول، انرژی لیزر باز گرمایش:۳۰ میلی ژول

نتایج این ترکیب انرژی نیز با توجه به توضیحات ذکر شده، در شکل۵ نمایان می‌باشد این نمودار نسبت به دو ترکیب انرژی دیگر افزایش شدت بهتری را هم نسبت به موارد تک پالس ۱۲۰ میلی ژول و تک پالس ۶۰ میلی ژول نشان می‌دهد. همان طور که در این نمودار مشاهده می‌کنید نسبت شدت حالت دو پالسی به حالت تک پالس



شکل ۴: نمودار نسبت شدت تابش پلاسما در حالت دو پالسی (۳۰+۹۰ میلی ژول،$\Delta T=100$ ns) به حالت تک پالس (۱۲۰و۶۰ میلی ژول)



شکل۵: نمودار نسبت شدت تابش پلاسما در حالت دو پالسی (۳۰+۹۰ میلی ژول،$\Delta T=100$ ns) به حالت تک پالس (۱۲۰و۶۰ میلی ژول)

(۱۲۰ میلی ژول) برای بیشتر خطوط طیفی بالای ۱ می‌باشد که برتری حالت دو پالسی نسبت به تک پالس را برای افزایش شدت تابشی نشان می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

آزمایش LIBS دو پالسی برای حالت متعامد بازگرمایش نشان داد که بیشترین افزایش شدت تابش پلاسما در فاصله زمانی زیر ۱میکرو ثانیه بین دو پالس لیزر می باشد. در ادامه برای حالت بازگرمایش، ترکیب انرژی مختلف مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که، ترکیب انرژی ۹۰+۳۰ (۹۰ میلی ژول برای کندگی، ۳۰ میلی ژول برای بازگرمایش) نسبت به دو ترکیب انرژی دیگر کارایی بیشتری دارد.

مراجع

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

[2] L. J. R. Cremers, David A, "*Handbook of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*." **Wiley**, (2006).

[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] J. Scaffidi, J. Pender, W. Pearman, S. R. Goode, B. W. Colston, J. C. Carter, and S. M. Angel, "*Dual-pulse laser-induced breakdown spectroscopy with combinations of femtosecond and nanosecond laser pulses*," **Applied Optics**, vol. 42, no. 30, (2003), pp. 55–57.

[5] L. St-Onge, V. Detalle, and M. Sabsabi, "*Enhanced laser-induced breakdown spectroscopy using the combination of fourth-harmonic and fundamental Nd:YAG laser pulses*," **Spectrochimica Acta - Part B Atomic Spectroscopy**, vol. 57, no. 1, (2002), pp. 121–135.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]