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

تأثیر میدان مغناطیسی بر پارامترهای پلاسمای القائیده‌ی لیزری نمونه‌ی مس

(ربابه بابایی)، مهسا قزلباش، سید محمدرضا دربانی، عبدالله اسلامی‌مجد و علی قاسمی

پژوهشکده‌ی علوم و فناوری اپتیک و لیزر دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

دانشکده‌ی مهندسی مواد و انرژی دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

چکیده - در این پژوهش تأثیر اعمال میدان‌های مغناطیسی مختلف (۱,۱۲ -۰,۷۴ تسلا) تولید شده توسط دو مگنت متحرک *Nd-Fe-B* بر پلاسمای القائیده لیزری نمونه‌ی مس مطالعه و بررسی شده‌است. نتایج حاصل بهبود شدت خطوط طیفی (اتمی و یونی) پلاسمای شکل گرفته را با افزایش شدت میدان مغناطیسی خارجی اعمال شده نشان می‌دهد. محصورشدگی فضایی پلاسما که در اثر اعمال میدان مغناطیسی اتفاق می‌افتد، چگالی الکترونی و دمای پلاسما را به نحو چشمگیری افزایش می‌دهد.

کلید واژه- پلاسمای القائیده‌ی لیزری، میدان مغناطیسی، نمونه‌ی مس، محصورشدگی

Effect of magnetic field on parameters of laser Induced Plasma copper sample

(Robabeh Babaei), Mahsa Ghezelbash, Seyyed Mohammad Reza Darbani Abdoallah Eslami Majd and Ali Ghasemi

Department of Optics & Laser Science, Technology Research Center, Malek Ashtar University of Technology, Esfahan

School of Materials Engineering and Energy, Malek Ashtar University of Technology, Esfahan

Abstract- In this research, the effect of different magnetic fields (0.74 -1.12 T) generated by two movable Nd-Fe-B magnets has been studied on Laser Induced Plasma copper sample. The result shows an improvement in the intensity of plasma spectral lines (atomic and ionic) by increasing the intensity of external magnetic field. The plasma spatial confinement, which occurs by applying an external magnetic field, significantly increased electron density and plasma temperature.

Keywords: Laser Induced plasma, Magnetic field, copper sample, confinement

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

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

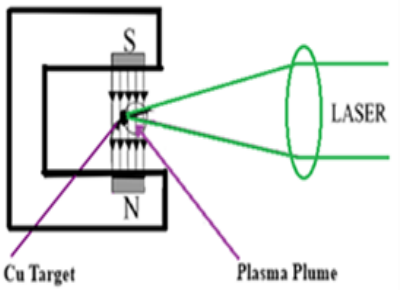
۱- مقدمه

بیناب‌نمایی فروشکست القایی لیزری (LIBS)[۱] یک ابزار تشخیصی قدرتمند جهت آنالیز عنصری مواد می‌باشد که اصول عملکردی آن بر مبنای بیناب‌نمایی خطوط اتمی و یونی تابش ناشی از پلاسمای القائیده‌ی نمونه استوار است. توانایی آنالیز همزمان چند عنصری، سریع و آنی بودن پاسخ از قابلیت‌های منحصر بفرد این روش بوده که باعث توسعه کاربرد آن در سال‌های اخیر شده‌است. به دلیل وجود اتم‌ها، یون‌ها و الکترون‌های آزاد در پلاسمای تولیدشده و اثرات متقابل هر یک بر دیگری، تابش ایجاد شده از دو بخش عمده‌ی تابش پیوستار (نوفه) و تابش خط (سیگنال) تشکیل شده‌است. روش‌های متنوعی نظیر TRLIBS[۲]، SRLIBS[۳]، تغییر دمای نمونه، استفاده از گاز محیطی و...برای افزایش نسبت سیگنال به نوفه‌ی پیوستار زمینه SNR[۴] پیشنهاد شده‌است.

اعمال میدان مغناطیسی خارجی بر پلاسمای القائیده‌ی لیزری یکی دیگر از این روش‌ها می‌باشد. از آنجایی که اعمال میدان مغناطیسی خارجی مشخصه‌های دینامیکی و سینیتیکی پلاسمای حاصل را تغییر می‌دهد، می‌توان از آن برای کنترل خواص دینامیکی پلاسمای زود گذر و پر انرژی استفاده نمود[۱]. در این پژوهش تأثیر اعمال میدان مغناطیسی خارجی بر تغییر پارامترهای عملکردی پلاسما نظیر دما و چگالی الکترونی و همچنین تحولات فضایی گسترش پلاسما و چگونگی محدود شدن آن در اثر اعمال میدان بررسی و تحلیل شده‌است.

مواد و روش

در این پژوهش از دو قطعه آلیاژ مغناطیده Nd-Fe-B جهت تولید میدان مغناطیسی استفاده شد. از آنجا که تغییر فاصله ی بین دو قطعه مغناطیده سبب تغییر شدت میدان مغناطیسی ایجادشده می‌شود، ریل متحرکی با قابلیت تغییر دادن فاصله‌ی بین مگنت‌ها، طراحی و ساخته شد. با استفاده از امکان جابجایی ایجاد شده میدان‌های مغناطیسی با شدت‌های متنوع ۱,۱۲، ۰,۹۸، ۰,۸۶ و ۰,۷۴ تسلا تولید شد. طرحواره‌ی این ریل متحرک در شکل ۱ نشان داده شده‌است. از هارمونیک اصلی لیزر Nd:YAG-Q-سویچ با پهنای پالس ۲۵ns، انرژی ۱۸۸ mJ و نرخ تکرار ۱ Hz جهت تولید پلاسمای القائیده‌ی لیزری نمونه مس (با در صد خلوص ۹۹%) استفاده شده‌است. آشکارساز بکار رفته در این چیدمان دوربین ICCD مدل DH 334T ساخت کمپانی Andor جفت شده با اسپکتروگراف مشل (ME5000) با توان تفکیک ۰,۰۱ nm در محدوده‌ی طیفی ۱۰۳۰nm-۲۰۰ می‌باشد. داده برداری با اعمال زمان تأخیر ۲ µs و پنجره‌ی زمانی نورگیری ۵ µs ثبت شده‌است. به منظور افزایش دقت نتایج و همچنین کاهش خطای ناشی از وجود اثر ماتریکس اندازه‌گیری‌ها ۷ بار تکرار و از میانگین داده‌ها برای تحلیل نتایج استفاده شده‌است.



شکل۱: طرحواره ریل متحرک طراحی‌شده به‌منظور جابجایی مگنت‌ها

تئوری

الف- پارامترهای پلاسما

دما و چگالی از مهمترین پارامترهای پلاسمای القائیده‌ی لیزری به شمار می‌روند. در این پژوهش تغییرات دما و چگالی پلاسمای القائیده‌ی لیزری نمونه‌ی مس در حضور و عدم حضور میدان‌های مغناطیسی متنوع بررسی شده‌است. مطابق رابطه‌ی (۱)، جمعیت ترازهای برانگیخته با فرض

[۱] Laser Induced Breakdown Spectroscopy

[۲] Time Resolved Laser Induced Breakdown Spectroscopy

[۳] Space Resolved Laser Induced Breakdown Spectroscopy

[۴] Signal to Noise Ratio

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

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

برقراری شرط تعادل ترمودینامیکی موضعی[۵](LTE) از تابع توزیع بولتزمن پیروی می‌کنند.

$$Ln\left(\frac{I_{mn}\lambda_{mn}}{A_{mn}g_m}\right)=\frac{E_m}{kT_e}+Ln\frac{N(T)}{U(T)} \qquad (۱)$$

که I_{mn}، λ_{mn} و A_{mn} به ترتیب شدت گذار، طول موج گذار و احتمال گذار را نشان می‌دهند. g_m، E_m، T_e، k و U(T) و N(T) نیز به ترتیب تبهگنی ترازها، انرژی تراز بالاتر، دمای الکترونی، ثابت بولتزمن، تابع پارش و چگالی الکترونی می‌باشند. با ترسیم کمیت سمت چپ معادله‌ی فوق برحسب E_m و محاسبه‌ی شیب آن می‌توان دمای الکترونی را محاسبه کرد. همچنین برای محاسبه‌ی چگالی الکترونی از پهن‌شدگی اشتارک خطوط طیفی که پهن‌شدگی غالب در پلاسمای القائیده‌ی لیزری است، استفاده شده‌است. مطابق شرط مک رایتر[۶] برای اتم‌های غیر هیدروژن گونه اثر مرتبه دوم اشتارک به شکل رابطه‌ی زیر حاکم است[۲]:

$$\Delta\lambda_{FWHM}=2\omega\left(\frac{n_e}{10^{+16}}\right)+3.5A\omega\left(\frac{n_e}{10^{+16}}\right)^{\frac{5}{4}}\left(1-bN_D^{\frac{-1}{3}}\right) \qquad (۲)$$

در این رابطه $\Delta\lambda_{FWHM}$ نیم‌پهنای نیم بیشینه برحسب nm، ω پارامتر برخورد الکترونی برحسب A^0، n_e چگالی الکترونی برحسب cm^{-3}، A پهن‌شدگی مربوط به یون‌ها، B ضریب خطوط یونی و $N_D^{\frac{-1}{3}}$ تعداد ذرات در کره‌ی دبای برحسب cm^{-3} می‌باشد. بخش دوم کمیت سمت چپ مربوط به یون‌ها می‌باشد که می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. با استفاده از رابطه‌ی (۲) و محاسبه‌ی نیم پهنای نیم بیشینه (FWHM)[۷] برای خطوط طیفی مس می‌توان چگالی الکترونی پلاسما را محاسبه نمود.

ب- محدودیت گسترش فضایی پلاسما در اثر برهمکنش با میدان مغناطیسی خارجی

یون‌ها و الکترون‌های موجود در پلاسمای القائیده‌ی لیزری با مولفه‌های میدان مغناطیسی خارجی بواسطه‌ی نیروی لورنتس برهم کنش می‌کنند. با توجه به رسانا بودن محیط پلاسما، در اثر اعمال میدان مغناطیسی مطابق با قانون لنز جریان داخلی دیامغناطیس برای مقابله با نفوذ میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود. این جریان داخلی با میدان مغناطیسی خارجی برهمکنش کرده و شتاب گرفتن ذرات باردار پلاسما را ناشی می‌شود. چگالی الکترونی القایی از رابطه‌ی ذیل محاسبه می‌شود.

$$E+(V\times B)=\frac{J}{\sigma_n}+\frac{J\times B}{n_e e} \qquad (۳)$$

شتاب اعمال شده به ذرات باعث تولید تابش می‌شود. در نتیجه با اعمال میدان مغناطیسی خارجی می‌توان تابش پلاسما و بالطبع آن نسبت SNR را بهینه کرد[۳]. با اعمال میدان مغناطیسی پلاسما از حیث گسترش فضایی محدود می‌شود. شعاع پلاسمای القایی محصور شده از رابطه‌ی (۴) محاسبه می‌شود[۴]:

$$R_b=\left(\frac{3E_k\mu_0}{2\pi B_0^2}\right)^{1/3} \qquad (۴)$$

E_k، μ_0 و B_0 به ترتیب انرژی جنبشی پلاسما، ضریب تراوایی خلأ و شدت میدان مغناطیسی می‌باشند.

تحلیل نتایج

[۵] Local Thermodynamic Equilibrium

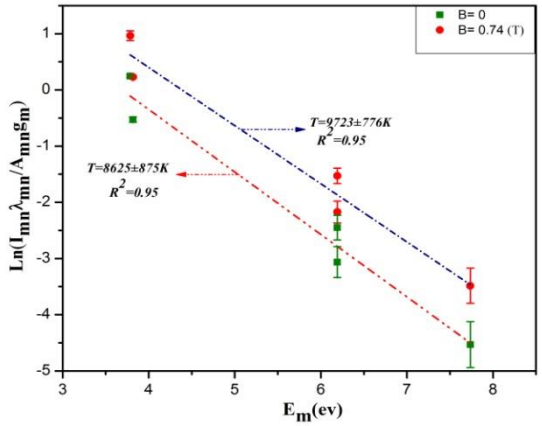
[۶] Mack Writer

[۷] Full Width at Half Maximum

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

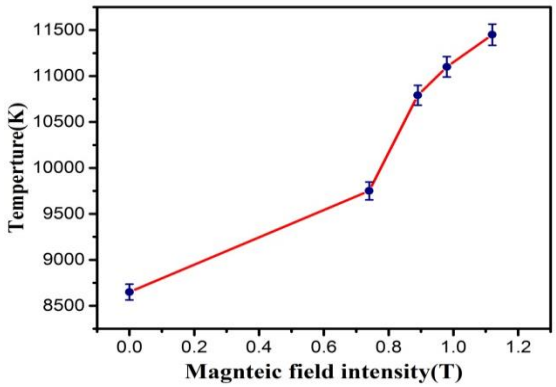
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

تغییرات منحنی بولتزمن مربوط به خطوط طیفی مس در حضور میدان مغناطیسی (B=0.74 T) ودر عدم حضور میدان مغناطیسی (B=0) در شکل ۲ نشان داده‌است.



شکل ۲: منحنی بولتزمن مربوط به خطوط Cu1 در حضور وعدم حضور میدان مغناطیسی

دمای الکترونی محاسبه شده در میدان‌های مغناطیسی مختلف در شکل ۳ آورده شده است.

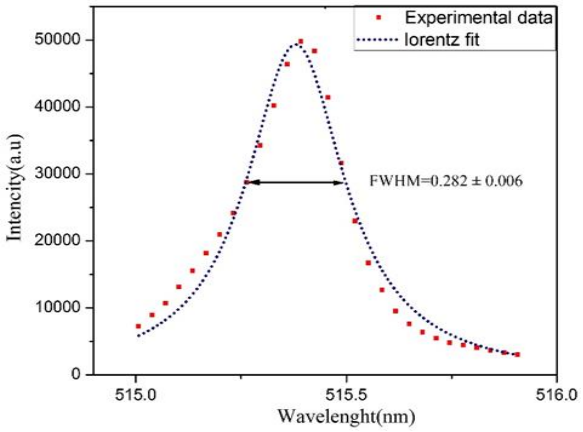


شکل ۳: تغییرات دمای الکترونی پلاسما درحضور میدان‌های مغناطیسی مختلف

برای محاسبه‌ی چگالی الکترونی پلاسما با توجه به رابطه‌ی (۲) می‌بایست مقدار کمیت $\Delta\lambda_{FWHM}$ برای طول موج‌های طیفی اتم مس محاسبه گردد، کمیت فوق از رابطه‌ی (۵) محاسبه می‌شود:

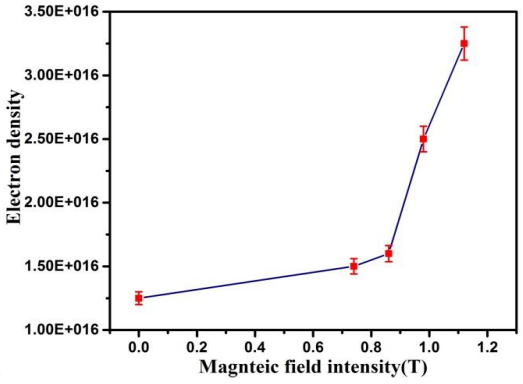
$$\Delta\lambda_{FWHM} = \Delta\lambda_{observed} - \Delta\lambda_{insrtument} \quad (۵)$$

با محاسبه‌ی جداگانه‌ی $\Delta\lambda_{observed}$ که همان پهن شدگی اشتارک برای خطوط طیفی اتم مس می‌باشد و در نظر گرفتن $\Delta\lambda_{instrument} = 0.02$ چگالی الکترونی پلاسما محاسبه گردید. مطابق شکل ۴ پهن شدگی اشتارک خط اتمی ۵۱۵٫۵۵ مربوط به اتم مس به میزان ۰٫۲۸۲±۰٫۰۰۶ محاسبه شده‌است.



شکل۴ : نمودار پهن‌شدگی اشتارگ خط اتمی ۵۱۵٫۵۵ مس

در ادامه تغییرات چگالی الکترونی پلاسما در حضور میدان-های مغناطیسی با شدت‌های مختلف در شکل ۵ نشان داده‌شده است.



شکل

۵: تغییرات چگالی الکترونی پلاسما برحسب میدان مغناطیسی خارجی

مطابق با رابطه‌ی ۴ انتظار می‌رود در اثر برهم کنش میدان معناطیسی با توده‌ی پلاسما شعاع گسترش آن کاهش یابد و پلاسما محصور شود و به دنبال آن دمای پلاسمای و چگالی الکترونی افزایش یابد. همانطور که در شکل های ۳ و ۵ مشاهده می‌شود، نتایج تجربی با آنچه از لحاظ نظری مورد انتظار است همخوانی خوبی دارد.

نتیجه گیری

با اعمال میدان مغناطیسی خارجی و محصور شدن توده‌ی پلاسما در اثر بر همکنش با مولفه‌های میدان مغناطیسی شدت تابش پلاسمای القائیده‌ی لیزری افزایش یافت. مطابق با روابط نظری انتظار می‌رود با افزایش شدت میدان مغناطیسی خارجی گسترش فضایی پلاسما محدودتر شود و شعاع گسترش آن نیز کاهش یابد و متعاقب آن آن چگالی الکترونی و دمای پلاسما به طور محسوسی افزایش پیدا کند. نتایج نشان داد که با افزایش شدت میدان مغناطیسی

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

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

خارجی به دلیل محدودتر شدن گسترش فضایی پلاسما و کاهش شعاع گسترش آن، چگالی الکترونی و متعاقب آن دمای پلاسما افزایش پیدا می‌کند.

منابع

[1] R. E. Russo and X. L.Mao, "Chemical analysis by laser ablation", Academic press, CA, USA, 1998.

[2] A. Arshad, S. Bashir, A. Hayat, M. Akram, Q. S. Ahmad "Effect of magnetic field on laser induced breakdown spectroscopy of graphite plasma", Appl. Phys.**B 122,** 63, 2016..

[۳] ربابه بابایی، مهسا قزلباش، سید محمدرضا دربانی، عبدالله اسلامی مجد، تاثیر اعمال میدان مغناطیسی بر بهبود نسبت سیگنال به نوفه‌ی پیوستار تابشی پلاسمای القاییده‌ی نمونه‌ی مس، چهارمین کنفرانس لیزر و کاربردهای آن (۱۳۹۵).

[4] R. Hai, P. Lio, D. Wu, Q. Xiao, L. Sun, H. Ding, " Effect of study magnetic field on Laser Induced Breakdown ", J. Nucl. Mater. **463**, pp **.** 927 – 930, 2015.

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

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