



بیست و هفتمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و سیزدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.
۱۴-۱۶ بهمن ۱۳۹۹



کد مقاله : ۱-۲۵۵۶-۱۰-A

مطالعه تجربی اثر میدان الکتریکی بر آهنگ ماده برداری از فلز قلع در محیط اتانول

دانیال قره بیگلو، محمد حسین مهدیه

دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، نارمک، تهران، ایران

چکیده-هدف اصلی این کار پژوهشی، بررسی تأثیر میدان الکتریکی بر روی آهنگ ماده برداری لیزری از فلزات در محیط مایع است. بدین منظور، ماده برداری از فلز قلع (۹۹/۹ درصد) در محیط اتانول (۹۶ درصد) با استفاده از تابش دهی لیزر پالسی نئودیمیاگ با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر، طول پالس ۱۰ نانوثانیه و نرخ تکرار پالس ۱۰ هرتز در غیاب و حضور میدان الکتریکی انجام شد. تأثیر میدان الکتریکی بر آهنگ ماده برداری لیزری و مشخصات حفره در حالت اعمال میدان الکتریکی عمود بر راستای پرتو لیزر مورد بررسی قرار گرفته است. جهت بررسی آهنگ ماده برداری لیزری، پس از انجام فرآیند ماده برداری تحت شرایط آزمایشی متفاوت، اطلاعات حفره‌های (عمق و قطر) ایجاد شده بر روی سطح هدف فلز مورد استفاده قرار گرفت. نتایج این پژوهش بیانگر آن است که، آهنگ ماده برداری در حضور میدان الکتریکی به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا می‌کند.

کلید واژه- آهنگ ماده برداری، اتانول، قلع، ماده برداری لیزری، میدان الکتریکی خارجی.

Experimental Study of the Effect of External Electric Field on the Ablation Rate of Tin Metal in Ethanol Environment

Gharah BiglooDanial, Mahdieh Mohammad Hossein

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

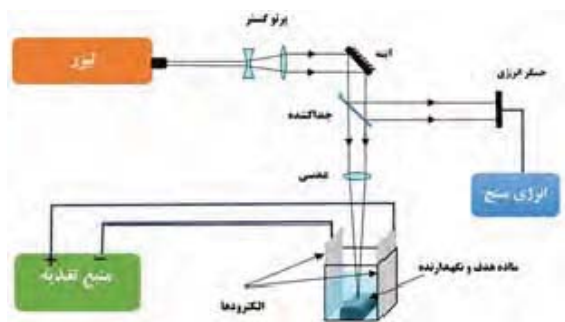
Abstract- In the present work, the effect of external DC electric field on the ablation rate during nanosecond pulsed laser ablation of Tin in ethanol was studied. In this study, the target (Tin 99.9%), was irradiated by 500 pulses of Nd:YAG laser beam with pulse duration of 10 ns and 10Hz repetition rate. The irradiation was performed in the presence and absence of external DC electric field. The effect of electric field strength on the material removal rate was investigated for the condition in which the electric field was perpendicular to the laser beam path. The craters formed on the target surface were characterized by using optical microscopy and image processing technique. The results indicated that pulsed laser ablation in the presence of an electric field significantly leads to higher material removal rate.

Keywords: Ablation Rate, Electric Field, Ethanol, Pulsed Laser Ablation, Tin.

لیزری از هدف فلزی (قلع) در محیط اتانول در حضور و غیاب میدان الکتریکی خارجی عمود بر راستای تابش، مورد بررسی قرار گرفته است.

فعالیت‌های تجربی و آزمایش‌های انجام شده

در این آزمایش از فلز قلع با خلوص ۹۹/۹٪ به عنوان ماده‌ی هدف، مورد تابش دهی قرار گرفت. در تمامی آزمایش‌ها از ورقه‌ی قلع با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر با ابعاد $1/5 \times 4 \text{ cm}^2$ استفاده شد. به منظور تولید حفره‌های حاصل از برهمکنش لیزر با سطح ماده‌ی هدف، در این آزمایش از لیزر نئودیموم یاگ با طول پالس ۱۰ نانوثانیه استفاده شد. طول موج و نرخ تکرار پالس بکار رفته در این آزمایش، به ترتیب ۱۰ هرتز و ۱۰۶۴ نانومتر (طول موج اصلی) می‌باشد. برای ماده‌برداری از فلز قلع در محیط اتانول، درون سلول تا ارتفاع ۱۰ میلی‌متری از بالای سطح هدف (۹ میلی‌لیتر) با اتانول پر شد.

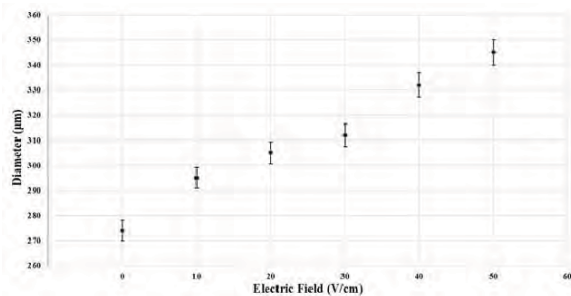


شکل ۱: طرحواره‌ی از چیدمان آزمایش.

قطر لکه لیزر بر روی سطح ماده‌ی هدف حدود ۱۵۰ میکرومتر بوده و فرایند ماده‌برداری لیزری از هدف قلع با شار انرژی پالس 60 J/cm^2 و تابش دهی ۵۰۰ پالس صورت گرفت. برای ماده‌برداری در حضور میدان الکتریکی، به دو سر الکترودها اختلاف پتانسیل الکتریکی اعمال شد. ماده‌برداری لیزری در غیاب میدان الکتریکی خارجی و با حضور میدان‌های الکتریکی مختلف (۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰) در شرایط کاملاً یکسان برای چندین حفره تکرار

مقدمه

ماده‌برداری لیزری (یا کند و سوز لیزری) به طور ساده به فرایند برداشت مواد از روی سطح هدف به وسیله تابش پرتو لیزر گفته می‌شود [۱]. ماده‌برداری لیزری در محیط‌های خلأ، گاز و مایع می‌تواند صورت پذیرد مشروط بر اینکه آن محیط (گاز یا مایع)، شدت (شار انرژی) پرتو لیزر را به مقدار قابل توجهی تضعیف نکند و اندازه‌ی شدت پرتو رسیده به سطح هدف برای ماده‌برداری کافی باشد [۲، ۳]. در برخی از کاربردهای ماده‌برداری لیزری (نظیر تولید نانو ذرات)، میزان آهنگ ماده‌برداری یا به عبارتی مقدار ماده‌ی برداشته شده از روی سطح بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در واقع، یکی از زمینه‌های تحقیقاتی پر طرفدار در حوزه‌ی ماده‌برداری لیزری، یافتن روش‌هایی برای افزایش و کنترل آهنگ ماده‌برداری است. تحقیقات اخیر روش‌های گوناگونی را برای افزایش آهنگ ماده‌برداری پیشنهاد می‌کنند [۱، ۳]. همچنین تحقیقات نشان داده است، استفاده از محیط مایع در ماده‌برداری لیزری باعث افزایش آهنگ ماده‌برداری از روی سطح هدف و ایجاد حفره‌هایی با عمق و قطر بیشتر می‌شود [۴]. با این حال، تاکنون تحقیقات بسیار کمی در رابطه با امکان استفاده از میدان‌های خارجی (الکتریکی، مغناطیسی و دمایی) در آزمایش ماده‌برداری لیزری برای افزایش آهنگ ماده‌برداری گزارش شده است [۵]. در سال‌های اخیر تحقیقات صورت گرفته نشان داده است، استفاده از میدان الکتریکی خارجی در فرایند ماده‌برداری لیزری می‌تواند به عنوان یک پارامتر تأثیرگذار در افزایش آهنگ ماده‌برداری لیزری مطرح باشد [۵-۷]. در این تحقیقات از فلز آلومینیوم در محیط‌های آب و اتانول و فلز مس در محیط آب استفاده شده بود. هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر میدان الکتریکی خارجی بر فرایند ماده‌برداری لیزری و آهنگ ماده‌برداری می‌باشد. بدین منظور ماده‌برداری



شکل ۳: نمودار اندازه‌ی قطر حفره‌ها بر حسب شدت میدان الکتریکی خارجی (حدود ۲٪ خطا).

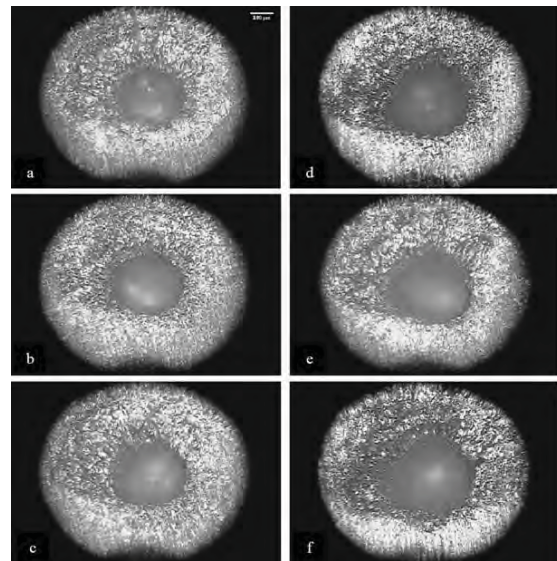
نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که با افزایش شدت میدان الکتریکی، قطر حفره‌های ایجاد شده بر روی هدف افزایش می‌یابد. به طور مثال، قطر دهانه‌ی حفره طی ماده‌برداری در غیاب میدان الکتریکی حدود ۲۷۵ میکرومتر و در حضور بیشینه شدت میدان الکتریکی اعمال شده در این آزمایش قطر دهانه‌ی حفره حدود ۳۴۵ میکرومتر اندازه‌گیری شد که بیانگر افزایش ۷۰ میکرومتری در اندازه‌ی قطر دهانه‌ی حفره می‌باشد. انتقال انرژی به سطح هدف در ماده‌برداری لیزری به دو روش انتقال مستقیم انرژی پرتو به هدف و انتقال انرژی از طریق توده پلاسما صورت می‌پذیرد. اعمال میدان الکتریکی خارجی عمود بر راستای تابش می‌تواند باعث تغییر در توزیع فضایی (پهن شدگی) توده پلاسما در بالای سطح هدف شود. این پدیده به نوبه‌ی خود در مقایسه با حالت تابش‌دهی بدون میدان الکتریکی می‌تواند باعث شود ناحیه‌ی بیشتری از سطح هدف در معرض انرژی گرمایی پلاسما قرار گیرد [۷، ۸]. در نتیجه، این امر می‌تواند باعث افزایش قطر حفره‌ها با افزایش شدت میدان الکتریکی خارجی گردد.

عمق حفره‌ها به وسیله‌ی میکروسکوپ نوری در مقایسه با سطح هدف اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های عمق حفره‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است.

شد. طرحواره کلی از چیدمان آزمایش در شکل ۱ آمده است.

نتایج آزمایش و تفسیر آن‌ها

تصاویری از حفره‌های ایجاد شده بر روی هدف قلع در میدان‌های الکتریکی مختلف (۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ V/cm) و شرایط تابش‌دهی کاملاً یکسان در شکل ۲ نشان داده شده است. باید اشاره کرد که میدان الکتریکی ۱۰ V/cm به معنای تابش‌دهی ماده در غیاب میدان الکتریکی است.

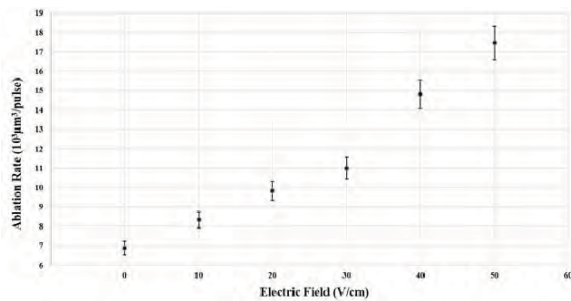


شکل ۲: حفره‌های ایجاد شده بر روی هدف قلع در محیط اتانول در طی تابش‌دهی ۵۰۰ پالس در میدان‌های الکتریکی: (a) ۰ V/cm، (b) ۲۰ V/cm، (c) ۳۰ V/cm، (d) ۴۰ V/cm، (e) ۴۰ V/cm، (f) ۵۰ V/cm.

قطر دهانه‌ی حفره‌های ایجاد شده با بررسی تصاویر حاصل از میکروسکوپ نوری به وسیله‌ی نرم افزار Image J اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از این اندازه‌گیری در شکل ۳ آمده است.

انرژی پرتو مستقیماً به سطح هدف می‌رسد، که باعث افزایش عمق حفره و ماده‌برداری می‌شود.

برای بررسی کمی تغییرات آهنگ ماده‌برداری در این آزمایش، شکل حفره‌ها بر روی سطح هدف به صورت مخروطی در نظر گرفته شد [۱۰] و آهنگ ماده‌برداری به صورت مقدار متوسط حجم ماده‌ی کنده شده در طی هر پالس لیزر محاسبه شد. نتایج حاصل در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش میدان الکتریکی خارجی میزان آهنگ ماده‌برداری به طور چشمگیری افزایش می‌یابد.

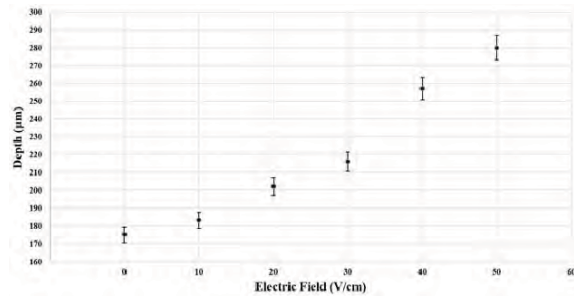


شکل ۵: نمودار آهنگ ماده‌برداری بر حسب شدت میدان الکتریکی خارجی (حدود ۵٪ خطا).

در واقع می‌توان چنین برداشت کرد که میدان الکتریکی خارجی عمود بر راستای تابش با تغییر در توزیع فضایی توده پلاسما در بالای سطح هدف، باعث افزایش قطر و از طرفی با تغییر در توزیع بارهای توده پلاسما، سبب رسیدن انرژی بیشتری از پالس لیزر و افزایش عمق حفره‌ها می‌شود. در نتیجه، برآیند حاصل از تأثیرات میدان الکتریکی خارجی بر فرآیند ماده‌برداری لیزری سبب افزایش در میزان آهنگ ماده‌برداری می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر میدان الکتریکی (عمود بر راستای پرتوی فرودی) بر آهنگ ماده‌برداری و مشخصات حفره‌ی ایجاد شده بر روی هدف قلع در محیط اتانول (با ارتفاع



شکل ۴: نمودار اندازه‌ی عمق حفره‌ها بر حسب شدت میدان الکتریکی خارجی (حدود ۳٪ خطا).

همانطور که از نتایج آزمایش ملاحظه می‌شود، با افزایش شدت میدان الکتریکی عمق حفره‌ها افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۴، قطر حفره‌ها با اعمال بیشینه شدت میدان الکتریکی خارجی از حدود ۱۷۵ میکرومتر با افزایش تقریبی ۱۰۰ میکرومتری، تقریباً به ۲۸۰ میکرومتر می‌رسد. علت افزایش عمق حفره‌ها را می‌توان در فرآیند جذب مستقیم پرتو لیزر توسط ماده‌ی هدف بررسی کرد. در ماده‌برداری با لیزر پالسی نانو ثانیه، کمی پس از برخورد پالس لیزر با هدف، توده پلاسمایی در بالای سطح هدف ایجاد می‌شود. با ایجاد توده‌ی پلاسما در بالای سطح هدف پرتو لیزر برای رسیدن به هدف ابتدا باید از محیط پلاسمایی عبور کند. در حین انتشار پرتو لیزر در توده‌ی پلاسما بخشی از انرژی پرتو توسط توده پلاسما جذب می‌شود [۹]. در نتیجه بخش بزرگی از طول پالس برای رسیدن به هدف از محیط پلاسمایی عبور می‌کند. با توجه به جهت میدان الکتریکی در این آزمایش می‌توان چنین استدلال کرد که حضور میدان الکتریکی سبب جدایش بارهای الکتریکی (یون‌ها و الکترون‌ها) موجود در توده پلاسما می‌شود. این تغییر در توزیع ذرات باردار توده پلاسما در حضور میدان الکتریکی، کاهش اثر حفاظ پلاسمایی را در پی دارد. به عبارتی دیگر، پرتو لیزر، انرژی کمتری را در برهمکنش با توده پلاسمای ایجاد شده در بالای سطح هدف از دست می‌دهد و درصد بیشتری از

and Applications. 2013: Springer Berlin Heidelberg.

- [10] Mahdih MH, Nikbakht M, Moghadam ZE, Sobhani M. *Crater geometry characterization of Al targets irradiated by single pulse and pulse trains of Nd: YAG laser in ambient air and water*. Applied Surface Science. 2010 Jan 1;256(6):1778

۱۰ میلی‌متر بالای سطح هدف) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این بررسی بیانگر این است که با افزایش شدت میدان الکتریکی خارجی، آهنگ ماده‌برداری به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد و در بیشینه میدان الکتریکی (۵۰ V/cm)، آهنگ ماده برداری تا بیش از ۲/۵ برابر نسبت به حالت بدون اعمال میدان الکتریکی افزایش می‌یابد.

مرجع‌ها

- [1] Black, S.E., *Laser Ablation: Effects and Applications*. 2011: Nova Science Publishers...
- [2] Singh, R. and R. Soni, *Laser-induced heating synthesis of hybrid nanoparticles*, in *Noble Metal-Metal Oxide Hybrid Nanoparticles*. 2019, Elsevier. p. 195-238.
- [3] Yang, G., *Laser ablation in liquids: principles and applications in the preparation of nanomaterials*. 2012: CRC Press M. Lundstrom, *Fundamentals of Carrier Transport*, p. 44, Cambridge University Press, 2000.
- [4] Zhu, S., et al., *Laser ablation of solid substrates in water and ambient air*. Journal of Applied Physics, 2001. **89**(4): p. 2400-2403.
- [5] Mozaffari, H. and M.H. Mahdih, *Enhancement of ablation rate and production of colloidal nanoparticles by irradiation of metals with nanosecond pulsed laser in presence of external electric field*. Physics Letters A, 2019. **383**(7): p. 646-654.
- [6] Mahdih, M.H. and H. Mozaffari, *Characteristics of colloidal aluminum nanoparticles prepared by nanosecond pulsed laser ablation in deionized water in presence of parallel external electric field*. Physics Letters A, 2017. **381**(38): p. 3314-3323
- [7] Mozaffari, H. and M.H. Mahdih, *Synthesis of colloidal aluminum nanoparticles by nanosecond pulsed laser and the effect of external electric field and laser fluence on ablation rate*. Optics & Laser Technology, 2020. **126**: p. 106083
- [8] Mościcki, T., J. Hoffman, and Z. Szymański, *Modelling of plasma formation during nanosecond laser ablation*. Archives of Mechanics, 2011. **63**(2): p. 99-116
- [9] Allmen, M. and A. Blatter, *Laser-Beam Interactions with Materials: Physical Principles*