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

مدل سازی کندوسوز حرارتی با لیزر موج پیوسته در لیتوگرافی جاروب لیزری بر لایه نازک مس

امید چوپانیان [۱،۲و۳] و خسرو معدنی‌پور [۱و۲*]

[۱] پژوهشکده اپتیک، لیزر و فوتونیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران) ، خیابان حافظ ، تهران
[۲] آزمایشگاه اندازه‌گیری اپتیکی دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران) ، خیابان حافظ ، تهران
[۳] دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران) ، خیابان حافظ ، تهران

چکیده – پدیده کندوسوز در فرآیند برهم‌کنش لیزر با ماده، معمولا با لیزرهای پالسی روی می‌دهد. در مورد لیزرهای پیوسته وقتی شدت فرودی به اندازه کافی زیاد باشد نیز فرآیند کندوسوز حرارتی روی می‌دهد که منجر به تبخیر یا تصعید ماده خواهد شد. در این کار از یک لیزر پیوسته برای فرآیند تولید ماسک براساس لیتوگرافی جاروب لیزری استفاده شده است. مدلی برای استفاده از یک لیزر پیوسته در فرآیند کندوسوز ارائه شده است که در آن با توجه به ماهیت جاروبی لیتوگرافی، شار انرژی رسیده به هر نقطه به صورت پالس زمانی در نظر گرفته شده است. انرژی پالس لیزری با داشتن توان، اندازه لکه و سرعت جاروب نمونه تحت تابش، بدست می‌آید. سپس کندوسوز در بستر لایه نازک مس با این مدل شبیه سازی شده و تأثیر انرژی پالس لیزری بر این کندوسوز مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین با رسم منحنی داده های بدست آمده از این مدل‌سازی، انرژی پالس آستانه کندوسوز لیزری برای لایه نازک مس با ضخامت ۱۵۰ نانومتر محاسبه شده است.

کلید واژه- کندوسوز حرارتی، لیتوگرافی جاروب لیزری، لایه نازک مس.

Modeling of CW Laser Thermal Ablation in Laser Scanning Lithography on Copper Thin-Film

O.Choupanian[1,2,3] and K.Madanipour [1,2*]

[1] Optics, Laser & Photonics Research Institute, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic)
[2] Optical Measurement Laboratory, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic)
[3] Department of Energy Engineering and Physics, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic)
(*Corresponding author. E-mail address: madanipour@aut.ac.ir)

Abstract- Ablation phenomena in the process of laser interaction with matter, usually occurs with pulsed lasers. In the case of cw lasers when incident intensity is high enough the thermal ablation process occurs will lead to evaporation or sublimation of matter. In this work, a cw laser for fabrication of mask process based on laser scanning lithography was used. a model for using the cw laser in ablation process has been presented in which due to the scanning nature of lithography, the energy flux received by each point has been intended as a time pulse. The laser pulse energy obtained with the power, spot size and the scanning speed of the sample exposed to radiation. in the following, laser ablation of copper thin-film was simulated and the effect of laser pulse energy ablation has been investigated. Also by curve fitting the data obtained from this modeling, threshold pulse energy of ablation for copper thin-film with a thickness of 150nm has been calculated.

Keywords: Thermal Ablation, Laser Scanning Lithography, Copper Thin-Film.

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

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

۱- مقدمه

لیتوگرافی رایج ترین روش ساخت موجبرهای نوری و مدارهای مجتمع نیمرساناها است. متداول‌ترین روش لیتوگرافی، لیتوگرافی اپتیکی است که در آن بوسیله یک سامانه اپتیکی و با استفاده از یک ماسک، الگوی مورد نظر روی فوتورزیست (پلیمر حساس به نور) ایجاد می‌گردد[۱]. ساخت ماسک لیتوگرافی به روش تحریر مستقیم لیزری با توجه به طیف جذبی مواد در طول موج‌های مختلف روشی ساده و کارآمد و جایگزین مناسبی برای دیگر فرآیندهای ایجاد ماسک از جمله لیتوگرافی الکترونی است[۲]. در برهم‌کنش لیزر با ماده دو فرآیند فوتوگرمایی و فوتوشیمیایی اتفاق می‌افتد[۳]. در فرآیند فوتوشیمیایی که بیشتر در پلیمرها روی می‌دهد، جذب فوتون باعث شکسته شدن پیوندهای شیمیایی شده و خواص پلیمر را تحت تأثیر قرار می‌دهد و در فرآیند فوتوگرمایی که بیشتر در فلزات نمود پیدا می‌کند، اثرات حرارتی برهم‌کنش لیزر با ماده را کنترل می‌کنند.

در این کار مدلی برای استفاده از لیزر پیوسته در کندوسوز لیزری حرارتی ارائه شده است که با توجه به ماهیت جاروبی فرآیند لیتوگرافی مورد استفاده، شار انرژی رسیده به هر نقطه مشابه یک پالس زمانی است و می توان عملکرد این لیزر پیوسته را همانند یک لیزری پالسی در نظر گرفت. همچنین عوامل موثر بر انرژی و شکل پالس مدل‌سازی شده و کندوسوز حاصل از آن مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مبانی نظری

کندوسوز لیزری به عوامل مختلفی نظیر طول موج، شار انرژی، نرخ تکرار، انرژی پالس و پهنای زمانی پالس در لیزر و جذب و نفوذ گرمایی در ماده بستگی دارد. در میان پارامترهای مختلف، مهم‌ترین پارامتر جذب می‌باشد که به طول موج بسیار وابسته است. دیگر فرآیند مهم که هنگام تبخیر از سطح ماده در فرآیند کندوسوز روی می‌دهد، یونیزه شدن بخار حاصل از کندوسوز به وسیله باریکه لیزر است. این بخار یونیزه شده بلافاصله فرم پلاسمایی به خود گرفته و با جذب انرژی باریکه لیزر، باعث کاهش کندوسوز می‌گردد [۴].

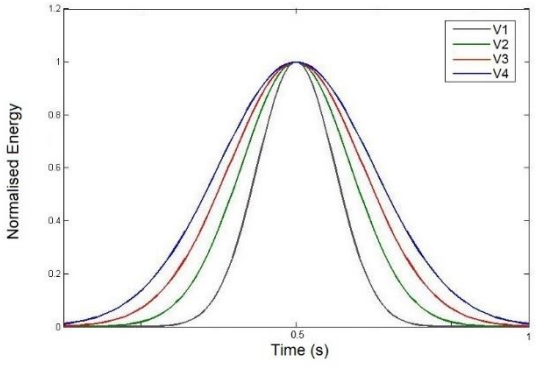
با توجه به گاوسی بودن باریکه خروجی لیزر، شار انرژی رسیده به هر نقطه به صورت پالس زمانی در نظر گرفته شده است که انرژی پالس با داشتن توان، اندازه لکه و سرعت جاروب نمونه تحت تابش، بدست می‌آید. رابطه (۱) ارتباط بین این پارامترها را که به محاسبه انرژی پالس می‌انجامد، نشان می دهد:

$$P=\frac{E}{t}=\frac{E}{d/V}\rightarrow E=\frac{Pd}{V} \qquad (۱)$$

در این رابطه، P توان لیزر، d اندازه لکه و V سرعت جاروب نمونه و E انرژی پالس معادل سازی شده است. چون باریکه خروجی لیزر گاوسی است، توزیع انرژی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$E=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\exp(-\frac{V^2t^2}{2\sigma^2(t)}) \qquad (۲)$$

در رابطه (۲)، V سرعت جاروب، t مدت زمان جاروب و $\sigma(t)$ انحراف معیار زمانی است که منحنی حاصل از آن به ازای V ثابت، باز هم یک منحنی توزیع گاوسی (انرژی برحسب زمان) خواهد بود. شکل (۱) منحنی توزیع گاوسی انرژی بر حسب زمان را به ازای سرعت های مختلف نشان‌می‌دهد. همانطور که در شکل (۱) دیده می‌شود، این تغییر سرعت، در میزان انرژی رسیده به نمونه نمایان می‌گردد که باعث تغییر در میزان کندوسوز خواهد شد.



شکل (۱) : منحنی توزیع گاوسی انرژی بر حسب زمان به ازای سرعت های مختلف

رابطه قطر حفره ایجاد شده - انرژی پالس را می‌توان با انرژی آستانه و یا شار آستانه بدست آورد که در ابتدا لازم

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

است جذب انرژی پالس توسط ماده محاسبه گردد. جذب انرژی پالس توسط ماده با انتگرال چگالی انرژی گاؤسی یا توزیع شار روی سطح بیان می‌شود [۵].

$$CEF.E_{imp}=\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}F_0 e^{-((x^2+y^2)/2\sigma^2)}dxdy=F_0 2\pi\sigma^2 \quad (۳)$$

در رابطه (۳)، E_{imp} انرژی پالس، σ پارامتر پهنای باریکه کانونی، F_0 پیک شار و CEF فاکتور بازده کوپل است که کاهش انرژی پالس قبل از جذب توسط ماده (حفاظ پلاسمایی، بازتاب و...) را مشخص می‌کند. CEF هنگامی که هیچ مقداری از باریکه لیزر توسط ماده جذب نشود، صفر است و هنگامی که به طور کامل توسط ماده جذب شود، یک است. اگر رابطه (۳) در مختصات قطبی نوشته شود، داریم:

$$F(r)=\frac{CEF.E_{imp}}{2\pi\sigma^2}\exp(-\frac{r^2}{2\sigma^2}) \quad (۴)$$

که در این رابطه r شعاع اندازه‌گیری شده در محور پیک است. اگر r برابر با شعاع حفره ایجاد شده باشد، شار باید برابر آستانه باشد. بنابراین شعاع حفره ایجاد شده باید از رابطه (۵) بدست آید:

$$d=2\sigma\sqrt{2}\left(\ln\frac{CEF.E_{imp}}{F_{th}.2\pi\sigma^2}\right)^{1/2}=2\sigma\sqrt{2}\left(\ln\frac{E_{imp}}{E_{th}}\right)^{1/2} \quad (۵)$$
$$(\text{where } E_{th}=\frac{(F_{th}.2\pi\sigma^2)}{CEF})$$

که در اینجا، d قطر حفره و F_{th} شار آستانه و E_{th} انرژی پالس آستانه با توزیع گاؤسی است. پارامتر پهنا (σ) برای باریکه کانونی شده با توزیع گاؤسی از رابطه زیر بدست می‌آید [۶]:

$$4\sigma=d_f=\frac{4M^2 f\lambda}{\pi D} \quad (۶)$$

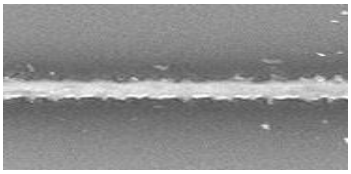
که f فاصله کانونی، λ طول موج، M^2 پارامتر کیفیت، D قطر باریکه کانونی نشده و d_f قطر باریکه کانونی شده است. مقدار D و d_f در مکانی که مقدار شدت به $1/e^2$ شدت اولیه می‌رسد، محاسبه می‌شود.

حفاظ پلاسمایی دلیل پهن شدن باریکه توسط پراکندگی و مهم ترین عامل کاهش CEF است که البته تعیین مقدار دقیق آن دشوار است. با این حال اگر رابطه (۵) بر داده‌های بدست آمده برازش داده شود برای توصیف فرآیند کندگی بسیار مناسب است. برای تعیین شار آستانه ماده، CEF باید مشخص باشد اما دانستن E_{th} و σ برای محاسبه رابطه (۵) و پیش‌گویی اندازه حفره به ازای انرژی‌های مختلف، مناسب و کافی است. همچنین می‌توان با استفاده از توزیع گاوسی انرژی به ازای یک پیک انرژی و در مقاطع مختلف عرضی، با استفاده از معیار $1/e^2$ رفتار کندوسوز در لبه‌های شیار ایجاد شده را مورد بررسی قرار داد. پیش‌بینی می‌شود که کندگی ایجاد شده نیز شکلی گاوسی داشته باشد.

در این کار با استفاده از مدل ارائه شده، تأثیر انرژی پالس لیزری بر کندوسوز لایه نازک مس براساس لیتوگرافی جاروب لیزری به منظور بهینه سازی در ساخت ماسک لیتوگرافی مورد بررسی قرار گرفته است.

۳- نتایج مدل‌سازی

در شرایط بهینه به ازای توان اپتیکی ۶۸,۳۳ میلی‌وات، سرعت جاروب ۰,۵ میلی‌متر در ثانیه، اندازه لکه ۴,۲۴ میکرومتر و انرژی پالس مدل‌سازی شده ۶۵,۶ میکروژول، شیاری با پهنای ۴,۶۳ میکرومتر در بستر لایه نازک مس با ضخامت حدود ۱۵۰ نانومتر با استفاده از لیزر دیودی پیوسته ای با طول موج ۴۰۵ نانومتر گزارش شد [۲]. شکل (۲) تصویر میکروسکوپ الکترونی شیار ایجاد شده را نشان می‌دهد.



شکل (۲) : تصویر میکروسکوپ الکترونی شیار ایجاد شده پهنای (4.63 um) به ازای انرژی پالس (65.6 uJ)

با استفاده از رابطه (۵) و نتایج حاصل از گزارش ارائه شده، انرژی پالس آستانه برابر ۵,۹۳ میکروژول محاسبه شد. انتظار می‌رود با افزایش سرعت جاروب لیزری نمونه

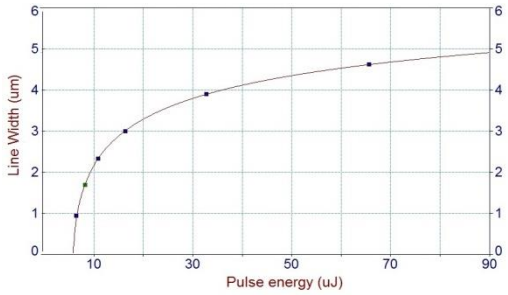
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]

و درپی کاهش انرژی پالس، امکان دستیابی به کیفیت مطلوب با بررسی رفتار کندوسوز ممکن گردد. جدول (۱) پهنای شیار محاسبه شده به ازای انرژی پالس‌های متفاوت بدست آمده از تغییر سرعت جاروب نمونه را نشان می‌دهد.

جدول (۱) : پهنای شیار محاسبه شده به ازای انرژی پالس‌های متفاوت بدست آمده از تغییر سرعت جاروب نمونه

سرعت جاروب (mm/s)	انرژی پالس (uJ)	پهنای شیار (um)
0.5	65.60	4.63
1	32.80	3.91
2	16.40	3.01
3	10.93	2.34
4	8.20	1.70
5	6.54	0.95

پیش‌بینی می‌شود نتایج بدست آمده به طور دقیق با نتایج تجربی قابل حصول مطابقت نداشته باشند که این مغایرت می‌تواند ناشی از پخش حرارتی، حفاظ پلاسمایی و در نظر نگرفتن محل واقعی کانونی شدن باریکه در رابطه (۴) باشد [۷]. با رسم منحنی داده‌های بدست‌آمده از رابطه



(۵) انرژی آستانه برابر ۶،۰۹ میکروژول و σ برابر ۱،۱۰ میکرومتر بدست آمد که سازگاری خوبی با نتایج تجربی بدست آمده دارد. شکل (۳) منحنی داده های جدول (۱) را نشان می‌دهد.

شکل (۳) : منحنی داده های بدست آمده از رابطه (۵) به ازای مس با ضخامت ۱۵۰ نانومتر(E_{th}=6.09 μJ و σ =1.10 μm)

۴- نتیجه‌گیری

در این کار با ارائه مدلی برای استفاده از یک لیزر پیوسته در فرآیند کندوسوز حرارتی و با توجه به ماهیت جاروبی لیتوگرافی لیزری، کندوسوز در بستر لایه نازک مس شبیه سازی شد و تأثیر انرژی پالس لیزری بر این کندوسوز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مدل‌سازی با استفاده از لیزری با طول موج ۴۰۵ نانومتر در بستر لایه نازک مس با ضخامت حدود ۱۵۰ نانومتر با توان اپتیکی ۶۸،۳۳ میلی‌وات و اندازه لکه ۴،۲۴ میکرومتر نشان‌می‌دهند که با در نظرگرفتن انرژی آستانه و کنترل سرعت جاروب، می‌توان شیاری با پهنای مطلوب ایجاد کرد.

مراجع

[1] J.L. Burn, *Optical lithography (here is why)*, 1st ed. p. 1-3 SPIE, Bellingham, Washington USA. (2009)

[۲] چوپانیان، شهبازی، معدنی‌پور،کوهیان. *ساخت ماسک لیتوگرافی با استفاده از تحریر مستقیم لیزری در بستر لایه نازک مس*، **سومین کنفرانس لیزر و کاربردهای آن**، تهران، ۱۳۹۳.

[3] Shin BS, OhJY,Sohn H., *Theoretical and exprimental investigation into laser ablation of polyimide and copper film with 355-nm Nd:YVO$_4$ lser*, **Materials Processing Technology. (**2007**),** 187-188:260-3.

[4] Franklin Sushmita R, Thareja RK. *Simplified model to account for dependence of ablation parameters on temperature and phase of the ablated material*. **Applied Surface Science** (2004);222:293–306.

[5] Gordon Peter, Balogh Balint, Sinkovics Balint. *Thermal simulation of UV laser ablation of polyimide*. **Microelectronics Reliability**, (2007), 47:347–53.

[6] Steen William M. *Laser material processing*. p.82–4. Springer Verlag. (1998).

[7] Venkatakrishnan K, Tan B, Ngoi BKA. *Femtosecond pulsed laser ablation of thin gold film*. **Optics and Laser Technology. (**2002);34:199–202.

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