



بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰



بررسی تشکیل ساختارهای میکرو بمب و میکروجت روی سطح فیلم نازک فلزی تحت تابش پالس‌های لیزری فمتوثانیه و اثر پارامترهای پالس روی این ساختارها

ملیکا اسماعیلی^۱، آتوسا سادات عربانیان^۱، رضا مسعودی^۱

پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران^۱

me.esmaeili@mail.sbu.ac.ir, a_arabnian@sbu.ac.ir, R-Massudi@sbu.ac.ir

چکیده - اخیراً در علم پردازش مواد، لیزرهای پالسی فوق کوتاه، بدلیل دارا بودن خواص بی‌نظیری همچون طول پالس کوتاه، شدت بالا و آستانه پایین انرژی مورد نیاز برای پردازش لیزری، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. تابش پالس لیزری فمتوثانیه به سطح فیلم فلزی لایه نشانی شده بر بستر شیشه، می‌تواند منجر به شکل‌گیری ساختارهایی به شکل گنبد، جت و ... با ابعادی از مرتبه میکرومتر در سطح فیلم فلزی شود. اندازه و شکل این ساختارها وابسته به کمیت‌های مربوط به پالس لیزری و فیلم فلزی است. در این مقاله با استفاده از دو مدل دو دمایی و الاستوپلاستیک به شبیه‌سازی نحوه تشکیل ساختارهای گنبدی شکل و جت شکل روی فیلم فلزی طلا که تحت تابش پالس فوق کوتاه قرار گرفته است، پرداخته می‌شود. سپس نحوه اثرگذاری پارامترهای پالس فرودی نظیر طول پالس، انرژی و شار پالس و قطر کانونی، روی ارتفاع ساختار تشکیل شده، بررسی می‌شود.

کلید واژه- برهمکنش پالس لیزر فوق کوتاه و فلز، پردازش لیزری، تئوری الاستوپلاستیک، مدل دودمایی

Investigation of the formation of microbump and microjet structures on the surface of thin metal film irradiated with femtosecond laser pulses and the effect of pulse parameters on these structures

Melika Esmaeili, Atoosa Sadat Arabanian, Reza Massudi

Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

me.esmaeili@mail.sbu.ac.ir, a_arabnian@sbu.ac.ir, R-Massudi@sbu.ac.ir

Abstract- Recently, in material processing science, ultra-short pulsed lasers have received a lot of attention because of their unique properties such as ultra-short pulse duration, high intensity and low energy threshold required for laser processing. Irradiating of the surface of the metal film deposited on the glass substrate by femtosecond laser pulse can lead to the formation of structures in the form of bumps, jets, etc. with dimensions of the order of micrometers on the surface of the metal film. The size and shape of these structures depend on the laser pulse and the metal film parameters. In this paper, the formation of bump-shaped and jet-shaped structures on a gold metal film that has been irradiated by ultra-short pulse is simulated by using two-temperature and elastoplastic models. Then, the effect of incident pulse parameters such as pulse length, pulse energy and fluence and focal diameter on the height of the formed structure is investigated.

Keywords: ultra-short laser pulse and metal Interaction, Laser Processing, Elasto-plastic theory, Two-Temperature Model

مقدمه

بسیاری از خواص اپتیکی و مکانیکی مربوط به یک جسم وابسته به خواص سطح آن جسم است. علم مورفولوژی به بررسی خواص سطح و تاثیر این خواص بر ویژگی های اپتیکی و مکانیکی آن، می پردازد. از طرفی امروزه تکنولوژی های صنعتی مدرن بسیار زیادی بر پایه کاربرد های لیزر پالسی فوق کوتاه می باشند. یکی از این کاربردها توانایی ایجاد تغییر در ساختار سطح اجسام است؛ از این رو در علم مورفولوژی مفید واقع شده است. تابش پالس لیزر پالسی فوق کوتاه کانونی شده بر سطح یک ماده در شرایط خاص و قابل تعیین می تواند موجب نوشتن مستقیم بر سطح آن یا ایجاد ساختارهای میکرونی روی سطح آن جسم شود. استفاده از لیزر فوق کوتاه مزیت هایی از جمله: شار خیلی کمتر برای رسیدن به شدت آستانه، اثر گذاری دقیق و تمیز تر و توانایی کارکرد بر طیف وسیعی از مواد از فلزات تا بافت های نرم زیستی را نسبت به لیزر با پالس بلندتر (نانوثانیه) دارد. کاربرد های ماشین کاری روی سطح فلز با لیزر پالسی فوق کوتاه شامل ساخت ادوات میکروالکترونیکی، ساخت ترانزیستورها، ساخت سنسور های زیستی مینیاتوری، علامت گذاری لیزری و ... می باشد [۱]. هدف این مقاله بررسی نحوه تشکیل ساختار میکرومب و میکروجت بر روی سطح فیلم نازک فلزی لایه نشانی شده روی شیشه توسط پالس لیزری فوق کوتاه با انرژی پایین می باشد. تابش پالس فوق کوتاه کانونی شده روی سطح فلز، موجب افزایش دمای فلز می شود که این افزایش حرارت موجب افزایش فشار در سطح مشترک فلز و شیشه شده و باعث می شود در مرکز تابش، فیلم از شیشه جدا شده و نهایتاً منجر به ایجاد ساختار های میکرونی به شکل گنبد یا جت در سطح فیلم فلزی خواهد شد [۲]. برای توصیف این اثرات ابتدا توزیع حرارتی ایجاد شده در فیلم فلزی مورد بررسی قرار می گیرد. در رژیم پالس فوق کوتاه، اثرات حرارتی توسط مجموعه معادلات مدل دو دمایی محاسبه می شوند [۳]. سپس برای بررسی اثر مکانیکی ناشی از افزایش دما در فیلم نازک فلزی، از تئوری مدل الاستوپلاستیک استفاده می شود. با استفاده از این دو

مدل، دیده خواهد شد که افزایش شدت پالس تابیده شده موجب افزایش بیشتر دما و افزایش ارتفاع ساختارها خواهد شد.

اصول و تئوری

با تابش پالس فمتوثانیه به سطح فیلم فلزی، الکترون های آزاد فلز، انرژی فوتون های پالس را بر اساس اثر برم-اشترلانگ معکوس جذب کرده و انرژی جنبشی آنها افزایش می یابد. این افزایش انرژی جنبشی موجب افزایش دمای الکترون ها نیز می شود. دمای الکترون های آزاد فلز در بازه زمانی چند فمتوثانیه، تا چند هزار کلوین افزایش می یابد. در این بازه از زمان، دمای یون های شبکه افزایش پیدا نمی کند و پس از اتمام پالس الکترون های گرم بواسطه برخورد های پی در پی با یون های شبکه پس از گذشت چند ده پیکوثانیه، موجب گرم شدن شبکه خواهند شد. در مقایسه با طول پالس (τ_0)، گرمایش الکترون ها هم مرتبه با τ_0 و گرمایش شبکه در مدت زمان تقریباً صد برابر τ_0 اتفاق می افتد. پس در بازه زمانی τ_0 یک رژیم حرارتی غیر تعادلی در فلز، شامل الکترون های گرم و شبکه سرد بوجود می آید. مدل دو دمایی برای محاسبه دمای الکترون و شبکه در زمان ها و مکان های مختلف فیلم فلزی به کار می رود که بصورت زیر داده می شود [۳]:

$$C_e(T_e) \frac{\partial T_e}{\partial t} = k_e \nabla^2 T_e - g(T_e - T_l) + Q(r, t) \quad (1)$$

$$C_l \frac{\partial T_l}{\partial t} = k_l \nabla^2 T_l + g(T_e - T_l) \quad (2)$$

در این رابطه، C_e و C_l به ترتیب ظرفیت گرمایی الکترون و شبکه، k_e و k_l رسانایی گرمایی الکترون و شبکه، g ثابت جفت شدگی الکترون و فونون و Q جمله چشمه گرمایی و بصورت زیر است.

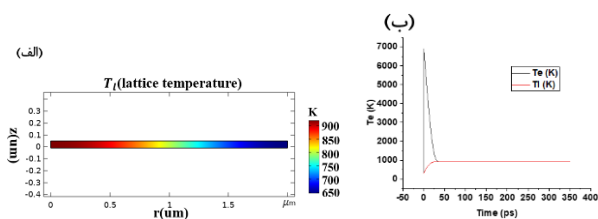
$$Q = (1 - R) I_0(r, t) \frac{\exp(-z/(\lambda_0 + \lambda_{ball}))}{\lambda_0 + \lambda_{ball}} \quad (3)$$

$$I_0 = \frac{2F_0}{\tau_L} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \exp(-4\ln(\frac{t}{\tau_L})^2) \exp(-(\frac{r}{R_0})^2) \quad (4)$$

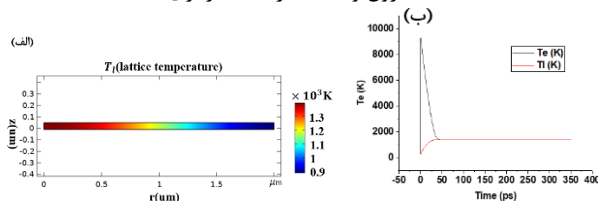
در این معادله، R ضریب بازتاب فلز، τ_L طول پالس، F_0 شار پالس تابیده شده، R_0 شعاع ناحیه ای است که پالس در آن کانونی شده است، λ_{ball} رنج بالستیک الکترون های فلز و λ_0 عمق نفوذ باریکه در فلز است. پس از تابش پالس لیزری

نتایج شبیه سازی

محاسبات به ازای تک پالس فمتوثانیه با طول پالس ۳۰ fs با طول موج ۸۰۰ nm، کانونی شده در قطر ۴ μm با شار $0.5 J/cm^2$ و $1/1 J/cm^2$ روی سطح فیلم طلا با ضخامت ۶۰ nm می‌تابد، در نرم‌افزار Comsol Multiphysics انجام شده است. با حل معادله ۱ و ۲ توزیع حرارتی ایجاد شده در فیلم بصورت شکل ۱-الف و ۲-الف و تحول زمانی دمای الکترون و یون‌های شبکه برای نقطه مرکزی بصورت شکل ۱-ب و ۲-ب بدست می‌آید:

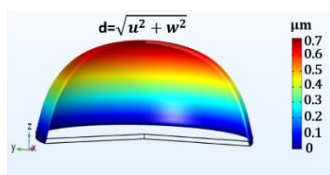


شکل ۱-الف) توزیع دمایی ایجاد شده در راستای شعاع تحت تابش پالس با شار $0.5 J/cm^2$ و (ب) تحول زمانی دمای الکترون و شبکه در نقطه مرکزی



شکل ۲-الف) توزیع دمایی ایجاد شده در راستای شعاع تحت تابش پالس با شار $1/1 J/cm^2$ و (ب) تحول زمانی دمای الکترون و شبکه در نقطه مرکزی

همانطور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، در حالتی که شار پالس تابیده شده $0.5 J/cm^2$ باشد، دمای شبکه فلزی در نقطه مرکزی به دمای ذوب ماده (۱۳۳۷ کلوین) نمی‌رسد، اما برای حالتی که شار $1/1 J/cm^2$ تابیده شود نقاط مرکزی فیلم در این ناحیه ذوب می‌شوند. تغییر شکل ایجاد شده محاسبه شده برای هر حالت بصورت شکل ۳ و ۴ می‌باشد:



شکل ۳ - تغییر شکل ایجاد شده در فیلم طلا مطابق با توزیع دمای شکل ۱

فوق کوتاه به سطح فیلم، افزایش دما موجب افزایش فشار و افزایش فشار منجر به تولید تنش در فیلم نازک فلزی خواهد شد. اگر جسم قابل انبساط باشد یک موج ترموالاستیک ایجاد و در فیلم فلزی انبساط حرارتی رخ می‌دهد. در شرایطی که پالس تابیده شده به سطح نمونه توزیع فضایی گاوسی داشته باشد، توزیع حرارت ایجاد شده در سطح فیلم نیز، گرادیان شعاعی دارد؛ بطوریکه در مرکز تابش دمای فیلم خیلی بیشتر از لبه‌ها افزایش می‌یابد. گرادیان حرارتی در راستای شعاعی باعث می‌شود در مرکز تابش، فیلم بیشتر از لبه‌های آن منبسط شود. این امر منجر به ایجاد ساختاری به شکل گنبد می‌شود. در حالتی که در مرکز کانونی باریکه لیزری فیلم فلزی ذوب شود، فلز مذاب دارای ضریب انبساط بیشتر بوده و نسبت به مناطق ذوب نشده انبساط خیلی بیشتری می‌یابد، در نتیجه ساختاری به شکل جت در مرکز شکل می‌گیرد. معادلات توصیف کننده دینامیک و جابجایی ناشی از افزایش دما را می‌توان با استفاده از معادلات زیر که مربوط به تحول زمانی مولفه‌های جابجایی در دو راستای شعاعی و ارتفاعی می‌باشند، نشان داد [۳].

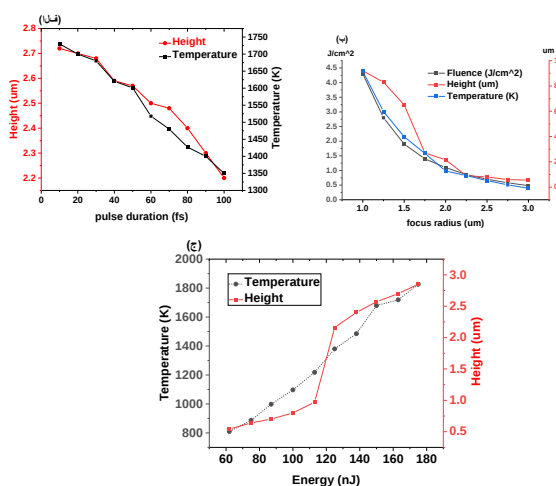
$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (2\mu + \lambda) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} \right) + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + (\mu + \lambda) \frac{\partial^2 w}{\partial z \partial r} - \frac{E\alpha}{1-2\nu} \frac{\partial(T-T_0)}{\partial r} \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = (2\mu + \lambda) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right) + (\mu + \lambda) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z \partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{E\alpha}{1-2\nu} \frac{\partial(T-T_0)}{\partial r} \quad (6)$$

در این رابطه ρ چگالی ماده، u و w بترتیب مولفه‌های جابجایی در دو راستای شعاعی و ارتفاعی، T_0 دمای اولیه ماده، μ و λ ثوابت لامه، E و ν نیز به ترتیب ماژول یانگ و ضریب پواسون از ویژگی‌های ماده هستند. حل معادلات ۱ و ۲، توزیع دمای الکترون و شبکه در زمان‌ها و مکان‌های مختلف را در اختیار قرار می‌دهد. پس از آن معادلات ۵ و ۶ با استفاده از نتایج بدست آمده از حل معادله ۲، حل می‌شوند. با حل این معادلات جابجایی در راستای شعاعی و ارتفاعی بدست آمده و با تعریف پارامتر جابجایی d ، جابجایی کل هر نقطه بدست آمده و با استفاده از آن، تغییر شکل ایجاد شده در فیلم نازک فلزی محاسبه می‌شود.

$$d = \sqrt{u^2 + w^2} \quad (7)$$

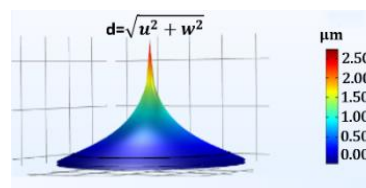
و ابعاد این ساختار ها به ازای پارامترهای پالس مختلف بسیار حائز اهمیت است. در این مقاله با استفاده از مدل دو دمایی و الاستوپلاستیک، شبیه‌سازی توزیع حرارتی ایجاد شده روی سطح نمونه فلزی تحت تابش پالس فمتوثانیه انجام و پس از آن تغییر شکل ایجاد شده در فلز محاسبه شده و نحوه اثرگذاری پارامترهای پالس نظیر طول پالس، انرژی و شعاع کانونی مورد بررسی قرار گرفت. این نتایج توانایی تعیین پارامترهای پالس مورد نیاز برای رسیدن به تغییر شکل مطابق با کاربرد مورد نظر را در اختیار قرار می‌دهند.



شکل ۵- الف) تاثیر طول زمانی پالس بر دمای نقطه مرکزی و ارتفاع ساختار ایجاد شده ب) تاثیر شعاع کانونی بر دمای نقطه مرکزی و ارتفاع ساختار ایجاد شده ج) تاثیر انرژی پالس بر دمای نقطه مرکزی و ارتفاع ساختار ایجاد شده

مرجع‌ها

- [1] S. S. Wellershoff, J. Hohlfeld, J. Güdde, E. Matthias, "The role of electron-phonon coupling in femtosecond laser damage of metals". Applied Physics A, Vol. 69, No. 1, p. S99-S107, 1999.
- [2] N. A. Inogamov, V. V. Zhakhovskii, V. A. Khokhlov, "Jet formation in spallation of metal film from substrate under action of femtosecond laser pulse". Journal of Experimental and Theoretical Physics, Vol. 120, No. 1, p. 15-48, 2015.
- [3] Meshcheryakov, P. Yu, N. M. Bulgakova, "Thermoelastic modeling of microbump and nanojet formation on nanosize gold films under femtosecond laser irradiation". Applied Physics A, Vol. 82, No. 2, p. 363-368, 2006.
- [4] Korte, F., J. Koch, and B. N. Chichkov. "Formation of microbumps and nanojets on gold targets by femtosecond laser pulses." Applied Physics A 79.4 (2004): 879-881.



شکل ۴- تغییر شکل ایجاد شده در فیلم طلا مطابق با توزیع دمای شکل ۲

در این تصاویر دیده می‌شود که در صورتی که شار فرودی منجر به ذوب فیلم طلا در ناحیه مرکزی باریکه شود، ساختاری به شکل جت تشکیل خواهد شد. (شکل ۴) برای تایید محاسبات می‌توان شکل ۳ و ۴ را با تصاویر SEM موجود در مرجع [۴] مقایسه کرد. در ادامه به بررسی تاثیر پارامتر ها بر ارتفاع ساختار ها و دمای نقطه مرکزی ناحیه تحت تابش می‌پردازیم. در شکل ۵ تغییرات ارتفاع جت و دمای شبکه (به ازای الف) طول پالس های متفاوت، ب) انرژی ثابت ۱۳۸ nJ و شعاع کانونی های متفاوت و ج) انرژی‌های پالس متفاوت نشان داده شده است. افزایش طول پالس و افزایش شعاع کانونی موجب کاهش شدت پالس تابیده شده به فلز می‌شود. مطابق شکل ۵-الف و ۵-ب، با کاهش شدت دمای فیلم در نقطه مرکزی افزایش کمتری یافته و بر اساس رابطه مستقیم انبساط حرارتی و افزایش دما، ساختارهای شکل گرفته ارتفاع کمتری خواهند داشت. در شکل ۵-ب در شعاع ۲/۲۵ میکرون کاهش چشمگیر ارتفاع دیده می‌شود که علت آن کاهش دمای نقطه مرکزی از دمای ذوب است. در این صورت ساختارهای شکل گرفته به شکل گنبد می‌باشند. مطابق شکل ۵-ج افزایش انرژی و نتیجتاً افزایش شار لیزر فرودی موجب افزایش مقدار عبارت رابطه ۴ شده و این افزایش موجب می‌شود تا دمای فیلم بیشتر افزایش یابد. هرچه گرادیان دما شدیدتر باشد، جابجایی در راستای شعاعی و ارتفاعی بیشتر شده، فیلم بیشتر منبسط شده و ارتفاع ساختار ها افزایش می‌یابد. در این شکل نیز در انرژی ۱۲۰ nJ، گذر دمای نقطه مرکزی از نقطه ذوب و نتیجتاً شکل گیری جت دیده می‌شود.

نتیجه‌گیری

تابش پالس فمتوثانیه به سطح فیلم فلزی نازک توانایی ایجاد ساختارهای گنبدی شکل یا جت شکل روی سطح آن را دارد، در این راستا مدل‌سازی تئوری برای پیش بینی شکل

با سلام

ضمن تشکر از داوری و نظرات ارزنده داور گرامی،

پاسخ نظرات شما بصورت زیر می باشد :

۱ - مقدمه سطر اول اشتباه تایپی

اصلاح شد.

۲ - در فرمول ۳، R به R_0 تبدیل شود.

در این رابطه، R ضریب بازتاب فلز است و با R_0

متفاوت است که در توضیحات اضافه شد.

۳ - صفحه ۳ ستون سمت راست سطر ۱۱ اشتباه

تایپی

اصلاح شد.

۴ - کاش برای تأیید محاسبات یک مرجع که از سطح

فلز تحت تابش تصویر SEM گرفته اند، معرفی

میشود.

مرجع اضافه شد.

همه تغییرات هایلایت شده اند.

با تشکر.