

شبیه‌سازی مونت کارلوی فرایند لایه نشانی با لیزر پالسی و بررسی تغییر فاصله هدف تا زیر لایه بر مشخصات لایه‌ها

محمدرضا رشیدیان وزیری^{1*}، افضل مصطفوی حسینی²، علی هاشمی زاده عقدا³، نرگس علیمرادیان⁴

1. استادیار، فیزیک، پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران

2. کارشناسی ارشد، فیزیک، دانشگاه پیام نور

3. استادیار، فیزیک، دانشگاه پیام نور

4. کارشناسی ارشد، فیزیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

تاریخ دریافت: 1395/10/01 تاریخ پذیرش: 1395/11/03

Monte Carlo simulation of the Pulsed Laser Deposition Process and Investigation of the Target-to-Substrate Distance Variations on the Characteristics of Thin Films

M.R. Rashidian Vaziri^{*1}, A. Mostafavi Hoseini², A. Hasheimizadeh Oghada³, N. Alimoradian⁴

1. Assistant Professor, Physics, Photonics and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science & Technology Research Institute, Tehran, Iran

2. MsC. Student, Physics, Payame Noor University

3. Assistant Professor, Physics, Payame Noor University

4. MsC., Physics, Bu - Ali Sina University, Hamedan, Iran

Received: 2016/12/21 Accepted: 2017/01/22

Abstract

In this paper, Pulsed Laser Deposition (PLD) process at the presence of a background gas was simulated using the Monte Carlo method. Specifically, growth of aluminum metal in xenon background gas at the pressure of 50 mTorr was simulated. Target-to-substrate distances of 10, 15, 20, 25 and 30 mm are used in simulations. Spatial and energy information of the ions in the ablated plasma plume that forms in this method, as well as the sputtered ions from the growing thin film were collected. Thickness profile of the growing thin films was calculated using the spatial information of the transmitted and the sputtered ions. The results showed the possibility of dip formation at the center of the grown thin films with this method and its intensification by decreasing the target-to-substrate distance. The simulation results demonstrated the effective role of the sputtered ions from the growing thin film in the formation of this type of dips.

Keywords

Thin Films, Pulsed Laser Deposition, Monte Carlo Calculations.

چکیده

در این مقاله، فرایند لایه نشانی با لیزر پالسی و در حضور گاز پس‌زمینه به روش مونت کارلو شبیه‌سازی شده است. به طور خاص رشد فلز آلومینیوم در محیط گاز زنون پس‌زمینه و در فشار 50 میلی‌تور شبیه‌سازی شده است. فواصل هدف - زیر لایه برابر با 10، 15، 20، 25 و 30 میلی‌متر در شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اطلاعات مکانی و انرژی توده یون‌های پلاسمایی شکل گرفته در این روش و نیز اطلاعات مشابه برای یون‌های کندوپاش شده از سطح لایه در حال رشد جمع‌آوری شده‌اند. توزیع ضخامتی لایه‌ها با استفاده از اطلاعات یون‌های عبوری و کندوپاش شده از سطح لایه محاسبه شده است. نتایج نشان‌دهنده احتمال شکل‌گیری حفره در مرکز لایه‌های در حال رشد به این روش و تشدید آن با کاهش فاصله هدف - زیر لایه است. نتایج شبیه‌سازی بیانگر نقش مؤثر یون‌های کندوپاش شده از سطح لایه در شکل‌گیری این نوع حفره‌ها است.

واژگان کلیدی

لایه نشانی، لایه نشانی با لیزر پالسی، محاسبات مونت کارلو.

*Corresponding Author: rezaeerv@gmail.com

* نویسنده مسئول: محمدرضا رشیدیان وزیری

مقدمه

هنگام کندوسوز شدن سطح یک ماده به روش‌های گوناگون، مانند زمانی که قوس الکتریکی یا باریکه پالسی لیزر به سطح آن برخورد می‌کند، تعداد بسیار زیادی یون پرنرژی از سطح ماده کنده و تقریباً عمود بر سطح، از آن خارج می‌شوند. توزیع انرژی و مکانی ذرات با توجه به میزان انرژی لیزر و نیز انرژی بستگی یون‌ها برای هر ماده، یک توزیع گاوسی خاص است [1]. با توجه به شرایط اولیه هر یون آزاد شده، مباحث نظری دینامیک کوانتومی مسیری را برای آن یون در عبور از محیط دوم پیش‌گویی می‌کند.

شبیه‌سازی با روش مونت کارلو بر اساس تابع توزیع انتخاب شده به طور تصادفی، اعدادی را برای شرایط اولیه تولید و در روابط دینامیک کوانتومی قرار می‌دهد. یعنی در این روش تعداد بسیار زیادی ذره با شرایط اولیه تصادفی اما منطبق بر یک تابع توزیع آماری، تولید و مسیرشان طبق نظریه‌های فیزیکی محاسبه می‌شود. در نهایت نشان داده می‌شود که این ذرات پس از طی مسافتی معین به چه شرایط ثانویه‌ای از لحاظ انرژی، جهت حرکت و موقعیت مکانی می‌رسند. یون‌ها پس از برهم کنش‌های متوالی با اتم‌های محیط ثانویه، در نهایت متوقف یا با انرژی کاهش یافته از آن عبور می‌کنند. علاوه بر این، حالت سومی هم وجود دارد که در آن یون‌ها پس از برخورد با اتم‌های ماده محیطی، با انتقال انرژی خود به آنها باعث جدایی و خروجشان خواهند شد. حالت سوم ذکر شده با نام کندوپاش شناخته می‌شود.

روش کندوسوز لیزری کاربردهای بسیاری در زمینه علم و فناوری، نظیر کاربرد برای لایه نشانی و یا گداخت لیزری، دارد. کاربرد کندوسوز لیزری برای لایه نشانی با نام «لایه نشانی با لیزر پالسی» شناخته می‌شود. در این روش لایه نشانی پس از برخورد باریکه لیزری با سطح ماده، توده‌ای از یون‌های پرنرژی تولید می‌شود که پس از برخورد با اتم‌های گاز محیطی موجود در محفظه لایه نشانی به لایه در حال رشد رسیده و روی آن نشاند

می‌شوند. در این روش لایه نشانی باید از لیزر پالسی پرنرژی برای شکل دهی توده یون‌ها استفاده کرد که هزینه استفاده از آن را در قیاس با سایر روش‌های لایه نشانی افزایش می‌دهد. با این وجود مزایای بی نظیر این روش، نظیر نرخ بالای لایه نشانی و حفظ ترکیب اتمی یا استوکیومتری ماده پس از جای‌گذاری آن بر روی زیرلایه، باعث محبوبیت و کاربرد گسترده آن شده است. برای پایین آوردن هزینه استفاده از این روش، می‌توان فرایند لایه نشانی را مدل‌سازی رایانه‌ای کرد. یون‌های کندوسوز شده پس از برهم کنش با اتم‌های محیط گازی و پس از رخداد بعضی پدیده‌های فیزیکی ذکر شده در نهایت به سطح لایه در حال رشد می‌رسند و بر روی آن قرار می‌گیرند.

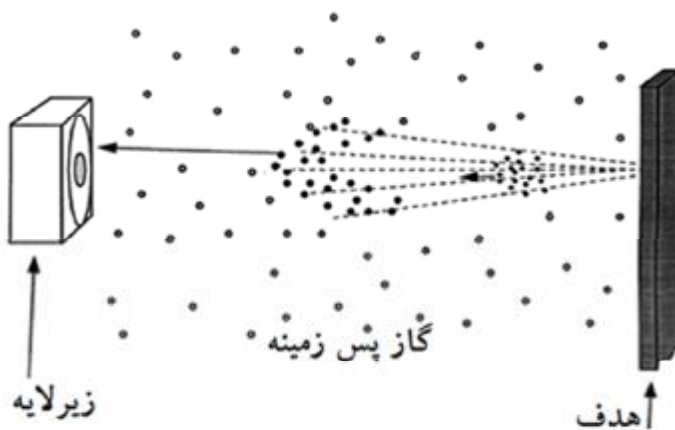
در این مقاله، لایه نشانی با استفاده از لیزر پالسی به روش مونت کارلو مدل و شبیه‌سازی شده است. یکی از مزایای لایه نشانی با استفاده از لیزر پالسی، وجود کمیت‌های زیاد قابل تنظیم در آن است که باعث انعطاف‌پذیری بیشتر این روش لایه نشانی در قیاس با روش‌های مشابه تبخیر فیزیکی شده است.

فاصله هدف تا زیرلایه، فشار گاز پس‌زمینه، دمای زیرلایه، سرعت دوران هدف و زیرلایه و چگالی انرژی لیزر مورد استفاده جهت کندوسوز پارامترهای عمده‌ای هستند که می‌توانند جهت دستیابی به شرایط بهینه لایه نشانی طی انجام آزمایش‌های گوناگون و به روش آزمون و خطا تعیین شوند. از سوی دیگر، تغییر این کمیت‌ها در آزمایشگاه و تکرار اندازه‌گیری‌ها باعث صرف وقت و هزینه زیادی می‌شود. یکی از راه‌های جلوگیری از این اتلاف هزینه و انرژی، انجام شبیه‌سازی رایانه‌ای است. در این مقاله به بررسی تغییر فاصله هدف تا زیرلایه و تأثیر آن بر مشخصات لایه‌های آماده شده به این روش پرداخته شده است. شرح مدل مونت کارلوی مورد استفاده و نتایج شبیه‌سازی در ادامه آورده شده‌اند.

مدل شبیه‌سازی

معادله انتقال حرارت به روش‌های عددی شبیه‌سازی می‌شود. شبیه‌سازی مرحله دوم به روش عددی از طریق حل معادلات دینامیک گازی ناویر - استوکس یا روش‌های مونت کارلو و دینامیک مولکولی قابل انجام است. شبیه‌سازی مرحله سوم نیز معمولاً به روش مونت کارلو و یا دینامیک مولکولی انجام می‌پذیرد. باید در نظر داشت که شبیه‌سازی مرحله دوم به روش تحلیلی و حل

همان‌طور که در بخش پیش اشاره شد، در روش لایه نشانی با لیزر پالسی و پس از کندوسوز شدن توده پلاسمای یونی، یون‌های موجود در این توده پس از برخورد‌های متوالی با اتم‌های گاز پس‌زمینه به سطح لایه در حال رشد خواهند رسید. این فرایند را می‌توان به سه مرحله تقسیم کرد؛ مرحله اول شامل اندرکنش لیزر



شکل 1. طرح‌واره مراحل مختلف شکل‌گیری و انتشار توده پلاسمای یونی در فرایند لایه نشانی با لیزر پالسی

عددی معادلات دینامیک گازی، قادر به در نظر گرفتن اندرکنش میان یون‌های کندوسوز شده با اتم‌های گاز پس‌زمینه نیست و این محدودیتی بزرگ برای شبیه‌سازی لایه نشانی لیزر پالسی است که در آن معمولاً یک گاز پس‌زمینه نیز به هنگام فرایند لایه نشانی مورد استفاده قرار می‌گیرد [2]؛ بنابراین شبیه‌سازی دینامیک توده یون‌های کندوسوز شده در محیط گاز خارجی به طور معمول به روش‌های مونت کارلو یا دینامیک مولکولی انجام می‌پذیرد. روش مونت کارلو به عنوان مطمئن‌ترین روش رایانه‌ای در مطالعه تاریخچه یون‌های کندوسوز شده در طی مسافت هدف - زیرلایه و با در نظر گرفتن برخورد‌های مختلف با اتم‌های گاز پس‌زمینه مطرح است [3].

پرشدت با ماده هدف و کندوپاش و جدایی ماده از سطح آن است. مرحله دوم شامل بسط و توسعه توده یون‌های کندوسوز شده در محیط گاز پس‌زمینه، در نتیجه انرژی اولیه یون‌ها و برخورد میان آنها با اتم‌های گاز است. مرحله سوم شامل اندرکنش یون‌های عبور کرده از فاصله مابین هدف و زیرلایه با ماده در حال رشد و انباشت آنها روی سطح است. طرح‌واره مراحل مختلف موجود در فرایند لایه نشانی با لیزر پالسی در شکل 1 نشان داده شده است. هر سه مرحله بسیار پیچیده و شبیه‌سازی هر سه مرحله با هم تقریباً غیرممکن است. با این وجود، روش‌های گوناگونی برای شبیه‌سازی هر یک از فرایندهای کندوسوز لیزری، بسط و توسعه توده یون‌ها در محیط و رشد لایه‌های نازک به وسیله آن در منابع ذکر شده است [1]. مرحله اول به صورت تحلیلی و حل

پخش می‌شوند. در این رابطه A ثابت به هنجارش، شعاع باریکه لیزری (در انجام محاسبات برابر 0/5 میلی متر ثابت فرض شده است) و X و Y مختصات عرضی لایه نادنسن حاصل از برهم کنش لیزر با ماده هستند. پس از توزیع ذرات در فضای مکان باید به هر یون موجود در این توزیع یک سرعت نسبت داد. در این مدل فرض می‌کنیم که توزیع سرعت ذرات از تابع توزیع ماکسول - بولتزمن جابه جا شده تبعیت می‌کند.

$$f(v_z) = B v_z^3 \exp\left(-\frac{m(v_z - v_0)^2}{2kT}\right) \quad (2)$$

که در آن B ثابت به هنجارش، v_z سرعت یون‌ها، v_0 سرعت جابه جایی، T دمای انتقالی، m جرم اتمی یون‌های کندوسوز شده و k ثابت بولتزمن است. سرعت جابه جایی را برای یک دسته یون خاص می‌توان از طریق به دست آوردن سرعت میانگین با استفاده از رابطه (2) و برابر قرار دادن آن با مقدار میانگین ذکر شده در منابع علمی برای آن دسته یون خاص (برای آلومینیوم 244 الکترون ولت [6]) به دست آورد. در توزیع سرعت میان یون‌ها در محاسبات مقدار نوعی T برابر 2×10^4 درجه کلون در نظر گرفته شده است [7]. استفاده از سرعت‌های تجربی اندازه‌گیری شده برای میانگین سرعت یون‌ها مزیت مدل ارائه شده است. به این طریق در مقایسه با مقادیر به دست آمده از روش‌های عددی شبیه‌سازی اندرکنش لیزر - ماده، می‌توان از مقادیر دقیق‌تر و مطمئن‌تری در محاسبات استفاده کرد. پس از مرحله شبیه‌سازی لایه نادنسن با توزیع یون‌ها در فضاهای مکان و سرعت، اطلاعات این یون‌ها وارد برنامه محاسباتی SRIM می‌شوند. جهت مشاهده کامل چگونگی انجام محاسبات در این برنامه، نوع انرژی پتانسیل‌های مورد استفاده و نحوه محاسبه سطح مقطع‌ها از طریق توان‌های توقف، می‌توان از مرجع [1] استفاده کرد.

شرح مدل مونت کارلوی مورد استفاده در این کار را می‌توان به صورت کامل در مراجع [1 و 4] مطالعه کرد. به طور خلاصه، مدل مونت کارلوی استفاده شده در این کار با در نظر گرفتن داده‌های تجربی مربوط به دینامیک اولیه یون‌های کندوسوز شده از سطح فلز و سپس شبیه‌سازی مراحل دوم و سوم کندوسوز لیزری با استفاده از برنامه مونت کارلو SRIM است. SRIM برنامه‌ای رایانه‌ای و جامع مبتنی بر روش مونت کارلو است که قادر به انجام محاسبات با در نظر گرفتن برخورد بین یون‌ها و اتم‌های گاز به صورت کوانتومی است. در خلال این برخوردها فرض می‌شود که یون و اتم برخورد کلونی پوشش داده شده شامل اندرکنش تبدیلی و همبستگی میان پوسته‌های الکترونی داخلی را تجربه می‌کنند. زمانی که یون‌های کندوسوز شده فاصله هدف - زیرلایه را طی می‌کنند و به سطح لایه درحال رشد برخورد می‌کنند، فرض می‌شود که درون آن اندرکنش‌های بلند بردی که برانگیختگی الکترونی و تولید پلاسمون‌ها را باعث می‌شود خواهند داشت. این مهم با در نظر گرفتن ساختار نواری لایه امکان پذیر است. در پایان انجام محاسبات به این روش می‌توان به اطلاعات ارزشمندی نظیر مسیر حرکت و انرژی یون‌های کندوسوز شده و برگشته نموده به سمت ماده هدف، موقعیت یون‌های جای گرفته درون لایه در حال رشد، اتلاف انرژی یون‌ها، میزان کندوپاش از سطح لایه نازک، زاویه پراکندگی یون‌ها پس از هر برخورد، میزان آسیب وارد شده به لایه و موقعیت مکانی تهی جاهای ایجاد شده در آن دسترسی داشت [5].

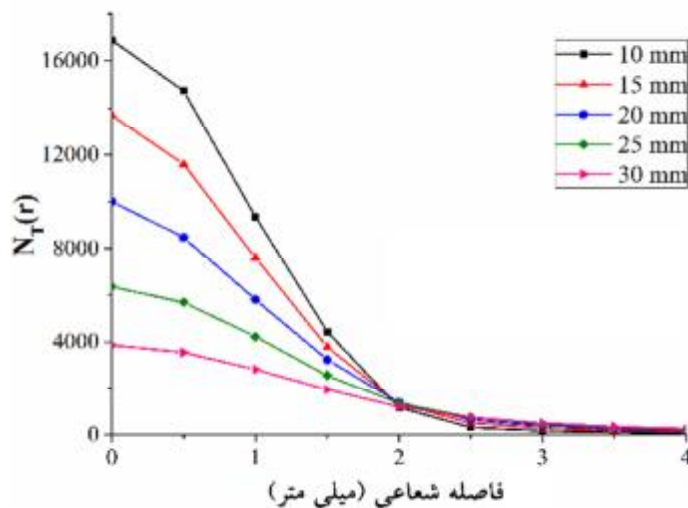
یون‌ها در فضای دوبعدی مطابق با تابع توزیع گاوسی:

$$f(x, y) = A \exp\left(-\frac{2(x^2 + y^2)}{w^2}\right) \quad (1)$$

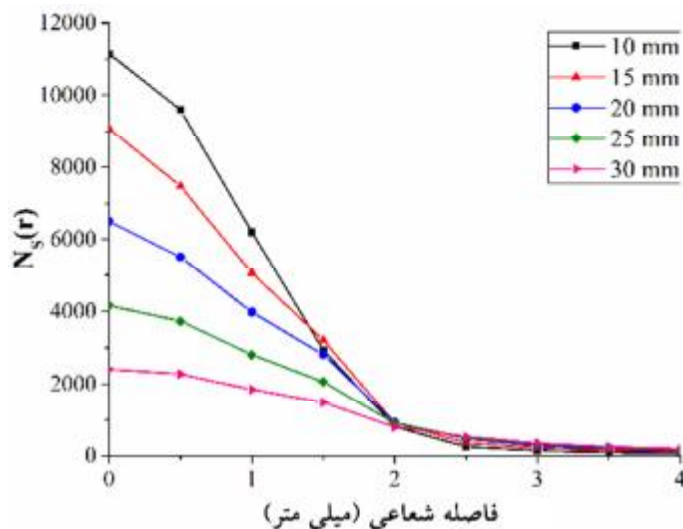
نتایج

زنون در فشار 50 میلی تور و در فاصله‌های هدف - زیرلایه برابر با 10، 15، 20، 25 و 30 میلی متر استفاده شده است. اطلاعات مربوط به انرژی و سرعت یون‌ها از مرجع [6] استخراج شده است. شکل 2 تعداد میانگین

در این مقاله از مدل مونت کارلوی توسعه داده شده برای شبیه‌سازی رشد لایه آلومینیوم در محیط گاز پس‌زمینه



شکل 2. تعداد میانگین یون‌های عبور کرده از فاصله هدف - زیرلایه برحسب فاصله شعاعی از مرکز زیرلایه در فشار 50 میلی تور گاز زنون.

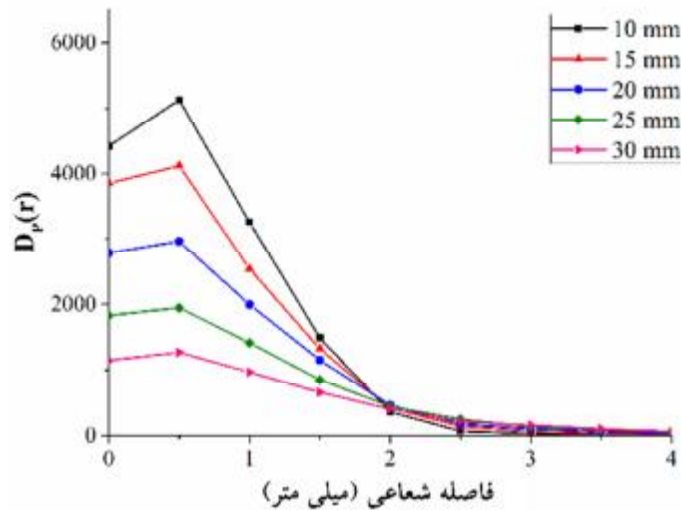


شکل 3. تعداد میانگین یون‌های کندوپاش شده از سطح لایه در حال رشد بر حسب فاصله شعاعی از مرکز زیرلایه در فشار 50 میلی تور گاز زنون.

کندوپاش شده به ویژه در مرکز لایه که انرژی یون‌های برخوردی بالاتر است، بیشتر است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شده است [4]، تعداد بالای این یون‌های کندوپاش شده، به ویژه در مرکز لایه در حال رشد، می‌تواند باعث شکل‌گیری لایه‌هایی با ویژگی منحصر به فرد حفره دار شود. به منظور بررسی بیشتر این موضوع در شکل 4، توزیع ضخامت محاسبه شده لایه‌ها نشان داده شده است. پروفایل ضخامت $D_p(r)$ با کسر تعداد میانگین یون‌های کندوپاش شده از تعداد میانگین یون‌های عبور

یون‌های عبور کرده از فاصله هدف-زیرلایه $N_T(r)$ را برحسب فاصله شعاعی از مرکز زیرلایه نشان می‌دهد. با افزایش فاصله هدف - زیرلایه مقادیر $N_T(r)$ کاهش می‌یابند. پهن‌شدگی نیم‌رخ $N_T(r)$ با افزایش فاصله هدف - زیرلایه نشان‌دهنده پهن‌شدگی توده پلاسمایی کندوسوز شده در گاز پس‌زمینه زنون و رسیدن یون‌ها به تعادل گرمایی است [1 و 4].

کاهش مقادیر $N_T(r)$ با افزایش فاصله هدف -



شکل 4. توزیع ضخامت لایه‌های آلومینیوم برحسب فاصله شعاعی از مرکز زیرلایه و به ازای فواصل متفاوت هدف - زیرلایه.

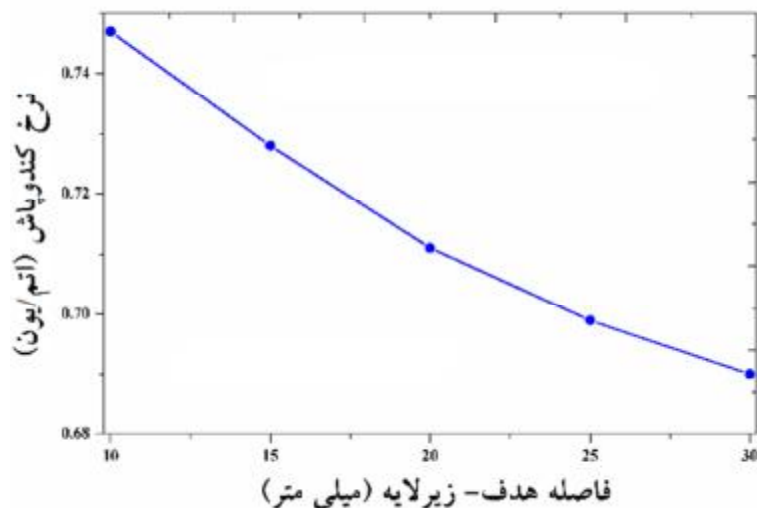
کرده از فاصله هدف - زیرلایه به دست می‌آید [4]. به دلیل آنکه تعداد میانگین یون‌های کندوپاش شده در مرکز نمودارهای شکل 3 بیشتر از کناره‌هاست، نیم‌رخ شبه گاوسی یون‌های عبور کرده در شکل 2 دستخوش تغییر می‌شود. این تغییر به شکل افت ضخامت در مرکز لایه (شعاع صفر) قابل مشاهده است. زمانی که نمودارهای توزیع ضخامت نشان داده شده در شکل 4، به اندازه 2π حول محور عمودی دوران داشته باشند تا توزیع ضخامت دوبعدی لایه‌ها به دست آید، این افت ضخامت به شکل حفره در مرکز لایه در حال رشد خودنمایی خواهد کرد. تاکنون گزارش‌های متعددی در

زیرلایه نشان‌دهنده پرننگ‌تر شدن نقش برخوردها است. در حقیقت با افزایش این فاصله و افزایش هم‌زمان حجم محصور بین هدف تا زیرلایه، اتم‌های گاز پس‌زمینه بیشتری برای برخورد با یون‌های کندوسوز شده وجود خواهند داشت.

در شکل 3 تعداد میانگین یون‌های کندوپاش شده $N_S(r)$ برحسب فاصله شعاعی از مرکز زیرلایه نشان داده شده است. انرژی بالای یون‌های عبور کرده از فاصله هدف تا زیرلایه، پس از برخورد آنها به سطح لایه در حال رشد، می‌تواند باعث کندوپاش تعداد زیادی یون از سطح آن شود. مطابق با شکل، تعداد یون‌های

شدن نقش برخوردها با اتم‌های گاز پس‌زمینه، نرخ کندوپاش افزایش می‌یابد. نرخ کندوپاش به صورت تعداد اتم‌های کندوپاش شده از سطح لایه در حال رشد برای برخورد یک یون تابشی و طول مدت زمان یک پالس لیزری محاسبه شده است. افزایش نرخ کندوپاش با کاهش فاصله هدف - زیرلایه، افزایش عمق حفره شکل گرفته در مرکز نیم‌رخ ضخامت لایه‌ها را توجیه می‌کند.

زمینه مشاهده این نوع حفره‌ها در مرکز لایه‌های رشد یافته به روش لایه نشانی با لیزر پالسی گزارش شده است [8-14]. شبیه‌سازی انجام شده در این کار بیانگر نقش مؤثر یون‌های کندوپاش شده از سطح لایه در حال رشد در شکل‌گیری این حفره‌ها و تشدید آن با کاهش فاصله هدف - زیرلایه است. در روش لایه نشانی با لیزر پالسی در قیاس با سایر روش‌های لایه نشانی کندوپاش،



شکل 5. میزان نرخ کندوپاش و تغییرات آن برحسب فاصله هدف - زیرلایه.

نتیجه‌گیری

در این مقاله فرآیند رشد لایه‌های آلومینیوم در روش لایه نشانی با لیزر پالسی و در محیط گاز زنون شبیه‌سازی شده است. تأثیر تغییر فاصله هدف - زیرلایه بر نیم‌رخ ضخامت لایه‌های رشد یافته به این روش مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بیانگر احتمال شکل‌گیری حفره در مرکز لایه‌های رشد یافته به این روش در شرایط لایه نشانی مورد استفاده در این کار است. عمق این حفره‌ها با کاهش فاصله هدف - زیرلایه و برخورد یون‌های پرانرژی‌تر به سطح لایه در حال رشد که نرخ کندوپاش را افزایش می‌دهند، تشدید می‌شود.

انرژی یون‌های جدا شده از سطح ماده هدف بسیار زیاد است [1 و 15]. این انرژی زیاد نتیجه انرژی بالای پالس لیزری و تمرکز آن بر روی سطح ماده هدف است. یکی از دلایل استفاده از گاز پس‌زمینه در روش لایه نشانی با لیزر پالسی هم کاهش انرژی یون‌های کندوسوز شده و تغییر نیم‌رخ شبه گاوسی آنهاست. شکل 4 تغییر شکل و هموار شدن این نیم‌رخ را با تغییر فاصله هدف-زیرلایه نشان می‌دهد.

به منظور مشاهده افزایش نرخ کندوپاش با کاهش فاصله هدف - زیرلایه، مقدار آن در شکل 5 نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، در تطابق با شکل 3، با کاهش فاصله هدف - زیرلایه و کم رنگ‌تر

منابع

- [1] Vaziri, MR Rashidian, F. Hajiesmaeilbaigi, and M. H. Maleki. "Microscopic description of the thermalization process during pulsed laser deposition of aluminium in the presence of argon background gas." *Journal of Physics D: Applied Physics* 43.42 (2010): 425205.
- [2] Bogaerts, Annemie, et al. "Laser ablation for analytical sampling: what can we learn from modeling?." *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 58.11 (2003): 1867-1893.
- [3] Itina, T. E., W. Marine, and M. Autric. "Monte Carlo simulation of pulsed laser ablation from two-component target into diluted ambient gas." *Journal of applied physics* 82.7 (1997): 3536-3542.
- [4] Rashidian Vaziri, M. R., F. Hajiesmaeilbaigi, and M. H. Maleki. "Monte Carlo simulation of the subsurface growth mode during pulsed laser deposition." *Journal of Applied Physics* 110.4 (2011): 043304.
- [5] J.F. Ziegler, J.P. Biersack and U. Littmark, *Stopping and Range of Ions in Solids* (New York :Pergamon Press) (2008).
- [6] Tselev, A., A. Gorbunov, and W. Pompe. "Features of the film-growth conditions by cross-beam pulsed-laser deposition." *Applied Physics A: Materials Science & Processing* 69.3 (1999): 353-358.
- [7] Bleiner, Davide, et al. "Laser-induced plasmas from the ablation of metallic targets: the problem of the onset temperature, and insights on the expansion dynamics." *Journal of applied physics* 101.8 (2007): 083301.
- [8] May-Smith, T. C., D. P. Shepherd, and R. W. Eason. "Growth of a multilayer garnet crystal double-clad waveguide structure by pulsed laser deposition." *Thin Solid Films* 515.20 (2007): 7971-7975.
- [9] D.B. Chrisey and G.K. Hubler, *Pulsed Laser Deposition of Thin Films* (John Wiley & Sons, New York, 1994) P. 94.
- [10] A. Bogaerts , Z. Chen, R. Gijbels and A. Vertes, *Spectrochimica Acta Part B* 58 1867-1893 (2003).
- [11] Hau, S. K., et al. "Intrinsic resputtering in pulsed-laser deposition of lead-zirconate-titanate thin films." *Applied physics letters* 66.2 (1995): 245-247.
- [12] Tyunina, M., and S. Leppävuori. "Effects of laser fluence, size, and shape of the laser focal spot in pulsed laser deposition using a multielemental target." *Journal of Applied Physics* 87.11 (2000): 8132-8142.
- [13] Droubay, Timothy C., et al. "Nonstoichiometric material transfer in the pulsed laser deposition of LaAlO₃." *Applied Physics Letters* 97. 12 (2010): 124105.
- [14] Fominski, V. Yu, et al. "Ion-assisted deposition of MoS_x films from laser-generated plume under pulsed electric field." *Journal of Applied Physics* 89.2 (2001): 1449-1457.
- [15] Rashidian Vaziri, M. R., Fereshteh Hajiesmaeilbaigi, and Muhammad H. Maleki. "New raster-scanned CO₂ laser heater for pulsed laser deposition applications: design and modeling for homogenous substrate heating." *Optical Engineering* 51.4 (2012): 044301-1.