



بررسی نظری تأثیر فاصله چشمه تا زیر لایه بر لایه نشانی مس به روش تبخیر حرارتی

جواد علی پور زردکوهی | فاطمه شریعتمدار طهرانی* | مریم علیان نژادی

دانشکده فیزیک، دانشگاه سمنان، سمنان

چکیده: لایه‌های نازک مس به طور گسترده در حسگرهای امنیتی، حسگرهای پزشکی، صفحات خورشیدی، لیزرهای قفل شده مد، درمان سرطان و ... کاربرد دارند. روش تبخیر حرارتی روش مناسبی برای ایجاد لایه‌های نازک مس است. فاصله بین چشمه مس و زیر لایه پارامتر مهمی است که تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. بنابراین، در این مقاله تأثیر این کمیت بر فرایند ایجاد لایه نازک مس با روش تبخیر حرارتی به صورت نظری مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که فشار بخار مس بر سطح زیر لایه، نرخ لایه‌نشانی و ضخامت لایه نازک با افزایش این فاصله کاهش می‌یابد. در حالی که مقدار یکنواختی ضخامت لایه نازک با افزایش این فاصله بهبود می‌یابد. با افزایش فاصله از ۱۳cm تا ۳۳cm نرخ لایه نشانی از ۵/۵۷nm/s تا ۱/۱۲nm/s کاهش و پهنای تابع ضخامت لایه از ۵۶nm تا ۱۲۰nm افزایش می‌یابد. همچنین، تابع وابستگی پهنای ضخامت و نرخ لایه‌نشانی لایه نازک به فاصله چشمه تا سطح زیر لایه ارائه شده است تا فاصله مناسب با توجه به کاربرد لایه نازک انتخاب شود.

واژه‌های کلیدی: لایه نشانی، لایه‌های نازک مس، تبخیر حرارتی.

f_tehrani@semnan.ac.ir

۱- مقدمه

رفته‌اند و ویژگی ضد توموری این نانوذرات به اثبات رسیده است. برای این منظور دوز ۲mg/kg به موش داده شد و پس از ۷ روز ارگانهای حیاتی موش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نانوذرات اکسید مس بدون کوچکترین سمیتی از اندامهای حیاتی بدن جدا می‌شوند [۴]. خطرات ناشی از استفاده از CONP ها جنبه مهمی است که برای استفاده ایمن و مؤثر از آنها باید مورد توجه قرار بگیرد. اگرچه مقالات کمی در رابطه با سمیت نانوذرات فلزی وجود دارد، اما ایجاد ویژگی سمیت توسط نانوذرات فلزی در بافت انسان گزارش شده است. به طور معمول سمیت نانوذرات فلزی به اندازه و بار سطحی آنها بستگی دارد. همچنین نتایج نشان داده است که که نانوذرات نسبت به

مس به دلیل ویژگی‌های خاص و نیز ارزانی و فراوانی در پزشکی مور توجه خاص قرار دارد. نانوذرات اکسید مس با کمک عصاره‌های متفاوت گیاه مانند *Ficus religioss* و *Aalalha indica* سنتز می‌شوند. به این روش سنتز سبز نانوذرات گفته می‌شود که به نظر می‌رسد روش قابل اعتماد، ساده، غیر سمی و سازگار با محیط زیست است. این نانوذرات اثرات سمیت سلولی را با ایجاد آپوپتوز و افزایش تولید ROS در سلول‌های سرطانی ریه انسان نشان داده‌اند [۱]. نانوذرات فلزی مس باعث بروز آپوپتوز در ملانوم پوست انسان می‌شوند [۲]. همچنین، اثر مهارکنندگی رشد سلول‌های سرطان سینه انسان با استفاده از کورکومین با پوشش نانوذرات مس نیز گزارش شده است [۳]. نانوذرات اکسید مس برای درمان ملانوما و متاستاز تومورهای ریه موش نیز به کار

¹ Copper oxide nanoparticles

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۰۷

بر زیرلایه که در فاصله مشخصی از چشمه ثابت شده است، تشکیل شود. فاصله بین محل قرار گرفتن زیرلایه و چشمه مس پارامتر مهمی است که می‌تواند بر ویژگی‌های لایه نازک مس ایجاد شده تاثیر بگذارد و حتی انتخاب نامناسب آن می‌تواند باعث ایجاد لایه با کیفیت نامطلوب و یا مقدار بسیار پایین لایه‌نشانی شود. روش‌های تجربی و نظری می‌توانند برای بررسی تاثیر این پارامتر اتخاذ شوند. بررسی نظری به دلیل قابلیت پیش‌بینی نتایج بدون صرف زمان و هزینه حائز اهمیت است.

روش‌های متفاوتی برای شبیه‌سازی لایه‌نشانی لایه‌های نازک مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش مونت کارلوی جنبشی (KMC)^۲، جانشانی اتم‌های تعدیل یافته (MEAM)^۳، دینامیک مولکولی (MD)^۴ و روش المان محدود (FEM)^۵ اشاره کرد [۲۱-۲۴].

در این مقاله، فرایند لایه‌نشانی لایه نازک مس با استفاده از روش تبخیر حرارتی شبیه‌سازی و برای نخستین بار تاثیر فاصله چشمه تا محل زیرلایه به صورت تئوری مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- تئوری

در فرایند لایه‌نشانی ضخامت لایه‌های نازک ایجاد شده h_{film} با زمان افزایش می‌یابد. تغییرات زمانی ضخامت لایه نازک مس برابر است با [۲۵]:

$$\frac{dh_{film}}{dt} = \frac{M_n G}{N_A \rho_{film}} \quad (1)$$

که در اینجا ρ_{film} چگالی لایه نازک، M_n جرم مولی، N_A عدد اتمی مس و G شار بخار مولکول در طی لایه‌نشانی به روش تبخیر حرارتی است که با رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$G = - \int_{S'} \frac{J'(nr)(n'r)}{\pi r^4} dS' \quad (2)$$

که در اینجا J چگالی جریان بخار است و انتگرال روی سطح گرفته می‌شود. فشار بخار برابر است با:

$$P = - \int_{S'} \frac{J'(nr)^2 (n'r)}{\pi r^5} \frac{M_n}{N_A} \langle C'_{3D} \rangle dS' + \frac{2JM_n}{3N_A} \quad (3)$$

میکروصفحات دارای ویژگی سمیت بسیار بیشتری هستند [۵]. به تازگی، ساخت لایه‌های نازک حاوی مس با ویژگی ضدباکتریایی گزارش شده است [۶]. همچنین، ویژگی ضدقارچی لایه‌های نازک مس ارائه و پایداری آنها مورد بررسی قرار گرفته است [۷].

لایه‌های نازک مس در حسگرهای امنیتی، پزشکی و حسگرهایی که دما و پارامترهای حیاتی بدن را چک می‌کنند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. ضخامت این لایه‌های نازک و مقدار یکنواختی آنها بسیار مهم است و باید به دقت مورد بررسی قرار گیرد [۸]. افزون بر این، سرطان یکی از چالش‌های مهمی است که جامعه انسانی با آن روبرو است. روش‌های غیرتهاجمی درمان سرطان بر پایه درمان با لیزر و نانوذرات متفاوت توسعه یافته‌اند. برای این منظور استفاده از نانوذرات و لیزرهای متفاوت به صورت تئوری و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است [۹-۱۳]. نانوذرات اکسید مس به عنوان گزینه مناسب برای درمان مطرح هستند. افزون بر موارد بالا، به تازگی اختراع لیزرهای فیبر قفل شده مد آلائیده به تولید گزارش شده است که از لایه نازک مس به عنوان جاذب اشباع-پذیر استفاده می‌کند [۱۴].

از دیگر کاربردهای لایه نازک مس می‌توان به جاذب نور خورشید و نیز به عنوان یک زیرلایه مناسب برای لایه نشانی مواد دیگر مانند گرافن اشاره کرد که در پژوهش‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱۵-۱۹].

با توجه به موارد بالا، لایه‌های نازک مس بسیار حائز اهمیت و کاربردی هستند و دستیابی به اطلاعات مناسب در مورد این لایه‌های نازک می‌تواند منجر به رهیافت مناسب برای دستیابی به لیزرها، حسگرها و شرایط درمان مناسب‌تر شود. لایه‌نشانی فیزیکی از فاز بخار (PVD) یکی از روش‌های متداول برای ایجاد لایه‌های نازک مس به شمار می‌رود. این لایه‌ها را می‌توان با انجام عملیات پس از/ در حین لایه‌نشانی (مانند بازپخت، بمباران یونی و ..) به نانو ساختارهای موردنظر نیز تبدیل کرد [۱۹]. روش تبخیر حرارتی به دلیل سادگی نسبی، کم هزینه بودن نسبت به روش‌های مشابه، و نرخ بالای لایه‌نشانی برای ایجاد لایه نازک فلزی مناسب است [۲۰]. در این روش ماده مورد نظر به عنوان چشمه یا منبع در محفظه خلأ با اعمال جریان الکتریکی یا باریکه الکترونی تبخیر شده و بخارات حاصل در اثر اختلاف فشار به سمت زیرلایه گسیل می‌شوند تا در نهایت یک لایه جامد نازک

² Kinetic Monte Carlo

³ Modified embedded-atom method

⁴ Molecular dynamics

⁵ Finite element method

که در اینجا:

$$\langle C'_{3D} \rangle = \sqrt{\frac{9\pi RT'}{8M_n}} \quad (4)$$

چگالی تعداد n نیز در طی این فرایند با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$n = - \int_{S'} \frac{J'(n.r)}{\pi r^5} \left\langle \frac{1}{C'_{3D}} \right\rangle dS' + 2 \left\langle \frac{1}{C'_{3D}} \right\rangle J \quad (5)$$

که در اینجا:

$$\left\langle \frac{1}{C'_{3D}} \right\rangle = \sqrt{\frac{\pi M_n}{8RT'}} \quad (6)$$

شار گرمایی Q نیز برابر است با:

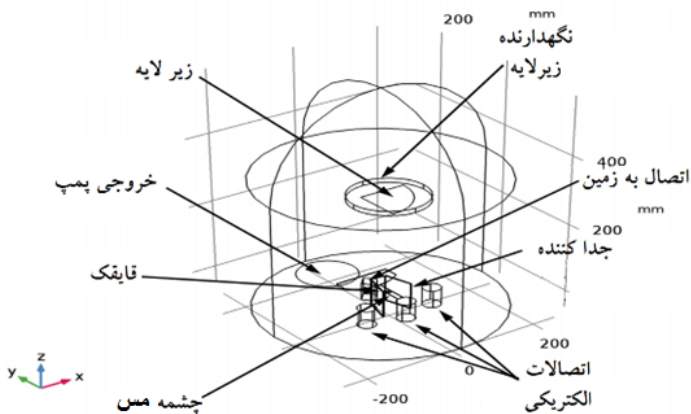
$$Q = - \int_{S'} \frac{J'(n.r)(n'.r)}{\pi r^4} \frac{M_n}{N_A} \langle C'^2_{3D} \rangle dS' - \frac{1}{2} \frac{M_n}{N_A} \langle C'^2_{3D} \rangle \quad (7)$$

که در آن:

$$\langle C'^2_{3D} \rangle = \sqrt{\frac{4RT'}{8M_n}} \quad (8)$$

در شکل ۱ محفظه طراحی شده برای لایه‌نشانی تبخیر حرارتی نشان داده شده است. زیرلایه بر نگهدارنده‌ای با فاصله جدایی d از چشمه قرار گرفته است.

برای دستیابی به اطلاعات مناسب در مورد تاثیر فاصله چشمه تا محل زیرلایه بر فرایند لایه‌نشانی به روش PVD و ضخامت لایه نازک مس باید معادلات حاکم بر مسئله به همراه شرایط مرزی و اولیه حل شوند. با توجه به اینکه هدف این مقاله بررسی تاثیر فاصله چشمه تا محل زیر لایه بر ضخامت و یکنواختی لایه نازک مس است، بنابراین مقادیر متفاوت فاصله چشمه تا محل زیر لایه شامل ۱۳، ۱۸، ۲۳، ۲۸ و ۳۳ سانتیمتر در شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است و بقیه پارامترها مانند دمای چشمه و دمای زیر لایه در هر مرحله یکسان در نظر گرفته شده است. هندسه به کار رفته در شبیه‌سازی که در تطابق با دستگاه موجود در آزمایشگاه‌های پژوهشی است، در شکل ۱ نشان داده شده است. مقادیر کمیت‌های استفاده شده در محاسبات نیز در جدول ۱ گردآوری شده است.



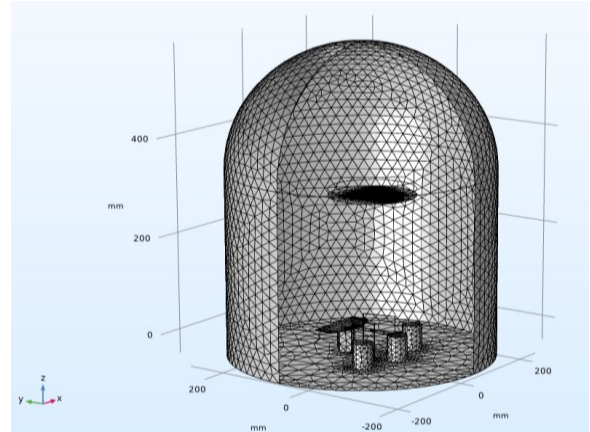
شکل ۱: هندسه و ساختار به کار رفته در شبیه‌سازی‌ها.

به منظور شبیه‌سازی مش‌بندی نواحی متفاوت، متفاوت انتخاب شده است. این مش‌بندی در نواحی کوچک مثل سطح زیرلایه ریزتر و در نواحی بزرگتر مثل محفظه بزرگتر انتخاب شده است. نمایی از مش‌بندی در شکل ۲ نشان داده شده است. ریزکردن زیاد مش‌بندی باعث زمان طولانی محاسبات می‌شود. از طرفی انتخاب مقادیر بزرگ نیز منجر به کاهش دقت محاسبات می‌شود، بنابراین، انتخاب مناسب مش‌بندی الزامی است. در این شبیه‌سازی مش‌بندی‌های متغیر در نواحی متفاوت استفاده شده است تا دقت بالا ایجاد شود و از طرفی زمان محاسبه خیلی زیاد نشود.

جدول ۱: مقادیر کمیتهای به کار رفته در شبیه‌سازی.

نوع ماده	وزن مولکولی (gr/mol)	دمای بخار در		
		چگالی (g/cm ³)	فشار ۱۰۰ Pa (K)	دمای زیرلایه (K)
Cu (مس)	۶۳/۵۵	۸/۹۶	۱۸۵۴	۲۹۳/۱۵

به منظور بررسی دقیق‌تر در شکل‌های ۴-الف تا ۴-ه نمودارهای توزیع فشار بخار وارد بر لایه در زمان ۱۲۰ s برای پنج ساختار متفاوت به ازای ۱۳، ۱۸، ۲۳، ۲۸، ۳۳cm نشان داده شده است. همانطور که از این شکل دیده می‌شود، توزیع فشار بر لایه همواره به صورت متقارن بوده و در مرکز بیشترین مقدار خود را دارد. همچنین، بیشینه فشار بخار مس با افزایش فاصله چشمه تا زیرلایه از ۱۳ تا ۳۳ سانتیمتر، از 6×10^{-2} Pa تا $9/8 \times 10^{-3}$ Pa کاهش یافته است.

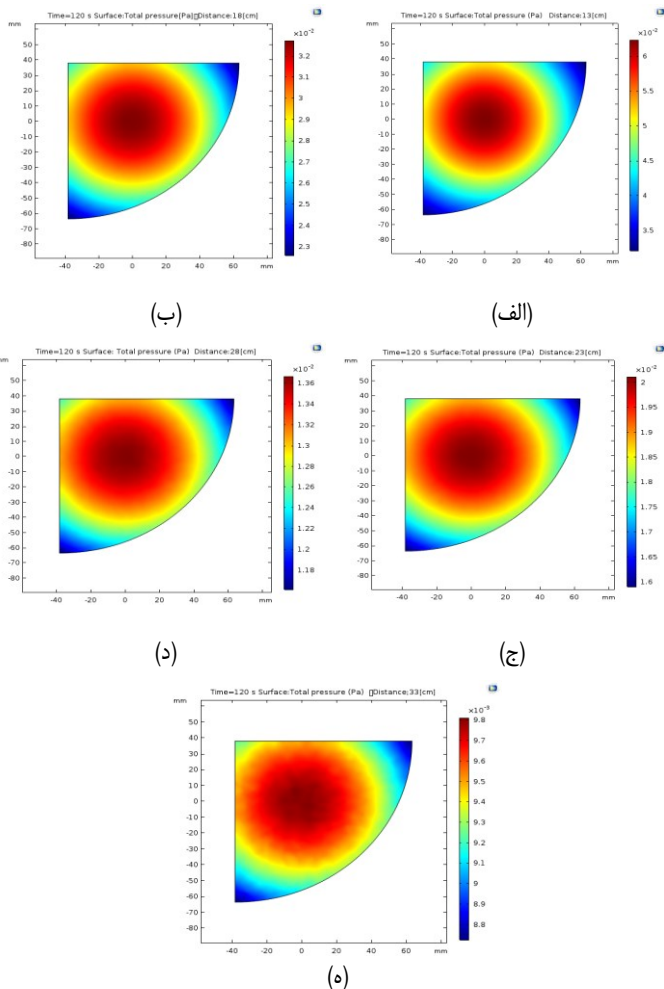


شکل ۲: نمایی از مش‌بندی به کار رفته در شبیه‌سازی.

۳- نتایج و بحث

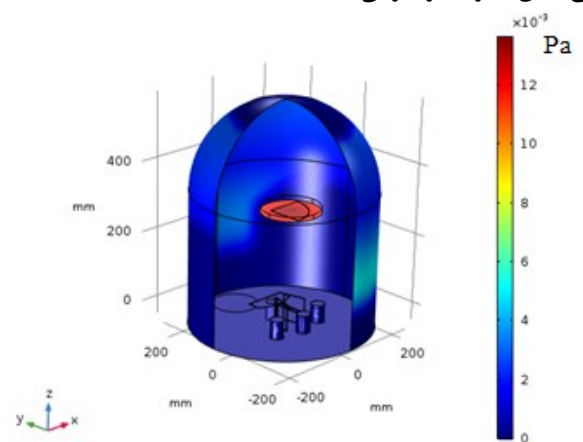
فاصله منبع تبخیر تا سطح زیرلایه d یکی از پارامترهای مهم و تاثیرگذار بر فرایند لایه نشانی به روش تبخیر حرارتی است و انتخاب نامناسب این فاصله می‌تواند منجر به نتایج جبران‌ناپذیری مثل نایکنواختی بیش از حد لایه نازک و یا بازده پایین شود، بنابراین در این مقاله به بررسی تاثیر فاصله چشمه تا محل زیرلایه پرداخته شده است. برای این منظور، ساختارهایی با فواصل متفاوت چشمه تا محل زیر لایه ۱۳، ۱۸، ۲۳، ۲۸ و ۳۳ سانتیمتر در شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است.

شکل ۳ نمودار توزیع فشار بخار در کل محفظه مربوط به ساختاری با فاصله چشمه تا زیرلایه $d=28$ cm در زمان ۱۲۰s را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌کنید، بیشترین فشار در محل زیرلایه است و فشار در سایر سطوح بسیار ناچیز و با تقریب خوبی قابل صرفنظر کردن است.



شکل ۴: نمودارهای توزیع فشار در زمان ۱۲۰s و در محل لایه برای ساختارهای به‌دست آمده به ازای فاصله بین چشمه تا محل زیرلایه (الف) ۱۳cm، (ب) ۱۸cm، (ج) ۲۳cm، (د) ۲۸cm و (ه) ۳۳cm.

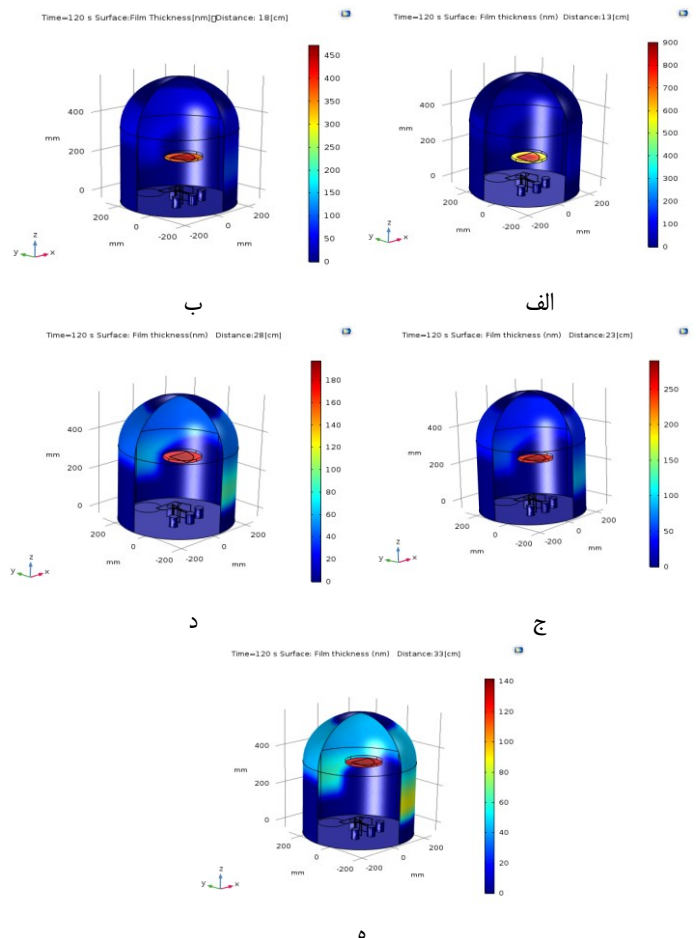
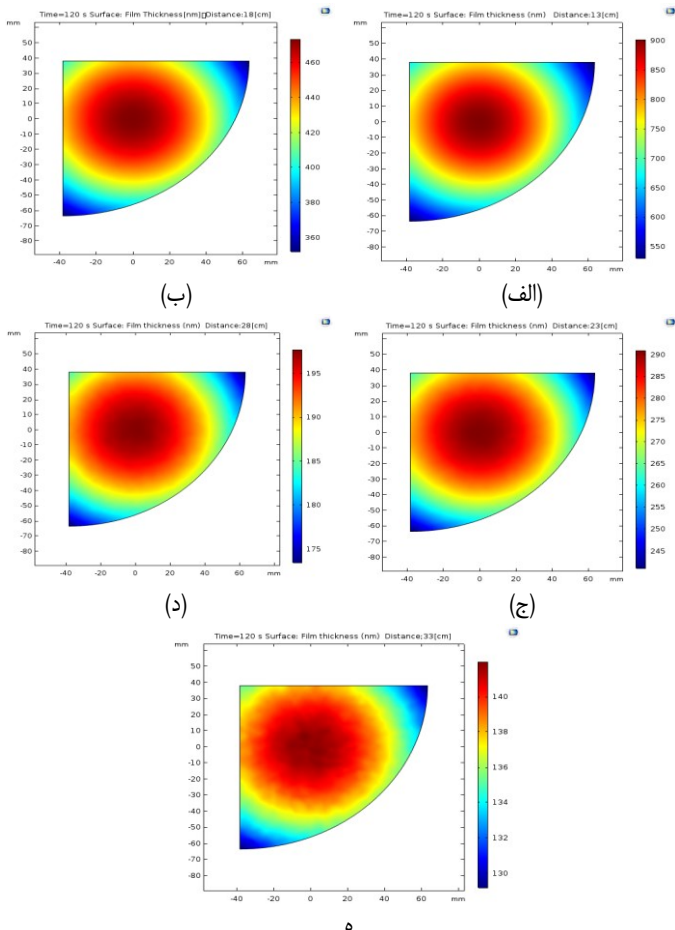
نمودارهای توزیع ضخامت لایه نازک در سطوح متفاوت ساختارهایی با ۱۳، ۱۸، ۲۳، ۲۸، ۳۳cm d پس از ۱۲۰s در شکل‌های ۵ نشان داده شده است. بیشترین ضخامت لایه در تمام ساختارها بر زیرلایه ایجاد شده است، اما در هر حال



شکل ۳: نمودار توزیع فشار در محفظه و به ازای فاصله چشمه تا زیرلایه $d=28$ cm و زمان ۱۲۰ ثانیه.

در شکل ۶ برای درک بهتر تاثیر d به عنوان پارامتر مهم هندسی بر لایه نازک، نمودارهای توزیع ضخامت لایه نازک در محل زیرلایه پس از ۱۲۰s برای ساختارهای شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که ضخامت لایه نازک با افزایش d به طور قابل توجهی کاهش یافته است. با این وجود در تمامی ساختارها توزیع ضخامت لایه متقارن است و بیشترین ضخامت لایه در مرکز زیرلایه قرار داشته و با افزایش فاصله از مرکز این ضخامت کاهش می‌یابد. البته روند کاهش ضخامت در ساختارهای متفاوت متفاوت است و نیاز به بررسی دقیق‌تر دارد. برای این منظور نمودار سه‌بعدی توزیع ضخامت این ساختارها در زمان ۱۲۰s در شکل ۷ نشان داده شده است و برآزش انجام شده موید مناسب بودن تابع گاوسی (۹) است:

ضخامت این لایه‌های نازک به شدت تابع فاصله چشمه تا محل زیرلایه است. به طوریکه افزایش فاصله چشمه تا زیرلایه از ۱۳ تا ۳۳ سانتیمتر منجر به کاهش بیشینه ضخامت لایه نازک از $897/0\text{nm}$ تا $141/8\text{nm}$ می‌شود. این پدیده در واقع ناشی از افزایش شار ذرات بخار مس با کاهش فاصله d می‌شود. نکته حائز اهمیت دیگر ایجاد ضخامت قابل توجه لایه بر سطح دیواره جانبی به ازای $d \geq 28\text{cm}$ است. در حالی که، این ضخامت در شرایط $d=13\text{cm}$ تقریبی صفر است. بیشترین ضخامت لایه ایجاد شده بر زیرلایه نیز در $d=13\text{cm}$ مشاهده می‌شود. با توجه به مطالب بالا فاصله چشمه تا محل زیرلایه پارامتر هندسی تاثیرگذاری است که نه تنها ضخامت لایه نازک را تحت تاثیر قرار می‌دهد بلکه عامل موثری بر ایجاد لایه نازک در سطوح جانبی است و بازده فرایند لایه‌نشانی را تحت تاثیر خود قرار می‌دهد.

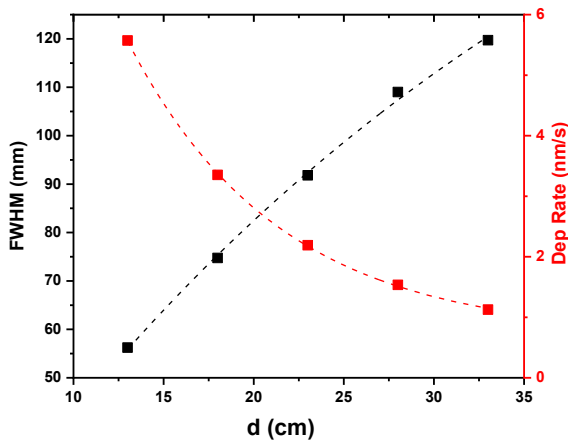


شکل ۶: نمودارهای توزیع ضخامت لایه مس تشکیل شده بر روی زیرلایه در زمان ۱۲۰s به ازای فاصله بین چشمه تا محل زیرلایه (الف) 13cm ، (ب) 18cm ، (ج) 23cm ، (د) 28cm و (ه) 33cm .

شکل ۷: نمودارهای توزیع ضخامت لایه ایجاد شده در زمان ۱۲۰s در کل محفظه و روی زیرلایه به ازای فواصل متفاوت چشمه تا محل زیرلایه (الف) 13cm ، (ب) 18cm ، (ج) 23cm ، (د) 28cm و (ه) 33cm .

$$FWHM = -221.70 \exp(-d / 37.74) + 212.95 \quad (10)$$

$$Dep. Rate = 23.03 \exp(-d / 8.36) + 0.70 \quad (11)$$



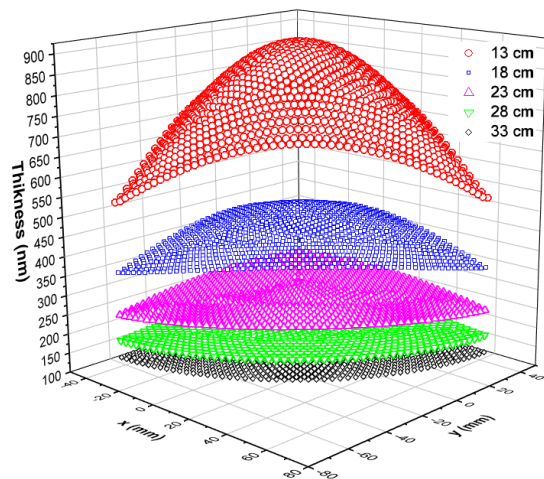
شکل ۸: تغییرات FWHM تابع توزیع ضخامت لایه و نرخ لایه نشانی بر حسب فاصله چشمه تا زیر لایه.

این روابط عملاً امکان انتخاب مناسب فاصله چشمه تا زیر لایه d را فراهم می‌کنند. به طور مثال، در موارد کاربردهای متداول که حساسیت شدیدی در مورد یکنواختی ضخامت لایه نازک وجود ندارد، گستره فاصله چشمه تا زیر لایه ۲۰ تا ۲۵ سانتیمتر می‌تواند مناسب باشد و اگر ساختارهای با ضخامت یکنواخت‌تر مورد نظر باشد باید $d \geq 28$ cm انتخاب شود.

تحول زمانی ضخامت لایه‌های نازک نیز عامل مهمی است که تاکنون در این مقاله به آن به طور کامل پرداخته نشده است. در شکل ۹ نمودار تحول زمانی ضخامت لایه‌های ایجاد شده به ازای d های شکل ۷ آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود ضخامت لایه‌های نازک مربوط به فواصل متفاوت در هر زمان متفاوت است و در تمام زمانها ضخامت لایه ایجاد شده به ازای $d=33$ cm و $d=13$ cm به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار است.

$$z = z_0 + A \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - x_c}{w_1} \right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{y - y_c}{w_2} \right)^2 \right] \quad (9)$$

بررسی FWHM یا پهنای ضخامت لایه ایجاد شده برای ساختارهای متفاوت نشان می‌دهد که افزایش فاصله چشمه تا زیر لایه در گستره ۱۳ تا ۳۳ سانتیمتر منجر به افزایش FWHM تغییر چشمگیر نشان دهنده اهمیت زیاد انتخاب درست این کمیت یعنی فاصله چشمه تا زیر لایه است. هرچه این پهنای تابع بیشتر باشد، لایه به دست آمده دارای ضخامت یکنواخت‌تر و بنابراین مطلوب‌تر است.

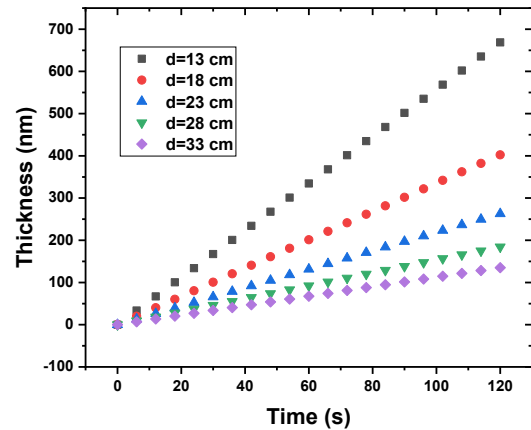


شکل ۷: نمودارهای سه بعدی توزیع ضخامت لایه نازک مس در زمان ۱۲۰s به ازای فاصله بین چشمه تا محل زیر لایه $d=13, 18, 23, 28, 33$ cm.

با توجه به نتایج به دست آمده فاصله چشمه تا محل زیر لایه d بر روی دو کمیت مهم لایه‌نشانی یعنی FWHM و نرخ لایه‌نشانی بسیار تاثیرگذار است. افزایش این فاصله منجر به افزایش FWHM و کاهش مقدار لایه‌نشانی می‌شود. بنابراین، انتخاب مناسب این کمیت با توجه به کاربرد و اهمیت لایه نازک بسیار مهم است. در شکل ۸ نمودار FWHM و نرخ لایه‌نشانی بر حسب فاصله چشمه تا محل زیر لایه نشان داده شده است. نتایج برازش تابع نمایی با دقت بالا ($R^2 \geq 0.997$) به این نمودارها نشان می‌دهد که رابطه FWHM و نرخ لایه‌نشانی (Dep. Rate) با فاصله بین چشمه تا محل زیر لایه d به صورت زیر است:

مراجع

- [1] A. Sharma, A. K. Goyal, and G. Rath, "Recent advances in metal nanoparticles in cancer therapy," *Journal of drug targeting*, 26, 617-632, 2018.
- [2] R. Chakraborty and T. Basu, "Metallic copper nanoparticles induce apoptosis in a human skin melanoma A-375 cell line," *Nanotechnology*, 28, 105101-105111, 2017.
- [3] S. Kamble et al., "Evaluation of curcumin capped copper nanoparticles as possible inhibitors of human breast cancer cells and angiogenesis: a comparative study with native curcumin," *AAPS PharmSciTech*, 17, 1030-1041, 2016.
- [4] A.C. Anselmo and S. Mitragotri, "A review of clinical translation of inorganic nanoparticles," *The AAPS journal*, 17, 1041-1054, 2015.
- [5] J.K. Kim et al., "Therapeutic application of metallic nanoparticles combined with particle-induced x-ray emission effect," *Nanotechnology*, 21, 425102-425208, 2010.
- [6] T. Kruk et al., "Nanocomposite multifunctional polyelectrolyte thin films with copper nanoparticles as the antimicrobial coatings," *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 181, 112-118, 2019.
- [7] X. Huang, A. B. Schubert, J. D. Chrisman, and N. S. Zacharia, "Formation and tunable disassembly of polyelectrolyte-Cu²⁺ layer-by-layer complex film," *Langmuir*, 29, 12959-12968, 2013.
- [8] E. Korzeniewska, A. Szczyński, J. Jóźwik, and A. Tofil, "Computer measurement of the friction of thin metal structure created in PVD technology on the flexible substrate," in *MATEC Web of Conferences*, 252, 09005:-09015, 2019.
- [9] M. Aliannezhadi, M. Minbashi, and V.V. Tuchin, "Effect of laser intensity and exposure time on photothermal therapy with nanoparticles heated by a 793-nm diode laser and tissue optical clearing," *Quantum Electronics*, 48, 559-567, 2018.
- [10] H. Ahmadian, F.S. Tehrani, and M. Aliannezhadi, "Hydrothermal synthesis and



شکل ۹: نمودار تحول زمانی ضخامت لایه‌های نازک مس به ازای فواصل متفاوت چشمه تا زیرلایه.

۴- نتیجه‌گیری

لایه‌های نازک مس به طور گسترده در پزشکی و صنعت کاربرد دارند. از جمله کاربردهای این لایه‌های نازک می‌توان به کاربرد در حسگرهای امنیتی، حسگرهای پزشکی و حسگرهایی که دما و پارامترهای حیاتی بدن را چک می‌کنند، صفحات خورشیدی، لیزرهای قفل‌شده مد، درمان سرطان و ... اشاره کرد. در این مقاله، فرایند ایجاد لایه نازک مس با روش تبخیر حرارتی به صورت نظری مورد بررسی قرار گرفت و تاثیر فاصله بین چشمه مس و زیرلایه به عنوان یک پارامتر مهم بر لایه نازک تشکیل شده، مطالعه شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که فشار بخار مس وارد بر سطح زیرلایه با افزایش فاصله چشمه تا زیر لایه d به شکل قابل توجهی کاهش می‌یابد. همچنین، بررسی ضخامت لایه‌های نازک در دیواره‌ها و نیز زیر لایه به شدت به فاصله چشمه و زیرلایه بستگی دارد و با افزایش این فاصله ضخامت لایه در محل زیرلایه و دیواره‌های محفظه به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. در تمام ساختارها افزایش خطی ضخامت لایه با زمان مشاهده شد اما شیب این افزایش متفاوت است و این شیب یا به عبارتی مقدار لایه‌نشانی با افزایش این فاصله به صورت نمایی کاهش می‌یابد. بنابراین افزایش این فاصله باعث کاهش بازده لایه نشانی خواهد شد. از طرفی، افزایش این فاصله باعث افزایش FWHM یا به عبارتی یکنواختی بیشتر ضخامت لایه می‌شود. بنابراین با توجه به کاربرد لایه نازک مس می‌توان فاصله بهینه چشمه تا زیرلایه را انتخاب و فرایند لایه‌نشانی را انجام داد.

- [21] H.D. Espinosa and B. Prorok, "Size effects on the mechanical behavior of gold thin films," *Journal of Materials Science*, 38, 4125-4128, 2003.
- [22] C. Claassens, J. Terblans, M. Hoffman, and H. Swart, "Kinetic Monte Carlo simulation of monolayer gold film growth on a graphite substrate," *Surface and Interface Analysis: An International Journal devoted to the development and application of techniques for the analysis of surfaces, interfaces and thin films*, 37, 1021-1026, 2005.
- [23] E. Chason and A. F. Bower, "Kinetic Monte Carlo simulations of stress and morphology evolution in polycrystalline thin films," *Journal of Applied Physics*, 125, 115304-115314, 2019.
- [24] T. van Opstal and B. van der Linden, "Modeling of Chemical Vapor Deposition at the Pore-Scale Using Finite Cell Method," 2019.
- [25] M. Ohring, *Materials science of thin films*. 2001.
- characterization of WO₃ nanostructures: effects of capping agent and pH," *Materials Research Express*, 6, 1050210-1050217, 2019.
- [11] S. Soni and R. K. Sinha, "Tumor blood perfusion-based requirement of nanoparticle dose-loadings for plasmonic photothermal therapy," *Nanomedicine*, 14, 1841-1855, 2019.
- [12] M. Aliannezhadi, S. Amini, M. Taghizadeh, and M. Heidari, "The Effect of Light Fluence Rate on Photodynamic Therapy," (in eng), *Laser in Medicine, Research* 16, 26-18, 2019.
- [13] M. Aliannezhadi, A.H. Mollazadeh, and M. Minbashi, "The effect of nano particles and laser intensity on cancer therapy and Tissue temperature variations after irradiation," (in eng), *Laser in Medicine*, 13, 11-20, 2018.
- [14] A. Muhammad, M. Ahmad, R. Zakaria, P. Yupapin, S. Harun, and M. Yasin, "Mode-locked thulium doped fibre laser with copper thin film saturable absorber," *Journal of Modern Optics*, 14, 1-5, 2019.
- [15] M.J. Kadhim, K.A. Sukkar, and A.S. Abbas, "Copper Thin Film Deposited By PVD on Aluminum AA4015 Substrate for Thermal Solar Application," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 518, 032048-032055, 2019..
- [16] C.E. Kennedy, "Review of mid-to high-temperature solar selective absorber materials," *National Renewable Energy Lab.*, 13, 114-120, 2002.
- [17] X. Xu et al., "Ultrafast epitaxial growth of metre-sized single-crystal graphene on industrial Cu foil," *Science bulletin*, 62, 1074-1080, 2017.
- [18] T. Ma, H. Ariga, S. Takakusagi, and K. Asakura, "Smooth epitaxial copper film on sapphire surface suitable for high quality graphene growth," *Thin Solid Films*, 646, 12-16, 2018.
- [19] P.A. Pivovarov et al., "Crystallization of Thin Copper Films on Silica Substrate for Graphene Growth," *physica status solidi (b)*, 16, 1800685-1800691, 2019.
- [20] A. Lakhtakia and R.J. Martín-Palma, *Engineered biomimicry*. Newnes, 18, 112-120, 2013.



Theoretical study on the effect of source-to-substrate distance on copper thin film deposited by thermal evaporation technique

J. Alipoor Zardkoobi, F. Shariatmadar Tehrani*, Maryam Aliannezhadi

Faculty of Physics, Semnan University, Semnan, Iran.

Abstract: Copper thin films are widely used in security sensors, medical sensors, solar panels, mode locked laser, cancer treatment, and so on. Thermal evaporation is a common technique for deposition of copper thin films. The distance between the copper source and the substrate is an important parameter that has not been investigated yet. Therefore, the effect of this parameter on the process of copper thin film deposition by thermal evaporation is investigated theoretically in this paper. The results showed that the copper vapor pressure on the substrate surface, the deposition rate and the thickness of the thin layer decreased with increasing this distance, whereas the uniformity of the film thickness improved with increasing the distance. The deposition rate decreased from 5.57nm/s to 1.12 nm/s and the thickness uniformity increases from 56 nm to 120 nm with increasing distance from 13 cm to 33 cm. Also, the dependence of thickness uniformity and deposition rate on the source-to-substrate distance was presented to select the appropriate distance according to the application of the thin layer.

Keywords: Copper thin film, Thermal evaporation, Simulation, Deposition rate, Physical vapor deposition