

## رفتار مقیاسی دینامیک در رشد لایه نازک نقره: روش تبخیر حرارتی

فoadی، فرناز<sup>۱</sup>؛ واعظ علائی، سید مهدی<sup>۲</sup>؛ محمدی زاده، محمدرضا<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> آزمایشگاه پژوهشی ابررسانایی، دانشکده فیزیک دانشگاه تهران، انتهای خیابان کارگر شمالی، تهران

<sup>۲</sup> دانشکده فیزیک دانشگاه تهران، انتهای خیابان کارگر شمالی، تهران

### چکیده

در این مقاله، لایه‌های نازک نقره به روش تبخیر حرارتی، در مدت زمان‌های رشد متفاوت بر روی زیرلایه لام آزمایشگاهی تهیه شده‌اند. زبری لایه‌ها پس از مدت زمان ۶۰ دقیقه به اشباع می‌رسد. نمای زبری سطوح از محاسبه ممان دوم تابع همبستگی ارتفاع-ارتفاع،  $0.88 \pm 0.01$  به دست آمد و از محاسبه ممان‌های بالاتر تابع مذکور، رفتار چند تناسبی سطوح مشاهده شد. به علت زبری اولیه نامعلوم در سطح لام‌ها، امکان استفاده از منحنی مقیاس‌بندی رشد برای این مدل وجود ندارد.

## Dynamic Scaling in Ag Thin Film Growth: Thermal Evaporation Method

Foadi, Farnaz<sup>1</sup> ; Vaez Allaei, Seyed Mehdi<sup>1</sup>; Mohammadzadeh, Mohammad Reza<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Superconductivity Research Laboratory, Department of Physics, University of Tehran, Tehran

### Abstract

In this paper, vapor-deposited silver thin films on glass laboratory slides have been prepared in different growth time interval. The surface roughness saturates at 60 minutes. Effective surface roughness exponent is calculated from the second moment of height-height correlation function ( $\alpha=0.88\pm 0.01$ ). Also by considering higher moments of this function, multi-affinity of surfaces was seen. Due to unknown glass roughness, definition of a special universality class for this growth is impossible.

PACS No. 68.35

### مقدمه

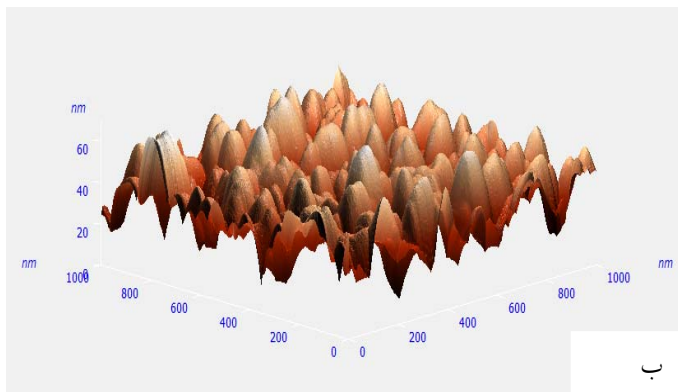
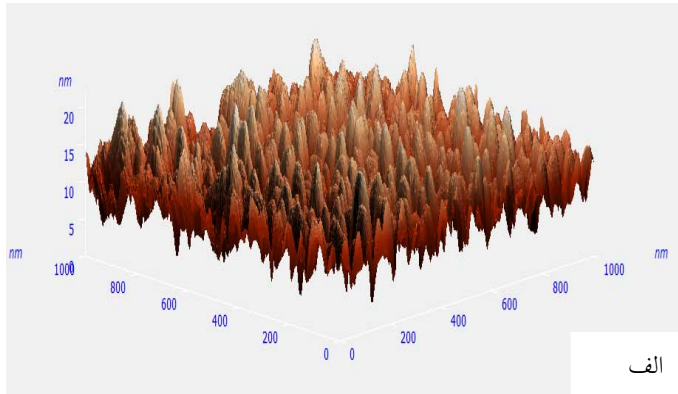
عمودی و فضایی روشی مناسب برای استخراج اطلاعات مورد نظر برای سطح رشد داده شده است. بررسی رفتار مقیاسی و خصوصیات آماری لایه نازک نقره در بسیاری مقالات انجام شده است. به عنوان مثال می‌توان به کار تامسون<sup>۱</sup> در رشد لایه نازک نقره بر روی زیرلایه سیلیکون اشاره کرد که نمای زبری و نمای رشد را برای لایه‌های رشد داده شده، به ترتیب  $0.78$  و  $0.26$  به دست آورده است [۱۱]. همچنین پالاسانتزاس<sup>۲</sup> و همکارانش در مقاله رشد لایه نقره بر روی کوارتز

زبری فصل مشترک مشخصه‌ی مهمی است که بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی لایه‌های نازک را تعیین می‌کند [۲۱]. در دو دهه اخیر، توجه زیادی به فرآیند رشد جنبشی سطح حین فرآیند لایه‌نشانی [۳ و ۴] و شبیه سازی‌های عددی شده [۵-۷] و کارهای تجربی [۸-۱۰] برای بررسی تکامل رشد فصل مشترک انجام گرفته است.

در حالت کلی بررسی زبری یک لایه نازک را می‌توان با کمک روش‌های اِپتیکی، مکانیکی و یا میکروسکوپ نیروی اتمی به دست آورد. در این میان، میکروسکوپ نیروی اتمی با بزرگنمایی بالای

<sup>۱</sup> Thompson

<sup>۲</sup> Palasantzas



شکل ۱: توپوگرافی سطح لایه‌های نازک نقره در زمان‌های لایه‌نشانی الف) ۲۰ و ب) ۱۲۰ دقیقه.

جذر میانگین مربع زبری برای تمام نمونه‌های رشد داده شده به قرار ذیل است:

جدول ۱: مقادیر جذر میانگین مربع زبری برای نمونه‌های مختلف.

زمان لایه‌نشانی (دقیقه)	جذر میانگین مربع زبری (نانومتر)
۵	$0.84 \pm 0.02$
۱۰	$1.07 \pm 0.02$
۲۰	$2.26 \pm 0.01$
۲۵	$2.45 \pm 0.01$
۳۰	$3.34 \pm 0.09$
۴۰	$5.97 \pm 0.01$
۵۰	$6.19 \pm 0.02$
۶۰	$10.58 \pm 0.03$
۹۰	$10.7 \pm 0.03$
۱۲۰	$9.49 \pm 0.01$

مقادیر نمای زبری و نمای رشد را  $0.82$  و  $0.29$  به دست آوردند [۱۲]. کارهای تجربی دیگری در این راستا انجام شده و رفتار مقیاسی رشد مورد بررسی قرار گرفته است [۱۳ و ۱۴]. اما، رشد لایه نازک نقره با نرخ بالا و تاثیر آن در فرآیند رشد و مقیاس‌بندی آن مورد مطالعه قرار نگرفته است.

در این مقاله، لایه نازک نقره بر روی زیرلایه لام آزمایشگاهی، با روش تبخیر حرارتی و با توان بالا ( $3/3$  وات) تهیه و مورفولوژی سطح با کمک میکروسکوپ نیروی اتمی مطالعه شده است.

### روش آزمایشگاهی

لایه‌های نازک نقره در زمان‌های مختلف شامل ۱۰، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه به روش تبخیر حرارتی فیزیکی و با توان  $3/3$  وات و فشار پایه  $10^{-5}$  میلی‌بار در دمای اتاق لایه‌نشانی شده‌اند.

قبل از شروع هر آزمایش (۹ مرحله لایه‌نشانی)، مقدار  $0.1$  گرم نقره با خلوص  $99.999\%$  وزن گردیده است تا مقدار ماده ثابت بوده و بر نرخ لایه‌نشانی تاثیر نگذارد. همچنین نقره و زیرلایه را قبل از انجام آزمایش به مدت پنج دقیقه به ترتیب با استون، الکل و آب دیونیزه در حمام اولتراسونیک شستشو داده‌ایم.

بلافاصله پس از هر لایه‌نشانی، برای هر نمونه اندازه‌گیری‌های میکروسکوپ نیروی اتمی<sup>۳</sup> با تیپ  $Si_3N_4$  و در مد شبه-تماسی انجام شده است. فرکانس تیپ  $1/95$  مگاهرتز است. از هر نمونه تعداد هفت تصویر در پنجره  $1 \times 1$  میکرومتر مربع و با وضوح  $1024 \times 1024$  پیکسل و از مکان‌های مختلف آن تهیه شده و سپس از مقادیر زبری میانگین‌گیری شده است.

### نتایج و بحث

توپوگرافی سه‌بعدی نمونه‌های رشد داده شده در زمان‌های ۲۰ و ۱۲۰ دقیقه به‌عنوان مثال در شکل ۱ نشان داده شده است.

## مطالعه آماری رشد سطح

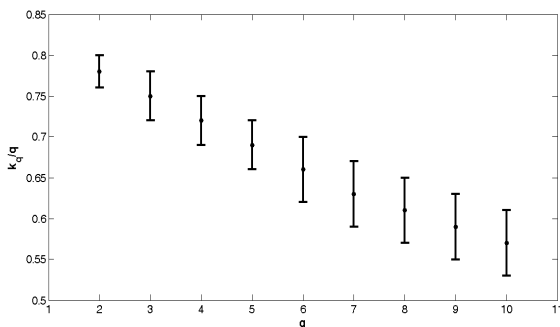
### الف) نمای زبری و بررسی خودتناسبی یا چندتناسبی بودن ساختار

می توان ویژگی های آماری را با جزئیات توسط تابع همبستگی ارتفاع-ارتفاع  $C_q(r) = \langle |h(x) - h(x+r)|^q \rangle$  مطالعه کرد که در آن  $h(x)$  ارتفاع سطح در نقطه  $x$  است. با محاسبه ممان دوم ( $q=2$ ) تابع همبستگی و یافتن شیب در ناحیه قبل از اشباع، نمای زبری به دست می آید. همچنین، برای تعیین خودتناسبی یا چندتناسبی بودن ساختار سطح، ممان های بالاتر ( $q>2$ ) تابع همبستگی تا مرتبه دهم محاسبه شده اند.

به عنوان مثال، شکل ۲ مقادیر  $C_q(r)$  بر حسب  $r$  را برای یک تصویر نمونه ۲۰ دقیقه برای ممان های مختلف تابع همبستگی از مقدار ۲ تا ۱۰ نشان می دهد.

از محاسبات بالا، مقدار نمای زبری برای رشد پس از اشباع  $1.1 \pm 0.1$  به دست می آید. این مقدار نشان می دهد که سطح به خوبی همبسته است.

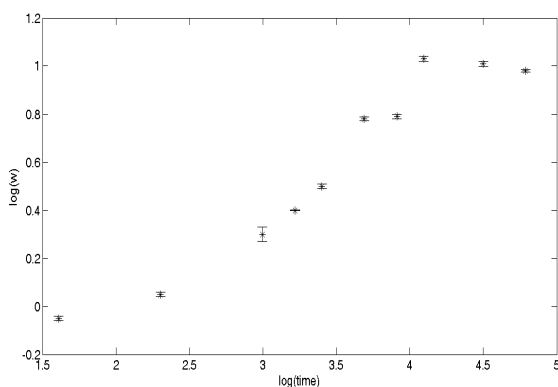
در مرحله بعد و از محاسبات بالا، برای بررسی خودتناسبی یا چندتناسبی بودن ساختار سطح، ممان های بالاتر تابع همبستگی را در نظر گرفتیم. همان طور که می دانیم  $C_q(r) \sim r^{k_q}$  است که در آن اگر رابطه  $k_q \sim q\zeta$  برقرار باشد، ساختار خودتناسبی و در غیر این صورت، ساختار چندتناسبی است.



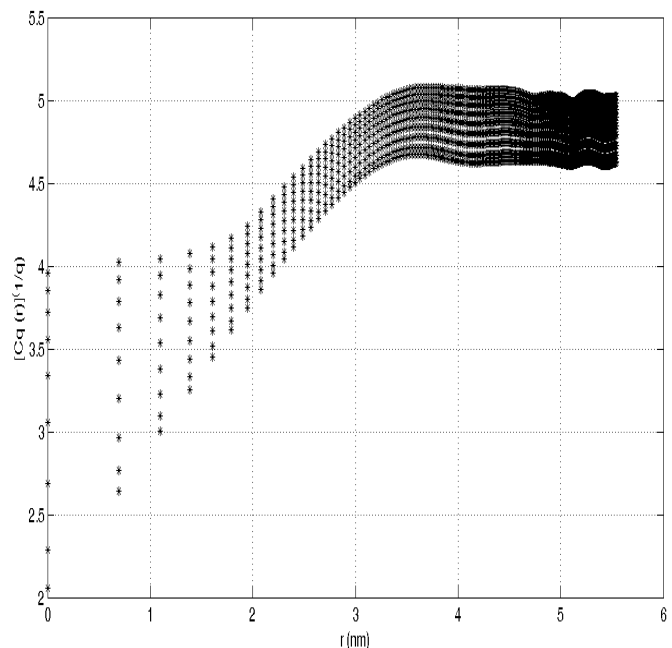
شکل ۳: نمودار  $k_q$  بر حسب  $q$  برای نمونه رشد داده شده در زمان ۲۰ دقیقه که بستگی غیرخطی و در نتیجه ساختار چندتناسبی را نشان می دهد.

### ب) نمای رشد

با رسم نمودار لگاریتم-لگاریتم جذر میانگین مربع زبری بر حسب زمان، رژیم اشباع پس از زمان ۶۰ دقیقه به خوبی قابل مشاهده است.



شکل ۴: نمودار لگاریتم-لگاریتم جذر میانگین مربع زبری بر حسب لگاریتم زمان برای لایه های نازک مختلف.



شکل ۲: نمودار لگاریتم-لگاریتم  $C_q(r)$  بر حسب  $r$  برای یکی از تصاویر نمونه ۲۰ دقیقه. نمودار از پایین به بالا مربوط به ممان دوم تا دهم است.

## نتیجه گیری

بسیاری از پدیده‌ها همچون فشار گاز، دمای زیرلایه و نرخ لایه‌نشانی بر رشد لایه نازک اثر می‌گذارند. با توجه به نمونه‌های رشد داده شده و اینکه زبری لام آزمایشگاهی مجهول است، نمی‌توان کلاس جهان‌شمول در اینجا معرفی کرد. ولی با توجه به اینکه نرخ رشد در لایه‌نشانی‌های انجام شده بالا بوده است، به نظر می‌رسد که عملاً پدیده پخش سطحی حذف شده و سایه‌افکنی در رشد اتفاق می‌افتد [۱۵]. سایه‌افکنی و بازنشر در دینامیک رشد سطح حتی در زوایای عمودی رشد نیز اتفاق می‌افتند و برعکس پدیده پخش، اثرات بلندبرد در زبری فصل مشترک خواهد داشت. پدیده سایه‌افکنی زمانی رخ می‌دهد که نرخ بالای رشد موجب رشد قله‌ها شده و دره‌ها کمتر رشد می‌کنند. بنابراین، این اثر سعی در زبر کردن رشد لایه نازک خواهد داشت. با توجه به نتایج به دست آمده و چندتناسبی بودن سطوح، فرآیند رشد با مدل‌های موجود شناخته شده توافق ندارد.

## مراجع

- [۱] Castro R R, Oliva A I, Sosa V, Caballero-Briones F and Pena J L 2000 Appl. Surf. Sci. 161 340
- [۲] Cheng Y H, Tay B K, Lau S P and Shi X 2001 Surf. Coatings Technol. 146-7 398
- [۳] Freeland D J, Xu Y B, Kernohan E T M, Tselepi M and Bland J A C 1999 Thin Solid Films 343 210
- [۴] Zhao Y P, Drotar J T, Wang G C and Lu T M 1999 Phys. Rev. Lett. 82 4882
- [۵] Zhuang G C, Zhu X B and Wang W 2000 Chin. Phys. Lett. 17 589
- [۶] Wen Y H, Zhou F X and Liu Y W 2001 Chin. Phys. Lett. 18 411
- [۷] Drotar J T, Zhao Y P, Lu T M and Wang G C 1999 Phys. Rev. E 59 177
- [۸] Brown G W, Hawley M E, Theis C D, Yeh J and Schlom D G 1999 Thin Solid Films 357 13
- [۹] Yang H N, Zhao Y P, Wang G C and Lu T M 1996 Phys. Rev. Lett. 76 3774
- [۱۰] Dharmadhikari C V, Ali A O, Suresh N, Phase D M, Chaudhari S M, Ganesan V, Gupta A and Dasannacharya B A 2000 Solid State Commun. 114 377
- [۱۱] Thompson C, Palasantzas G, Feng Y P, Sinha S K and Krim J 1994 Phys. Rev. B 49 4902
- [۱۲] Palasantzas G and Krim J 1994 Phys. Rev. Lett. 73 3564
- [۱۳] Chiarello R, Panella V and Krim J 1991 Phys. Rev. Lett. 67 3408
- [۱۴] Panella V and Krim J 1994 Phys. Rev. E 49 4179
- [۱۵] Carabacak Tansel 2011 J. Nanophotonics 5 052501-1