

## مسمومیت کاتدی در لایه نشانی پلاسمای راکتیو

میرزائی شیخ آبادی، تقی<sup>۱</sup>؛ زاهد، حسین<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>گروه فیزیک دانشگاه بیرجند، بیرجند

<sup>۲</sup>دانشکده علوم پایه دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

### چکیده

علاقه به تحقیق و پژوهش در زمینه پلاسماهای غباری که رشته جدیدی در فیزیک پلاسما می‌باشند با توسعه صنعت میکروالکترونیک و مهندسی سطح رشد چشمگیری داشته است. ذرات غبار که تا کنون به عنوان آلودگی در نظر گرفته می‌شدند، امروزه در فناوری‌های لایه نشانی استفاده می‌شوند. یکی از انواع لایه گذاری، لایه گذاری پلاسمای کندوپاشی راکتیو می‌باشد. به همین جهت بررسی مسمومیت کاتدی که در کندوپاش های راکتیو اتفاق می افتد در فرآیندهای لایه گذاری مهم می باشد. مسمومیت کاتدی سبب ناپایداری در سیستم می شود. این پدیده تاثیر زیادی روی خواص الکتریکی، اپتیکی و ساختاری لایه می گذارد. ترکیب شیمیایی لایه در طول مسمومیت کاتدی تغییر می کند.

## The target poisoning in the plasma reactive deposition

Mirzaye, Taghi<sup>1</sup>; Hosein, Zahed<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Physics Department, Birjand University, Birjand

<sup>2</sup>Sahand Technology University, Tabriz

### Abstract

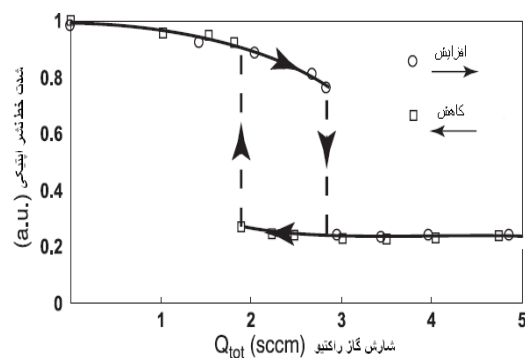
The interest in dusty plasma research, which is a relatively new field in plasma physics, has increased with the development of microelectronics and surface engineering. The dust particles appear as pollutant in this industrial processing. Recently, however, they are seen from a different point of views – they can be useful in coatings various technologies. One the type of deposition is plasma reactive sputtering. The target poisoning in the processes deposition for reactive sputtering is important. The resultant of target poisoning is instability in the system. There have very influence on the electrical, optical and construction properties. The stoichiometry is changing along target poisoning.

PACS NO.81.15.Ef Vacuum deposition

شده است، می‌باشد. کندوپاش راکتیو به صورت کندوپاش هدف در حضور گازهای راکتیو تعریف می‌شود که این گازهای راکتیو با مواد کنده شده از هدف و نیز سطح هدف واکنش می‌دهند. نیاز به لایه گذاری برای مساحت‌های بزرگ و استفاده از زیر لایه‌هایی مانند پلیمر، شیشه و فلزات نرم که به دماهای بالا حساس اند در کنار دلایل اقتصادی و در دسترس بودن، این روش را گسترش داده و آن را به روشی تجاری جهت لایه گذاری لایه‌های نازک تبدیل نموده است [۱-۳]. در این کار به بررسی فرآیندهای ایجاد شده در

### مقدمه

امروزه کندوپاش به صورت وسیعی در تمیز کردن و حکاکی سطوح، لایه گذاری لایه نازک مورد استفاده قرار می‌گیرد. چندین سیستم کندوپاش برای لایه گذاری لایه نازک وجود دارد که هر یک از این سیستم‌ها کاربرد و ویژگی‌هایی مخصوص به خود را دارند. بعضی از متداول‌ترین و مهمترین این سیستم‌ها شامل کندوپاش دیود DC، کندوپاش دیود RF، کندوپاش مگنترونی و کندوپاش‌های راکتیو که با انواع روش‌های بالا تلفیق



شکل ۱: منحنی تجربی برای فرآیند کندوپاش راکتیو

اثر پسماند یک مساله کلیدی در سیستم‌های کندوپاشی راکتیو است. دو مکانیزم عمده و مهم در شکل‌گیری لایه مسموم در سطح هدف، جذب شیمیایی و کاشت یونی راکتیو می‌باشد. در واقع اکسیژن به دو طریق به هدف وارد می‌شود یا به طریق جذب شیمیایی مولکول‌های غیر انرژی دار در سطح و یا در کاشت یون-های مولکولی پرانرژی در هدف. می‌دانیم که بازده کندوپاش با معکوس انرژی پیوندی (مقیدسازی) متناسب می‌باشد. هرچه انرژی فوق بیشتر باشد بازده کندوپاش کمتر می‌شود و برعکس با توجه به آنچه بوضوح از منحنی بالا رؤیت می‌شود. هرچه میزان اکسیژن در سطح هدف بیشتر می‌شود میزان انرژی مقیدسازی عنصر اصلی هدف بیشتر شده و لذا به انرژی بیشتری جهت کندوپاش نیاز است که این امر منجر به کاهش آهنگ کندوپاش می‌شود. [۱۲ و ۱۱]. همچنین زمان ایجاد ترکیبات در سطح هدف با زمان زدودن آن‌ها یکسان نیست. این امر سبب ایجاد اثر پسماند می‌شود. در حالت واقعی چگالی جریان یونی روی سطح هدف بصورت زیادی نایکنواخت توزیع می‌شود که سبب وجود نواحی با آهنگ فرسایش پایین تر و بالاتر می‌شود. این مساله در هدف‌های آلیاژی سبب تغییر در ترکیب سطحی هدف هم می‌شود. لذا برای هر بار لایه نشانی نیاز به صیقل نمودن هدف داریم. بازده کندوپاش برای مواد مختلف متفاوت است و در هدف‌های آلیاژی ترکیب سطحی هدف بعد از کندوپاش اولیه متفاوت از ترکیب حجمی هدف است. طبق تحقیقات محققین با توجه به شکل‌های ۳ و ۲ رفتار پسماند سبب تغییرات تندی در آهنگ لایه گذاری، ترکیب لایه‌ها، فشار جزئی گاز راکتیو و ولتاژ کاتد می‌شود [۱۱].

لایه نشانی راکتیو و نحوه از بین بردن و کاستن مسمومیت کاتدی می‌پردازیم.

### بحث و بررسی فرآیند مسمومیت کاتدی

کندوپاش کاتدی علاوه بر گاز خنثی توسط بمباران اتم‌های گاز راکتیو نیز صورت می‌پذیرد که به نوبه خود باعث واکنش آن‌ها با سطح هدف و شکل‌گیری مواد ترکیبی روی سطح هدف می‌شود. این مواد جدید عایق می‌باشند و ضریب کندوپاش خیلی متفاوتی را دارند. این پدیده را مسمومیت هدف می‌نامند. در کندوپاش راکتیو مصرف گاز راکتیو توسط فرآیند بیش از مقدار دمیده شده توسط سیستم می‌باشد و لذا فرآیند ناپایدار می‌باشد و حالت کندوپاش بین دو نوع اکسیدی و فلزی تعویض می‌شود. اکسیدی شدن یک هدف سبب کاهش آهنگ کندوپاش می‌شود که این آهنگ خیلی کمتر از حالت فلزی می‌باشد. علاوه بر این لایه اکسیدی سطح هدف عایق می‌باشد و اگر از منبع توان DC استفاده می‌شود سبب شکل‌گیری قوس الکتریکی می‌شود و لذا منبع توان RF مورد نیاز می‌باشد. [۴-۸].

اگرچه کندوپاش راکتیو از لحاظ مفهومی ساده است ولی آن یک فرآیند پیچیده و غیر خطی است که شامل پارامترهای وابسته به هم زیادی است. آهنگ لایه گذاری به میزان گاز راکتیو خیلی حساس است بطوریکه در میزان گاز راکتیو کم، آهنگ کندوپاش فلزی زیاد شده ترکیب شیمیایی لایه غیر دقیق و نامطلوب خواهد شد و همچنین در میزان گاز راکتیو زیاد هم اگر چه ترکیب شیمیایی دقیق تشکیل می‌شود ولی معمولاً آهنگ لایه گذاری خیلی افت می‌کند و مسمومیت هدف اتفاق می‌افتد [۹ و ۱۰]. شکل ۱ یک منحنی فرآیند تجربی برای آهنگ کندوپاش در برابر میزان شارش گاز راکتیو را در یک فرآیند کندوپاش راکتیو نشان می‌دهد. مشخصه خاصی که این منحنی نمایش می‌دهد، اثر پسماند است. آهنگ لایه گذاری به ازای میزان شارش گاز راکتیو هم افزایش و هم کاهش دارد. پهنای تفکیکی بین علامت‌های کاهش و افزایش با پهنای ناحیه پسماند مشخص می‌شود [۱۱].

تغییر در ضریب چسبندگی  $\alpha$  می‌توان تعیین نمود. کاهش در  $\alpha$  سبب کاهش در پهنای ناحیه پسماند می‌شود. از طرفی چون این کمیت همانند یک ثابت برای ماده عمل می‌کند، که به عوامل نظیر دماهای هدف و زیرلایه و ریخت شناسی سطحی وابسته است، لذا می‌توان اثر پسماند را در سرعت‌های تخلیه به اندازه کافی بالا حذف نمود. از معادله بالا می‌بینیم که اگر  $s = \frac{dQ_p}{dp}$  - سرعت تخلیه - به اندازه کافی زیاد باشد رابطه  $\frac{dQ_{tot}}{dp} > 0$  همواره برقرار است.

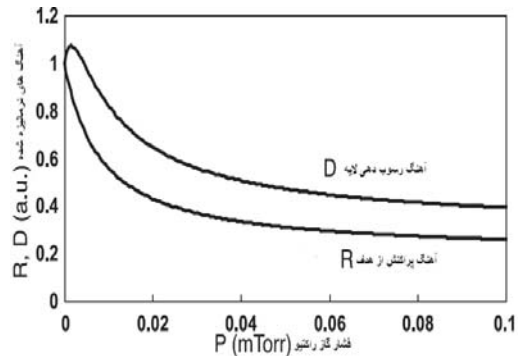
### نتیجه گیری

در طول فرآیند لایه گذاری کندوپاشی راکتیو روش‌های متفاوتی جهت حذف اثر ناپایداری و پسماند وجود دارد که در زیر به ذکر بعضی از آنها که در تحقیقات به آنها رسیده ایم می‌پردازیم:

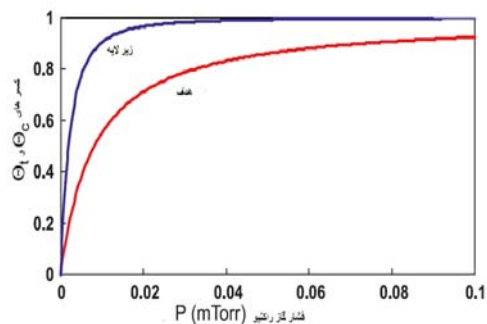
**الف) تغییر سرعت پمپ کردن:** یک راه حل برای حذف اثر پسماند، تخلیه خیلی سریع اتاقک لایه گذاری است. این امر توسط سیستم تخلیه‌ای با سرعت تخلیه به اندازه کافی بالا جهت خارج نمودن گاز راکتیو فراهم می‌باشد. در این روش سرعت تخلیه گاز راکتیو بر سرعت رشد لایه غلبه دارد. نتیجتاً گذاری تدریجی از حالت فلزی به حالت ترکیبی در هدف اتفاق می‌افتد. در طی فرآیند کندوپاش راکتیو، شارش گاز راکتیو به داخل اتاقک با آهنگ  $f_r$  (یعنی میزان مصرف گاز راکتیو توسط پمپاژ یا مواد کندوپاشی شده) بیان می‌شود. معادله حالت تعادل در اتاقک چنین برقرار می‌شود:

$$f_r = f_r^{sm} + P_r S_r \quad (2)$$

$f_r^{sm}$  آهنگ شارش گاز راکتیو مصرف شده توسط مواد کندوپاش شده،  $P_r$  فشار گاز راکتیو و  $S_r$  سرعت تخلیه سیستم است. به محض اینکه مسمومیت هدف اتفاق می‌افتد آهنگ کندوپاش کم شده و در نتیجه مصرف گاز راکتیو توسط مواد کندوپاش شده کم می‌شود ( $f_r^{sm}$ ) و لذا فشار جزئی گاز راکتیو افزایش می‌یابد. این امر سبب ایجاد ناپایداری می‌شود. باید سرعت تخلیه بیشتر شود تا از افزایش گاز راکتیو و در نتیجه ناپایداری



شکل ۲: آهنگ لایه گذاری و کندوپاش (پراکنش) در هدف و زیرلایه



شکل ۳: محاسبه میزان شکل گیری ترکیبات راکتیو در زیرلایه و هدف

معمولاً برای سادگی در تحلیل شارش گاز به جای فشار استفاده می‌کنند. با افزایش آهنگ شارش از یک مقدار خاص به بعد، آهنگ لایه گذاری در یک مقدار ثابت قرار می‌گیرد و مقدار آن بسیار کم است. این همان اثر پسماند می‌باشد. با تنظیم عوامل مؤثر می‌توان اثر پسماند را حذف کرد. اگر در ناحیه‌ای  $\frac{dQ_{tot}}{dp} < 0$  باشد (تغییرات شارش گاز با فشار) فرآیند اثر پسماند را از خود نشان می‌دهد. اگر این مشتق مثبت باشد، فرآیند فاقد اثر پسماند است. این نتایج را می‌توان با استفاده از منحنی مشتقات  $Q_{tot}$  (شارش گاز کل)،  $Q_c$  (شارش گاز در زیر لایه)،  $Q_t$  (شارش گاز در هدف) و  $Q_p$  (شارش گاز پمپ) بصورت تابعی از P نیز توجیه کرد:

$$\frac{dQ_{tot}}{dp} = \frac{dQ_t}{dp} + \frac{dQ_c}{dp} + \frac{dQ_p}{dp} \quad (1)$$

بیشینه شدن  $Q_c$  نشانگر شرایط خوب واکنش‌ها و فرآیند است. بعضی گازها فعال‌تر و راکتیو تر هستند. اثر گاز راکتیو را با

۱. دیده بانی نشر پلاسما: در این روش از نور منتشر شده از تخلیه الکتریکی پلاسما DC بعنوان ابزار تشخیصی استفاده می-شود. چون نور منتشر شده از پلاسما در یکی از سه حالت کاملاً فلزی، کاملاً اکسیدی و یا به طور جزئی اکسیدی می تواند باشد، لذا سیستم کنترل الکترونیکی بعد از حسگری نور منتشر شده از پلاسما نسبت به باز و بسته کردن دریچه ورود گاز رآکتیو اقدام می کند.

۲. کنترل ولتاژ: پارامتر دیگری که بطور پیوسته حالت فرآیند کندوپاش رآکتیو را مشخص می کند ولتاژ کاتدی است. ولتاژ کاتد (هدف) معیاری برای درجه واکنش سطح کاتد یعنی پوشش هدف است زیرا این کمیت با ضریب نشر الکترون ثانویه - به عنوان تابعی حساس از شرایط سطحی - تغییر می کند. از طرفی چون ضریب نشر الکترون ثانویه از مؤلفه اکسیدی به طور کلی بیشتر از جزء فلزی است لذا همان طور که ترکیب در سطح هدف شکل می گیرد ولتاژ کاتدی تغییر خواهد کرد. می توان همانند دیده بانی نشر پلاسما با فراهم کردن یک سیگنال الکترونیکی از تغییرات ولتاژ جهت کنترل فرآیند استفاده نمود.

#### مرجع ها:

- [۱] Kiyotaka Wasa, Makoto Kitabatake, Hideaki Adachi, "Thin Film Materials Technology", William Andrew, 2004 ,
- [۲] Reece Roth, "Industrial Plasma Engineering (Volume 2: Application to Nonthermal Plasma processing)", Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia, 2001
- [۳] Herman V. Boenig, "Plasma Science and Technology", Cornell University Press, Ithaca, New York, 1982
- [۴] R P Howson, "The reactive sputtering of oxides and nitrides", *Pure&appl.Chem*, **66** (1994) 1311- 1318,
- [۵] E.E. Granda -Gutierrez, R. Lopez -Callejas, R. Pena - Eguiluz, J.S. Benitez-Read, J.O. Pacheco-Sotelo, R. alencia A., A. Mercado-Cabrera, S.R. Barocio, "Modelling and optimization of a low-pressure DC glow discharge in stable regime" , *surface & Coatings Technology*, **201** (2007) 5454-5457.
- [۶] Chuan Li, Jang-Hsing Hsieh, "Stability analysis of reactive sputtering process", *Surface and Coatings Technology* **177** - **178** (2004) 824-829.
- [۷] V. Bellido-González, B. Daniel, J. Counsell, D. Monaghan, "Reactive gas control of non-stable plasma conditions", *Thin Solid Films* **502** (2006) 34 - 39.

جلوگیری شود؛ یعنی باید  $\frac{df_r}{dp_r} > 0$  باشد تا سیستم پایدار بماند. اگر سرعت تخلیه بحرانی  $S_c$  تعریف شود:

$$S_c = \frac{df_r^{sm}}{dp_r} \quad (۳)$$

شرط لازم جهت برقراری پایداری در سیستم لایه گذاری چنین بدست می آید:

$$S_r > S_c \quad (۴)$$

ب) تغییر فاصله هدف تا زیرلایه: روش دیگری جهت کاهش اثر مسمومیت هدف آن است که فاصله هدف تا زیرلایه بزرگتر شود. در فاصله های کوچک که چگالی شار مواد کندوپاش شده از هدف زیاد است برای ایجاد لایه هایی با درصد ترکیب شیمیایی دقیق و مطلوب نیاز به مقدار گاز رآکتیو زیادی هست. این شارش زیاد گاز رآکتیو خود منجر به مسمومیت سریع هدف می-گردد. با زیاد نمودن فاصله هدف تا زیر لایه چگالی شار مواد کندوپاش شده از هدف در نزدیکی زیرلایه با توجه به قانون توزیع کسینوسی کم می شود و به مقدار گاز رآکتیو کمی نیاز می باشد. این امر علاوه بر ایجاد لایه های ترکیب شیمیایی از سرعت شکل گیری مسمومیت هدف نیز جلوگیری می کند.

ج) شارش گاز رآکتیو بصورت پالسی: در این روش شارش گاز رآکتیو در بازه های زمانی کوتاه به طور تناوبی قطع و وصل می شود. بعد از شروع کندوپاش در حالت فلزی بلافاصله گاز رآکتیو وصل می شود و طی این مدت کوتاه گاز رآکتیو با مواد کندوپاش شده از هدف عنصری صورت می گیرد. در ادامه بعد از زمان خیلی کوچکی قطع گاز رآکتیو صورت می گیرد. در این زمان قطع بمباران هدف که به مقداری جزئی هم مسمومیت دارد بوسیله یون های آرگون سبب زدودن این مواد ترکیبی از هدف می شود. بلافاصله بعد از رفع مسمومیت هدف شارش گاز رآکتیو در حالت وصل قرار می گیرد و این روند ادامه پیدا می کند. مزیت این روش جلوگیری از انباشته شدن مواد ترکیبی در سطح هدف می باشد و لذا مسمومیت قابل بازگشت می باشد. زمان پالس ها بسیار مهم است و نباید طولانی باشد. جهت کنترل روش پالسی، دو روش وجود دارد:

- [A] K N Ostrikov and M Y Yu "The effect of near-sheath dusts on asurface-wave-sustained gas discharge", *J. Phys. D: Appl. Phys.* **32** (1999) 650–1656.
- [9] D. Rose'n, I. Katardjiev, S. Berg, W. Mo'ller, "TRIDYN simulation of target poisoning in reactive sputtering", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* **228** (2005) 193–197.
- [10] " Chitra Agashe, Oliver Kluth, Gunnar Schope, Hilde Siekmann, Jurgen Hupkes, Bernd Rech, "Optimization of the electrical properties of magnetron sputtered aluminum-doped zinc oxide films for opto-electronic applications", *Thin Solid Films* **442** (2003) 167–172.
- [11] S. Berg, T. Nyberg, "Fundamental understanding and modeling of reactive sputtering processes", *Thin Solid Films* **476** (2005) 215– 230.
- [12] Chuan Li\*, Jang-Hsing Hsieh, Stability analysis of reactive sputtering process, *Surface and Coatings Technology* **177 –178** (2004) 824–829.
- [13] D. Severin . O. Kappertz, T. Nyberg, S. Berg, M. Wuttig "The effect of target aging on the structure formation of zinc oxide during reactive sputtering", *Thin Solid Films* **515** (2007) 3554–3558.