آموزشی

# روش‌های ساخت لایه‌های نازک

صرغام اسدالهی، دانشجوی کارشناسی ارشد فیزیک دانشگاه پیام نور، واحد پرند
اشرف السادات شکرباغانی، پژوهشکدهٔ برنامه‌ریزی درسی و نوآوری‌های آموزشی سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموشی

**چکیده**

**امروزه لایه نشانی کاربرد گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف علوم و فناوری دارد. بنابراین آشنایی با روش‌های مختلف لایه نشانی می‌تواند در جهت به‌دست آوردن شناخت از این روش و استفاده از آن در جهت آموزش به شاگردان مفید باشد. این مقاله به بررسی اجمالی این روش‌ها می‌پردازد.**

**کلیدواژه‌ها: لایهٔ نازک، لایهٔ نشانی، تبخیر در خلأ، لایهٔ نشانی یونی، لایهٔ نشانی با کندوپاش**

روش‌های رایج جهت رشد لایه‌های نازک به دو گروه اصلی تقسیم می‌شوند که عبارت‌اند از:

۱. لایهٔ نشانی فیزیکی بخار (PVD)، ۲. لایهٔ نشانی شیمیایی بخار (CVD).

## ۱. لایهٔ نشانی فیزیکی بخار

اصولاً ساخت لایه‌های نازک باید در محیط خلأ انجام شود. برای ساخت لایه‌های نازک به طریق فیزیکی، باید اولاً ماده یا مواد مورد نظر را به صورت اتم یا مولکول یا مجموعه‌ای از این ذرات تبدیل نمود و سپس در جای دیگری و روی زیر لایهٔ مناسب با شکل و ضخامت مورد نظر انباشت. در فرایند انباشت بخار بر یک سطح و تشکیل لایه به روش فیزیکی، برخورد گرمایی مولکول‌ها بر یک سطح سبب انباشت مولکول‌ها و رشد لایه می‌شود.

روش‌های فیزیکی تهیهٔ لایه‌های نازک عبارت‌اند از:

الف- لایهٔ نشانی به روش تبخیری

ب- لایهٔ نشانی به روش یونی

ج- لایهٔ نشانی به روش کندوپاش.

### الف- لایهٔ نشانی به روش تبخیر در خلأ

تبخیر در خلأ یکی از روش‌های متداول تهیهٔ لایه است. فرایند ساخت لایه در تبخیر گرمایی شامل مراحل زیر است:

۱. گذار یک حالت چگال (مایع یا جامد) به حالت گازی از طریق تبخیر یا تصعید؛

۲. انتقال اتم‌ها (مولکول‌ها) از منبع تبخیر تا زیر لایه در فشار کاهش یافته؛

۳. چگالش (انباشت) یک توده از بخار اتم‌ها بر اثر برخورد با سطح زیر لایه؛

۴. آرایش دوبارهٔ اتم‌های لایه یا اصلاح پیوند آن‌ها به سطح زیر لایه.

اگر یک مایع یا جامد تا دمای کافی گرم شود برای اتم‌هایی که انرژی کافی را از طریق آشفتگی گرمایی به‌دست می‌آورند، فرار از سطح امکان‌پذیر می‌شود. مفهوم پرتاب اتم‌ها از سطح، تبخیر نامیده می‌شود.

برای اینکه مولکول بتواند سطح یک ماده را ترک کند، باید انرژی جنبشی متناظر با سرعت عمود بر سطح، از انرژی لازم برای غلبه بر نیروهای جاذبهٔ بین مولکولی بیشتر باشد.

انرژی جنبشی با حرکت گرمایی مولکول‌ها تعیین می‌شود؛ بنابراین تعداد ذراتی که بتوانند سطح را ترک کنند با افزایش دما افزایش می‌یابند و با دادن مداوم گرما به منبع، ماده انباشت به شکل گازی درمی‌آید.

ریخت‌شناسی و خلوص لایه‌ها به فشار گازهای باقی‌مانده، آهنگ تبخیر و همچنین دما و ساختار زیر لایه و فاصلهٔ چشمه تا زیر لایه بستگی دارد. در این روش، تعداد ذرات انباشت شده به شکل هندسی سامانه یعنی شکل و موقعیت نسبی منبع تبخیر و زیر لایه بستگی دارد.

در شیوهٔ لایهٔ نشانی تبخیر در خلأ، لایه‌های نازک از فلزات

(خالص و آلیاژ)، نیمه‌رساناها و دی‌الکتریک‌ها، عناصر و ترکیبات شیمیایی گوناگون را می‌توان انباشت.

منبع تبخیر باید از ماده‌ای ساخته شود که با مادهٔ تبخیر شونده ترکیب و با آن برهم کنش نداشته باشد. معمولاً از مواد دیرگداز مانند تنگستن (W)، تانتال (Ta) و مولیبدن (Mo) به‌عنوان منبع تبخیر استفاده می‌شود. این مواد به شکل سیم، ورقه و یا بوته‌هایی در شکل‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند.

## ۲. لایهٔ نشانی به روش یونی

خواص ساختاری، الکتریکی و نوری لایه‌های نازک به شدت به انرژی ذرات تشکیل‌دهنده پوشش وابسته است. در فرایند تبخیر، انرژی اتم‌هایی که از چشمه خارج می‌شوند کمتر از ۱ ev است (۰/۲ تا ۰/۳ الکترون ولت) و متوسط انرژی اتم‌های کندوپاش شده نیز ۱۰ تا ۳۰ الکترون ولت است.

اگرچه فرایند پراکنش این انرژی را تا ۴۰ الکترون ولت افزایش می‌دهد، این انرژی هنوز برای تهیهٔ پوششی که بتواند فشارهای ناشی از شرایط اعمال شده به بسیاری از پوشش‌های مقاومتی را تحمل کند، کافی نیست.

لایهٔ نشانی یونی به‌عنوان روشی برای ایجاد لایه‌های فلزی با چسبندگی خوب در دمای پایین توسط ماتوکس (Matox) در اواخر ۱۹۶۰ ابداع شد.

خواص و ساختار لایه با افزایش دمای زیر لایه در طول پوشش‌دهی و یا با اعمال بایاس به زیر لایه بهتر می‌شود، اما طبیعت زیر لایه دمای قابل تحمل آن را محدود می‌کند. در این گونه موارد که پوششی با چسبندگی بالا در دمای پایین زیر لایه لازم است، از روش‌های پوشش‌دهی به کمک یون استفاده می‌شود. انرژی پوشش‌دهی دراین‌گونه فرایندها از مرتبه چندصد الکترون ولت است.

از این روش لایهٔ نشانی برای ایجاد لایه‌های نازک خیلی سخت و مقاوم در برابر سایش با چسبندگی بالا، تغییر کیفیت متالورژیکی آلیاژها و بالا بردن عمر قطعات استفاده می‌شود. این روش همچنین برای تهیهٔ لایه‌های TiN و TiC بر روی ابزارآلات و قطعات مورد استفاده در ساختمان ماشین‌آلات و سخت کردن ابزارهای برش به کار می‌رود.

در لایهٔ نشانی به روش یونی معمولاً یک کاتد تو خالی به‌عنوان تفنگ الکترونی (چشمهٔ تبخیر) مواد پوشش‌دهنده را تبخیر و یونیده می‌کند. چشمهٔ کاتد تو خالی تخلیهٔ الکتریکی دارای توان بالا، ولتاژ پایین و جریان زیاد و ثابت است که براساس تبخیر و یونش عمل می‌کند. یون‌های حاصله با انرژی حدود چندصد الکترون ولت بر روی قطعهٔ کار نشانده می‌شود.

در حقیقت، موقعی که گازآرگون وارد لولهٔ تانتالی (کاتد) می‌شود، با اعمال ولتاژ معینی، تخلیهٔ الکتریکی بین الکترودها اتفاق خواهد افتاد و گاز آرگون یونیده می‌شود.

یون‌های آرگون به‌وسیلهٔ پتانسیل کاتد جذب می‌شوند و لولهٔ تانتال بدین طریق بمباران می‌شود و دمای آن تا ۲۴۰۰ K-۲۳۰۰ K برای تابش الکترون می‌رسد. الکترون‌ها به‌وسیله آند جذب شده و به‌سوی آن شتاب می‌گیرند و به تخلیهٔ الکتریکی قوسی کاتد داغ، برای تولید جریان پایدار الکترونی پلاسما کمک می‌کنند. وقتی پرتو الکترونی به بوته می‌رسد، انرژی جنبشی آن‌ها به انرژی گرمایی برای تبخیر مادهٔ موجود در بوته تبدیل می‌شود. اندازهٔ مقطع پرتو با تغییر میدان مغناطیسی برای تمرکز و تجمیع قابل تنظیم است.

پوشش‌دهی با پرتو یونی به دو شیوهٔ متفاوت تبخیری و کندوپاش انجام می‌پذیرد. در فرایند پراکنش با پرتو یونی، یون‌های گاز غیرواکنشی برای بمباران هدف به‌کار می‌روند؛ در حالی‌که در روش تبخیر با پرتو یونی، یون‌های گاز واکنشی، زیر لایه را بمباران می‌کنند.

## ۳. لایهٔ نشانی به روش کندوپاش

وقتی سطح جامد (یا مایع) با پرتو اتمی، یونی، الکترونی و یا نوری بمباران می‌شود با توجه به انرژی جنبشی ذرات بمباران‌کننده پدیده‌های متعددی اتفاق می‌افتد.

در انرژی‌های جنبشی خیلی پایین (کمتر از ۵ الکترون ولت) که برهم کنش اساساً با سطح بیرونی هدف انجام می‌شود، اتم‌های گاز حامل، یا بازتابیده می‌شوند یا با سطح به تعادل گرمایی می‌رسند و سپس تبخیر می‌شوند.

در انرژی جنبشی بیشتر از انرژی بستگی اتم‌ها، اتم‌های شبکه به موقعیت‌های جدید منتقل می‌شوند.

پدیدهٔ پراکنش در انرژی‌های تقریباً بالای ۴H (۴H آستانهٔ پراکنش، H گرمای تصعید هدف) اتفاق می‌افتد. با برخورد این یون‌های پر انرژی به سطح جامد و انتقال انرژی جنبشی آن‌ها به اتم‌های لایه‌های مختلف سطح، اتم‌های تشکیل‌دهنده سطح از آن جدا شده و در فضا پراکنده می‌شوند. این پدیده پراکنش نامیده می‌شود.

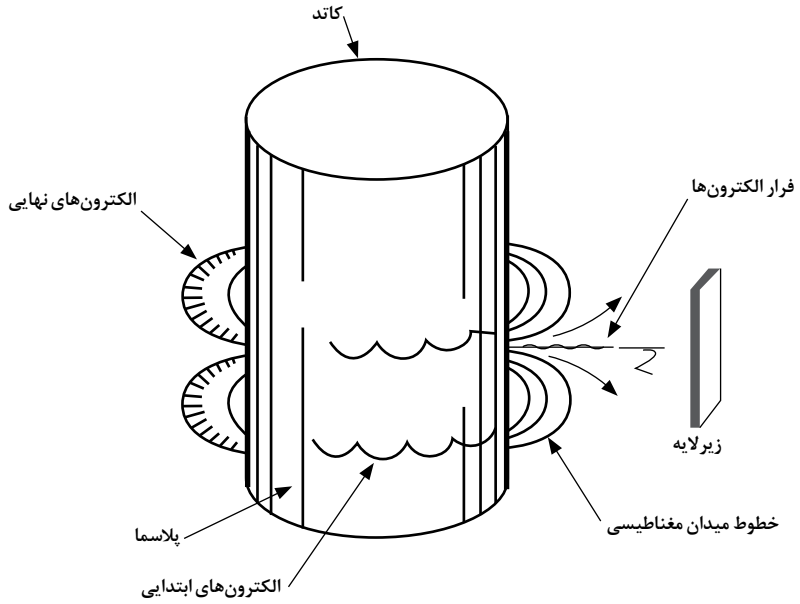
## پراکنش مگنترون

پراکنش مگنترون نیز متفاوت از دیگر شیوه‌های پراکنش است؛ تفاوت عمدهٔ این روش با روش‌های دیگر در این است که در این روش پدیدهٔ کندوپاش با حضور میدان مغناطیسی دائمی به نواحی نزدیک سطح هدف محدود می‌شود.

استفاده از این روش باعث افزایش احتمال یونش و افزایش چگالی پلاسما در همسایگی هدف می‌شود.

مزایای محدود شدن پلاسما عبارت‌اند از:

**خواص و ساختار لایه با افزایش دمای زیر لایه در طول پوشش‌دهی و یا با اعمال بایاس به زیر لایه بهتر می‌شود، اما طبیعت زیر لایه دمای قابل تحمل آن را محدود می‌کند. در این گونه موارد که پوششی با چسبندگی بالا در دمای پایین زیر لایه لازم است**




شکل ۱. خط‌های میدان مغناطیسی اطراف هدف مگنترون استوانه‌ای

شکل ۲. تصویر هدف مسی همراه با نگه‌دارنده، لولهٔ خنک‌کننده، الکتریکی و آهن‌رباهای حلقوی ثابت (۴۰۰ گوسی)

۱. افزایش آهنگ پوشش‌دهی
۲. کاهش پراکنش زیرلایه و دیواره‌های محفظه
۳. کاهش گرم شدن زیرلایه در حین پوشش‌دهی
۴. کاهش فشار مورد نیاز گاز کاری.

مزیت مگنترون اســتوانه‌ای این است که کندوپاش دیگر به یک طرف ســطح متمرکز نمی‌شود و ضمناً هدف سریعاً مصرف نمی‌شــود. الکترون‌ها در شــعاعی تقریباً برابر شــعاع آند، کاتد اســتوانه‌ای را احاطه می‌کنند. میدان مغناطیسی در حدود چند صد گاؤس اســت که از مگنترون‌های دایــره‌ای برای ایجاد این میدان استفاده می‌شود. آهن‌رباها به صورت مخالف یکدیگر کنار هم در داخل هدف/ (نشــان) قرار دارنــد. در این حالت، خطوط میدان مغناطیسی خمیده می‌شوند.

ســطح مقطع حلقوی دام الکترونی از ســه طرف به میدان مغناطیسی و از طرف چهارم به میدان الکتریکی محصور می‌شود. الکترون‌هایی که موازی با میدان حرکت نمی‌کنند، مطابق شکل مســیرهای مارپیچی را اطــراف خطوط میــدان طی می‌کنند؛ بنابراین الکترون‌ها مسیرهای طولانی‌تر را می‌پیمایند و بازدهی الکترون‌ها و در نتیجه یونش افزایش می‌یابد.

سازوکار عملکرد ســامانه به این صورت است که با استفاده از ســامانه‌های تخلیهٔ هــوا (پمپ‌های روتــاری و دیفیوژن) خلأ محفظه را تا $۳\times۱۰^{-۳}$ پاســکال می‌رســانند و گاز آرگون را وارد محفظه می‌کنند و با اعمال ولتاژ ۲۰۰ولتی بین کاتد (هدف) و آند (محفظه). با ایجاد تخلیهٔ الکتریکی الکترون به‌وجود می‌آید و این الکترون‌های ایجاد شده به اتم‌های گاز آرگون برخورد و یون‌های مثبت آرگون تولید می‌کنند. این یون‌های مثبت به سمت هدف (قطب منفی) شــتاب می‌گیرند و با برخورد به آن اتم‌های سطح هدف را می‌کنند و در داخل محفظه پراکنده می‌کنند. در نتیجه، به‌روی ســطح زیر لایه می‌نشینند. میزان چسبندگی لایه به زیر لایــه به فاصلــهٔ زیر لایه تا هدف، تمیزی ســطح و همچنین به دمای زیر لایه بســتگی دارد. با ایــن روش می‌توان لایه‌هایی با ضخامت‌های مختلف (از چند نانومتر تا دو میکرون) تولید کرد.

برای لایهٔ نشــانی عناصر مختلف (آلومینیم، مس، تیتانیم و برنز...) عنصر مورد نظر حتماً باید به شکل استوانه‌ای (شکل زیر) ساخته شود.

در شکل صفحه بعد ســامانهٔ کندوپاش یک هدف همراه با مشخصات آن نشان داده شده است.

شکل ۳. سامانهٔ اسپاترینگ یک هدفه

شکل ۴ . سامانهٔ کندوپاش دو هدفه

سامانهٔ کندوپاش مغناطیسی دو هدفه جهت تهیهٔ چند لایه‌های نازک سرمت (فلز- دی‌الکتریک) مورد استفاده قرار می‌گیرد. طراحی به‌گونه‌ای است که لایهٔ نشانی بر روی زیرلایه‌های مورد نظر می‌تواند به‌طور هم‌زمان یا مجزا انجام گیرد. در سامانهٔ کندوپاش مغناطیسی یک هدفهٔ موجود برای تهیهٔ چند لایه‌ها نیاز به تعویض هدف است و این عمل باعث آلودگی لایه‌ها می‌شود ولی در سامانهٔ کندوپاش مغناطیسی دو هدفه، برای تهیهٔ چند لایه‌ها نیاز به تعویض هدف نیست. در نتیجه، لایه‌هایی که با استفاده از این سامانه تهیه می‌شوند در مقایسه با لایه‌های تهیه شده با سامانهٔ مگنترون تک‌هدفه از نظر آلودگی و اکسید شدن در شرایط کاملاً مطلوب‌تری قرار دارند.

استفاده از سامانهٔ کندوپاش مغناطیسی دو هدفه در تهیهٔ پوشش‌های جاذب خورشیدی دارای این مزیت است که حضور هدف دوم امکانات ثانویه‌ای را برای به‌دست آوردن لایه‌هایی با ضریب جذب خورشیدی بالاتر (بهبود ویژگی‌های نوری) فراهم می‌کند. همچنین در سامانهٔ کندوپاش دو هدفه این امکان فراهم می‌شود که یک ساختار چند لایه شامل زیرلایه‌های فلزی و سرامیکی به‌طور هم‌زمان و متناوب انباشته شوند. در این سامانه پمپ‌های روتاری و دیفیوژن محفظه را تا فشار $۳/۱ \times ۱۰^{-۳}$ پاسکال تخلیه می‌کنند و فشار محفظه نیز توسط خلأ سنج یونش اندازه‌گیری می‌شود. تجربهٔ کار به ما نشان داده است که پوشش‌دهی با این سامانه لایه‌هایی یکنواخت با چسبندگی بالا در سطح نیمه‌صنعتی ایجاد می‌کند. سامانهٔ کندوپاش مغناطیسی دو هدفه دارای مشخصات فنی زیر است.

سایر محفظه ۶۰۰ × ۷۰۰ mm
سایز نگه‌دارندهٔ زیرلایه ۵۲۰×۶۴۰ mm
چرخش نگه‌دارندهٔ زیرلایه (دور موتور) ۱۸ -۳ rpm
فشار نهایی $۳\times۱۰^{-۳}$ pa
ولتاژ هدف ۸۰۰- V
حداکثر جریان ۱۲-۱ A
قطر خارجی هدف/نشان (آلومینیم و مس) ۵۰ mm
قطر داخلی هدف/ نشان ۳۷ mm
طول هدف/ نشان ۶۰۰ mm


منابع

1. Kiyotaka Wasa, Shigeru Hayakava, “Handbook of putter Deposition Technology”, Noyes Publications, 1992.
2. Leon I. Maissel, Reinhard Glang,, “Handbook of Thin Film Technology”, McGraw- Hill Company, 1983.
3. W.D. Sproul, D.J.Christie, D.C.Carter, “Review Control of reactive sputtering processes”, Thin Solid Films 491, p 1-17, 2005.
4. Kiyotaka Wasa, Makoto Kitabatake, Hideaki Adachi,, THIN FILM MATERIALS TECHNOLOGY”, publisher Springer, 2004.
5. W.D. Sproul, D.J. Christie, D.C.Carter, “Review Control of reactive sputtering processes”, Thin Solid Films 491-p 1-17,2005.
6. D.S.Rickerby, A.Matthews, “Advanced Surface Coatings: A Handbook of Surface Engineering”, Chapman and Hall New York, 1991.
7. Ludmila Eckertova,” Physics of Thin Films”, Plenum Press, 1986.
۸. ضرغام اسداللهی و همکاران؛ «طراحی و ساخت سامانهٔ کندوپاش مغناطیسی دوتارگته»، **هفتمین سمینار ملی مهندسی سطح و عملیات گرمایی دانشگاه صنعتی اصفهان**. ۲۶ و ۲۷ اردیبهشت ۱۳۸۵ خ.