

لایه‌نشانی به روش کندوپاش یونی (اسپاترینگ)

نویسنده : مرضیه شیرازی

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، علم لایه‌های نازک رشد قابل ملاحظه‌ای داشته و حجم وسیعی از تحقیقات را به خود اختصاص داده است. بی‌شک رشد چشمگیر ارتباطات، پردازش اطلاعات، ذخیره‌سازی، صفحه‌های نمایش، صنایع تزئینی، ابزارآلات نوری، مواد سخت و عایق‌ها نتیجه تولید لایه‌های نازک براساس فناوری‌های نوین می‌باشد. در ساخت لایه‌های نازک نیز در سال‌های اخیر تحولات وسیعی صورت گرفته است که خود ناشی از پیشرفت در فناوری خلاء، تولید میکروسکوپ-های الکترونی و ساخت وسایل دقیق و پیچیده‌ی شناسایی مواد است. همچنین باز شدن مباحثی نظیر میکروالکترونیک، اپتیک و نانوتکنولوژی مدیون اهمیت پوشش‌های لایه‌نازک می‌باشد.

تا به امروز روش‌های مختلفی برای ساخت لایه‌های نازک معرفی شده است که روش کندوپاش^۱ یکی از انواع روش‌های لایه‌نشانی فیزیکی بخار (PVD)^۲ محسوب می‌شود. در این مقاله به معرفی روش کندوپاش یونی (اسپاترینگ) به‌عنوان روشی برای تولید لایه‌های نازک خواهیم پرداخت.

۲- روش کندوپاش

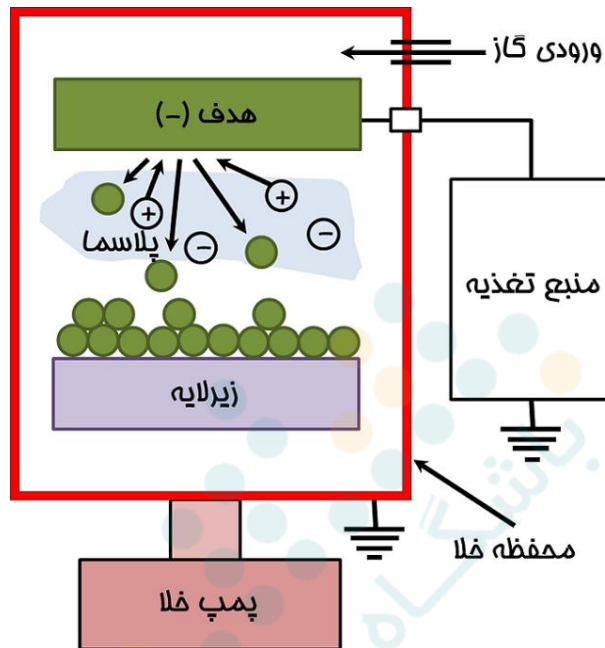
مانند سایر روش‌های لایه‌نشانی فیزیکی تحت شرایط خلاء، روش کندوپاش نیز شامل سه مرحله است: (الف) تبخیر ماده از منبع؛ (ب) انتقال بخار از منبع به زیرلایه و (ج) تشکیل لایه نازک روی زیرلایه با انباشت بخار منبع. در روش کندوپاش، برای این که ماده منبع به فاز بخار خود منتقل شود، از برهم‌کنش فیزیکی ذره‌هایی که به ماده منبع یا هدف^۳ برخورد می‌کنند استفاده می‌شود. ماده هدف که به ولتاژ منفی متصل است، نقش کاتد را دارد. با بمباران و برخورد ذرات پر انرژی به سطح هدف، اتم‌ها یا مولکول‌های آن از سطح جدا شده و به بیرون پرتاب می‌شوند و در میدان ایجاد کننده پلاسما شتاب می‌گیرند. زیرلایه به ولتاژ مثبت متصل است و در واقع آند است و لایه‌ای از جنس هدف روی آن انباشت می‌شود.

¹ Sputtering

² Physical Vapor Deposition

³ target

به عبارت دیگر فرآیند کندوپاش (اسپاترینگ) عبارت است از ایجاد یک پلازما گازی (معمولاً گاز آرگون) بین زیرلایه و هدف. بمباران ماده هدف توسط یون‌های پراثرژی باعث کندن اتم‌ها از سطح ماده هدف و رسوب آنها روی زیرلایه و تشکیل لایه نازک می‌شود. شکل (۱) طرح ساده‌ای از فرآیند کندوپاش را نشان می‌دهد.



شکل (۱) طرح ساده‌ای از فرآیند کندوپاش

در روش کندوپاش ابتدا محفظه لایه‌نشانی توسط پمپ خلاء، تخلیه شده و سپس گاز آرگون وارد محفظه می‌شود. بعد از آن با روشن کردن منبع تغذیه، میدان الکتریکی بین زیرلایه و هدف اعمال می‌شود. اتم‌های گاز آرگون موجود در محفظه تحت تاثیر میدان الکتریکی یونیزه شده و به سمت ماده هدف شتاب می‌گیرند و سطح ماده هدف را بمباران می‌کنند. در اثر برخورد این ذرات پراثرژی با هدف، اتم‌های هدف به بیرون از آن پرتاب می‌شوند. این اتم‌های کنده شده روی سطح زیرلایه می‌نشینند. به این ترتیب یک لایه نازک از ماده هدف روی سطح زیرلایه تشکیل می‌شود. این فرایند، کندوپاش نامیده می‌شود.

روش کندوپاش در محیط خلا انجام می‌شود، برای این منظور ابتدا فشار اولیه محفظه کندوپاش به 10^{-6} تا 10^{-10} تور می‌رسد و از آن جایی که متداول‌ترین شیوه برای فراهم کردن یون و تولید پلازما، عبور مداوم گازی مانند آرگون است، با ورود این گاز به محفظه، فشار به ۱ تا ۱۰۰ تور افزایش می‌یابد. با برقراری ولتاژ بین کاتد و آند و تولید میدان الکتریکی بین آنها، پلازما تشکیل شده و فرآیند کندوپاش آغاز می‌شود.

از آن جایی که آرگون نسبت به سایر مواد کندوپاش کننده نسبتاً سنگین تر است ضریب نشر ثانویه بزرگتری دارد (می-تواند اتم‌ها یا مولکول‌های بیشتری را از سطح هدف جدا کند)، متداول‌ترین گازی است که برای تولید پلاسما در روش کندوپاش به کار برده می‌شود. در این روش استفاده از سایر گازهای نجیب مانند هلیوم یا نئون نیز امکان پذیر است. در صورت نیاز به واکنش حین کندوپاش، می‌توان از گازهای اکسیژن و نیتروژن با نسبت‌های مشخص نسبت به گاز خنثی نیز استفاده کرد. از این روش می‌توان برای تولید لایه های اکسیدی یا نیتریدی استفاده نمود. این روش به روش کندوپاش فعال یا کندوپاش واکنشی⁴ معروف است.

از مزایای روش کندوپاش می‌توان به یکنواختی ضخامت، پوشش‌دهی مواد سخت، پوشش‌دهی مواد نارسانا، رسانا و نیمه- رسانا، چسبندگی خوب لایه به زیر لایه، خلوص بالای لایه و تکرارپذیری آن و امکان لایه نشانی بر روی زیر لایه ها با ابعاد بالا اشاره نمود.

مقدار ماده کندوپاش شده Q در واحد زمان، طبق رابطه (۱-۱)، تحت شرایط ثابت به طور معکوس با فشار گاز P ، و فاصله آندتا کاتد d ، متناسب است.

$$Q = \frac{K.V.I}{P.d} \quad (1-1)$$

در رابطه (۱-۱)، I جریان تخلیه، v ، ولتاژ و K ، ثابت تناسب می‌باشد. با افزایش فشار یا فاصله، تعداد ذره‌هایی که به علت برخورد با ذرات دیگر به زیر لایه نمی‌رسند، افزایش می‌یابد. مقدار ماده کندوپاش شده با جریان (I) و ولتاژ (V) افزایش می‌یابد، که می‌توان این فرآیند را بصورت زیر توضیح داد:

مقدار حداقل مشخصی از افت کاتدی وجود دارد که در کمتر از آن کندوپاش اتفاق نمی‌افتد، اما در بالاتر از این حداقل، مقدار کندوپاش با اختلاف بین افت حقیقی و افت بحرانی متناسب است. آهنگ کندوپاش با جرم اتمی یون‌هایی که روی کاتد برخورد می‌کنند، افزایش می‌یابد و هم چنین آهنگ کندوپاش به نوع ماده هم بستگی دارد. بازده کندوپاش کاتدی با ضریب کندوپاش کاتدی (S) داده می‌شود.

$$S = \frac{N_a}{N_i} = 10^5 \cdot \frac{\Delta W}{i.t.A} \quad (1-2)$$

که در رابطه (۲-۱)، N_a : تعداد اتم‌های کندوپاش شده، N_i : تعداد یون‌های فرودی، ΔW : کاهش جرم هدف، A : جرم اتمی ماده مورد نظر برای کندوپاش، t : زمان بمباران و i : جریان یونی می‌باشد.

⁴ Reactive Sputtering

انرژی حداقل (آستانه) که در آن هنوز هم کندوپاش اتفاق می‌افتد برای فلزها و یون‌های مختلف متغیر و در حدود ده‌ها الکترون ولت است. در انرژی‌های بیشتر از انرژی آستانه کندوپاش، راندمان کندوپاش با افزایش انرژی یون، ابتدا به طور نمایی افزایش می‌یابد و به ماکزیمم تختی می‌رسد. با افزایش بیشتر انرژی یون‌ها راندمان کندوپاش مجدداً کاهش می‌یابد. راندمان کندوپاش بر خلاف آستانه کندوپاش به جرم یون (به ویژه در بازه ماکزیمم) بستگی دارد.

راندمان‌های نسبی کندوپاش در تعیین درجه راحتی انجام فرآیند کندوپاش مفید هستند، به عنوان مثال می‌توان گفت که برلیوم به راحتی نقره کندوپاش نمی‌شود. در جدول (۱-۱) راندمان‌های کندوپاش چند عنصر که از یون‌های گازهای خنثی در ۵۰۰ الکترون ولت بدست آمده‌اند، ارائه شده است:

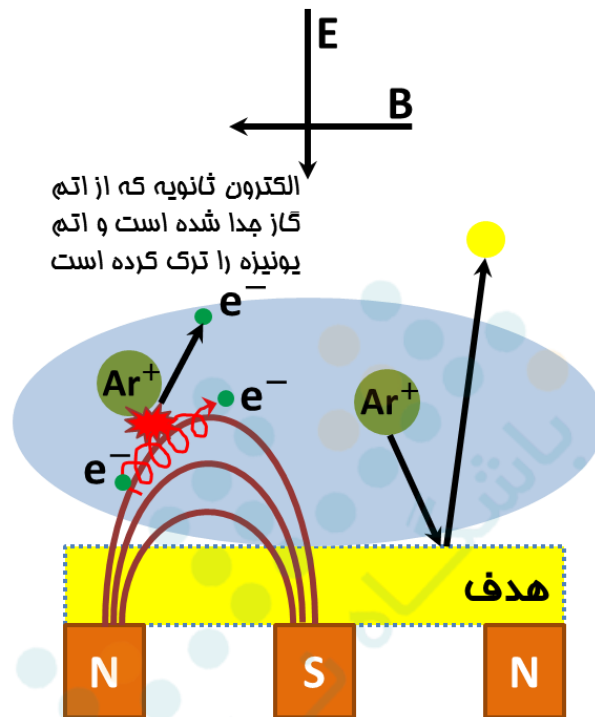
جدول (۱) راندمان‌های کندوپاش چند عنصر که از یون‌های گازهای خنثی در ۵۰۰ الکترون ولت به دست آمده‌اند.

عنصر/گاز	He	Ne	Ar	Kr	Xr
Si	۰/۱۳	۰/۴۸	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۴۲
Ti	۰/۰۷	۰/۴۳	۰/۵۱	۰/۴۸	۰/۴۳
Al	۰/۱۶	۰/۷۳	۱/۰۵	۰/۹۶	۰/۸۲

۳- انواع روش‌های کندوپاش

در حال حاضر روش‌های مختلفی برای تولید لایه‌های نازک به روش کندوپاش وجود دارد، روش‌های کندوپاش بر اساس نوع منبع تغذیه مورد استفاده، به روش کندو پاش دیودی، کندو پاش RF مگنترون، کندوپاش DC مگنترون تقسیم می‌شوند. کندوپاش دیودی ساده‌ترین روش کندوپاش است که پلاسما گاز آرگون بین کاتد (ماده هدف) و آند (زیرلایه) برقرار می‌شود. به منظور افزایش چگالی پلاسما و بالا رفتن احتمال یونیزاسیون از میدان مغناطیسی برای محدود کردن پلاسما در نزدیکی ماده هدف استفاده می‌شود. این روش که به روش کندوپاش مغناطیسی معروف است، میدان مغناطیسی به موازات سطح کاتد اعمال می‌شود که باعث می‌گردد الکترون‌ها در پلاسما به جای طی مسیر به صورت مستقیم به صورت مارپیچی حرکت کنند و علاوه بر اینکه الکترون‌ها پراثری تر می‌شوند مسیر بیشتری را طی کرده و اتم‌های بیشتری را یونیزه می‌کنند (شکل ۲). بنابراین میدان مغناطیسی، پلاسما را در اطراف سطح هدف محدود می‌کند که این دام الکترونی آهنگ برخورد بین الکترون‌ها و مولکول‌های گاز که کندوپاش را به عهده دارند افزایش می‌دهد و سبب می‌شود که لایه نشانی در فشارهای پایین تر قابل انجام شود.

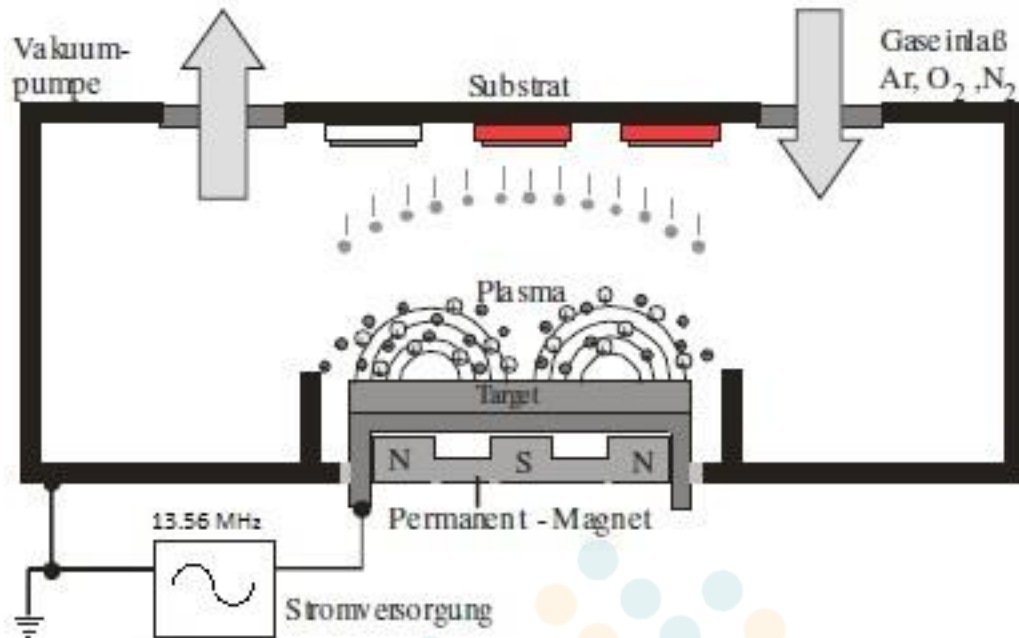
به دلیل پایین بودن فشار گاز، ذرات کنده شده فضای محفظه را بدون برخورد طی می کنند که منجر به افزایش آهنگ لایه نشانی می شود. این روش در مقایسه با سایر روش ها، قابلیت لایه نشانی در مقیاس بزرگ را داراست. بنابراین برای کاربردهای صنعتی به طور گسترده استفاده می شود. این روش در تهیه لایه های با کیفیت بالا و ناخالصی کم و آهنگ پوشش دهی بالا کاملاً موفق بوده است.



شکل (۲) نمایی از روش کندوپاش مغناطیسی

چنان چه ولتاژ منبع تغذیه DC باشد کندوپاش مستقیم نام دارد. در کندوپاش مگنترون DC از یک منبع تغذیه جریان مستقیم برای ایجاد پلازما و فرآیند لایه نشانی استفاده می شود. در این روش امکان پوشش دهی مواد نیمه رسانا و عایق وجود ندارد، و فقط مواد رسانا را می توان به کمک روش کندوپاش DC روی سطوح لایه نشانی کرد. برای لایه نشانی مواد عایق و نیمه رسانا از پتانسیل فرکانس رادیویی (RF)^۵ استفاده می شود، که به این روش کندوپاش RF می گویند. هر فرکانس بالای ۱۰ MHz می تواند به طور موثر برای کندوپاش استفاده شود. متداول ترین فرکانس های مورد استفاده ۱۳,۵۶ MHz و ۲۷ MHz فرکانس های مجاز برای کاربردهای طبی و صنعتی هستند. در شکل (۳) شماتیکی از روش کندوپاش RF نشان داده شده است.

⁵ Radio Frequency



شکل (۳) شماتیک کلی از روش کندوپاش مگنترون RF

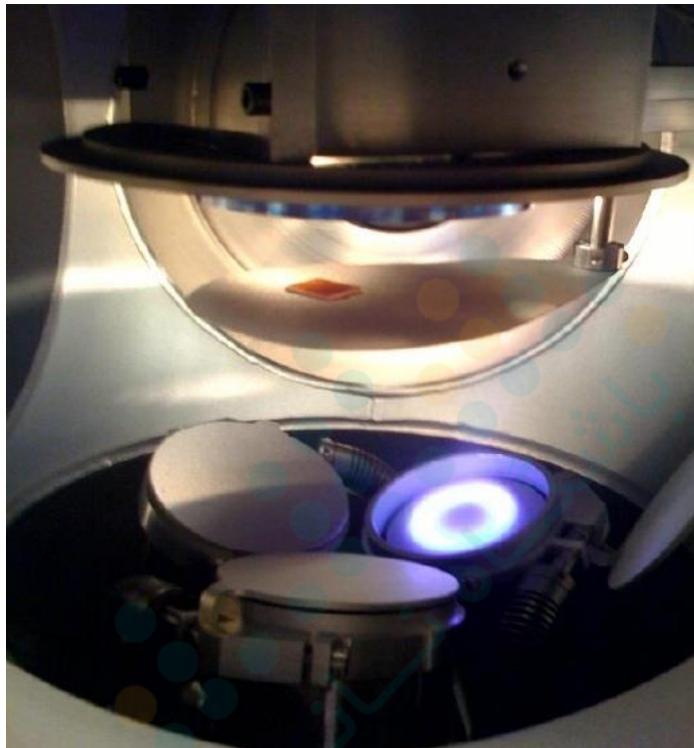
دو مزیت اصلی کندوپاش RF عبارتند از : توانایی کندوپاش مواد نارسانا و کارایی در فشارهای پایین .

متاسفانه، آهنگ کندوپاش در RF به دلیل هدایت گرمایی ناچیز هدفهای نارسانا محدود است. تقریباً هر ماده‌ای، در تخلیه الکتریکی RF به طور واکنشی و غیرواکنشی، قابل کندوپاش است اما لایه‌های بدست آمده ممکن است همان ترکیب اولیه هدف را نداشته باشند. از موارد کاربرد کندوپاش RF می‌توان پوشش دهی فلزات، آلیاژهای فلزی، اکسیدها، نیتrideها و کاربیدها را نام برد.

در کندوپاش واکنشی از گازهایی مانند O₂ و N₂ در کنار گاز بی اثر آرگون استفاده می‌شود. بعنوان مثال برای تولید کربن شبه الماسی از کندوپاش واکنشی استفاده می‌شود که با وارد کردن منابع گازی هیدروکربنی مانند متان، استیلن و یا هیدروژن همراه با گاز آرگون به داخل محفظه خلا، کندوپاش در حضور گازهای فعال متان و ... انجام می‌شود.

علاوه بر این برای ساخت بسیاری از ابزارهای الکترواپتیکی، سنسورها، پوشش های ضد خوردگی و سلول های خورشیدی لایه نازک به بیش از یک ماده برای لایه‌نشانی نیازاست که این مواد به صورت همزمان و یا مرحله-ای بر روی زیرلایه نشانی می‌شوند. از این رو محققین دستگاه های کندوپاش مگنترون را با چند منبع کندپاش می‌سازند، که این دستگاه‌ها قادر به لایه‌نشانی بصورت مولتی لایه و یا آلیاژی بر روی سطح می‌باشند. مهمترین مزیت این روش این است که دیگرمانند روش‌های سنتی پیشین نیاز به شکستن خلا محفظه و تعویض تارگت نیست، که این امر به شدت در کاهش

میزان ناخالصی‌های موجود در لایه تاثیر دارد. از سویی دیگر همان‌گونه که در شکل (۴) ملاحظه می‌گردد، این هدف‌ها می‌توانند در ابعاد مختلف ساخته شوند و هیچ محدودیتی در انتخاب منبع تغذیه و نوع زیرلایه وجود ندارد. به‌عنوان مثال می‌توان از هدف‌های رسانا و نارسانا در کنارهم استفاده کرد و هدف‌های رسانا را به منبع تغذیه DC و هدف‌های نارسانا را به منبع تغذیه RF متصل نمود.

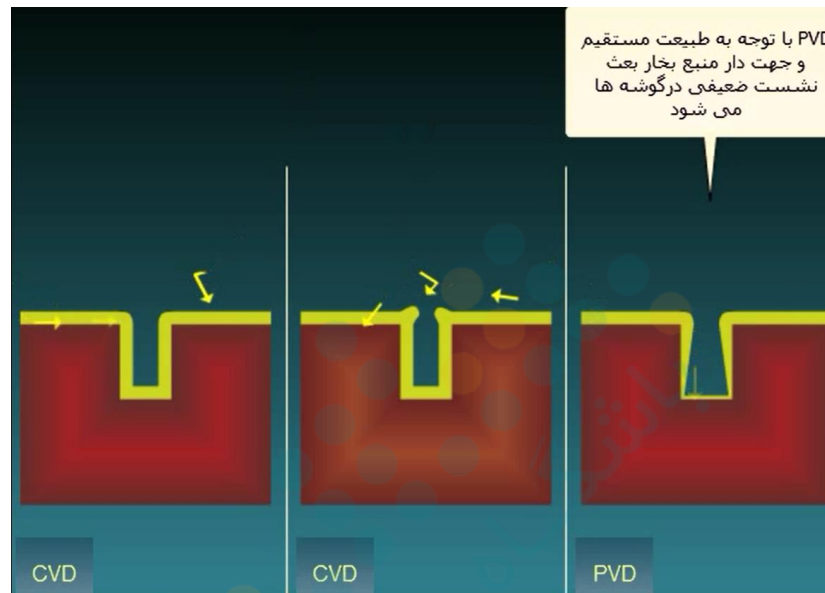


شکل (۴) در لایه‌نشانی با چندمنبع کندوپاش، به صورت مولتی لایه

۴- مزایا و معایب روش کندوپاش

از آن جایی که در روش کندوپاش، ماده‌ای که به‌عنوان منبع لایه‌نشانی می‌باشد به‌جای فرایند شیمیایی یا تبخیر حرارتی، با استفاده از تغییر تکانه از سطح هدف به فاز گاز وارد می‌شود، هر ماده‌ای می‌تواند با این روش لایه‌نشانی شود. بنابراین بسیاری از مواد که طی یک فرایند شیمیایی قابل تولید نیستند و یا برای تبخیر حرارتی به حرارت زیادی نیاز دارند با استفاده از روش کندوپاش می‌توانند لایه‌نشانی شوند. برای مثال فلز تنگستن برای تبخیر به قدری حرارت نیاز دارد که به تجهیزات خلاء دمای بالا نیاز است، اما با روش کندوپاش به راحتی لایه‌نشانی می‌شود. بنابراین مهمترین ویژگی و مزیت فرایند کندوپاش این است که برای گستره‌ای از مواد قابل استفاده است.

یکی از معایب لایه‌نشانی به روش کندوپاش این است که رسوب‌گذاری در آن مانند سایر روش‌های PVD، به صورت جهت‌دار صورت می‌پذیرد، بنابراین برای پوشش دادن شکل‌های پیچیده چندان مناسب نیست. همانگونه که در شکل (۵) بطور شماتیک نشان داده شده رسوب‌گذاری در گودی‌های عمیق، سوراخ‌ها و گوشه‌های شکل‌های سه بعدی پیچیده بخوبی صورت نمی‌گیرد. برای لایه‌نشانی روی شکل‌های پیچیده روش لایه‌نشانی بخار شیمیایی (CVD) مناسب‌تر است.



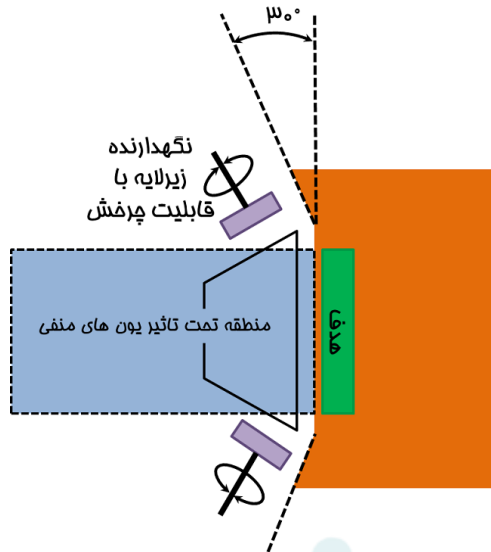
شکل (۵) مقایسه شماتیک لایه‌نشانی زیرلایه‌ها با شکل‌های پیچیده به روش PVD و CVD

در حین لایه‌نشانی به روش کندوپاش، سطح لایه می‌تواند به وسیله یون‌های پرانرژی بمباران شود که به خاطر صدمه رساندن و یا کنده‌شدن اتم‌های سطح لایه تشکیل شده روی زیرلایه، اتفاق خوشایندی محسوب نمی‌شود. به منظور کاهش برخورد یون‌های منفی و کاهش اثر آن‌ها دو رهیافت وجود دارد (از آن جایی که زیرلایه به عنوان آند می‌باشد یون‌های منفی به سمت آن شتاب می‌گیرند)

الف) استفاده از فشار بالای گاز، در اینصورت در اثر برخوردهای ناخواسته یون‌های منفی با اتمها و یون‌های محیط پلاسما، انرژی آنها کاهش یابد و

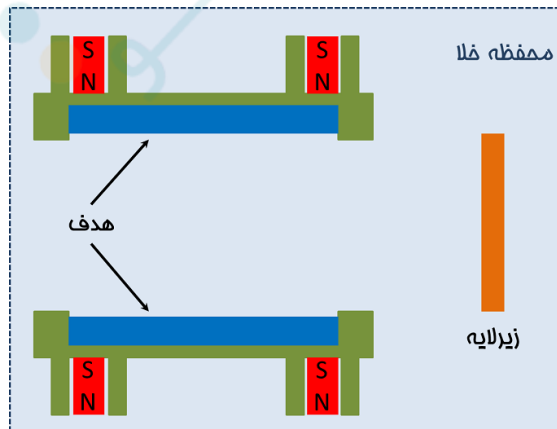
ب) کندوپاش بدون محور که در آن زیرلایه در راستای هدف قرار ندارد.

طرح واره این چیدمان در شکل (۶) مشاهده می‌شود. این روش برای ایجاد لایه‌های نازک ابر رسانا در دماهای بالا به کار گرفته می‌شود. از معایب آن کاهش سرعت لایه‌نشانی و محدودیت در استفاده برای زیرلایه‌های بزرگ است.



شکل (۶) طرح واره سیستم کندوپاش برای کاهش میزان برخورد یون های منفی به لایه که این سیستم به منظور کاهش آسیب وارد شده به لایه، طراحی شده است.

از آن جایی که مواد فرومغناطیس قابلیت نفوذپذیری مغناطیسی بالایی دارند برای لایه‌نشانی آن‌ها به روش کندوپاش نمی‌توان از کندوپاش مغناطیسی متداول استفاده کرد که از کندوپاش هدف نما^۶ استفاده می‌شود. شکل (۷) طرح واره این سیستم را نشان می‌دهد. در این سیستم کندوپاش، از دو هدف استفاده می‌شود که به موازات یکدیگر قرار دارند و زیرلایه در بیرون منطقه پلاسما می‌باشد. این چیدمان نه تنها مزایای کندوپاش مغناطیسی متداول را دارد، بلکه باعث می‌شود که میزان بمباران سطح لایه تشکیل شده روی زیرلایه به وسیله یون‌ها کاهش یابد.



شکل (۷) طرح واره سیستم کندوپاش هدف نما

⁶ Facing Target Sputtering

۵- کاربردهای روش کندوپاش

محصولات زیادی با استفاده از کندوپاش به طور صنعتی تولید می‌شود که از آن جمله می‌توان به لایه های اپتیکی آمورف برای ادوات نوری مجتمع، نورتاب‌ها در نمایشگرها، ادوات حافظه نوری، ادوات حافظه آمورف، خازن و مقاومت‌های لایه نازک، دیسک‌های ویدئویی، الکترولیت های جامد، لیزرهای لایه نازک، تفلون در صنایع خانگی، آلومینیم و فلزات دیرگداز به عنوان رسانا و انواع عایق در صنایع الکترونیکی و الکترودهای شفاف روی زیرلایه های شفاف اشاره کرد.

کاربردهای کندوپاش را می‌توان به چهار کاربرد عمده دسته بندی کرد:

۱- **لایه‌نشانی:** تمامی موادی که قابلیت لایه‌نشانی به روش فیزیکی را دارا هستند می‌توان با روش کندوپاش لایه‌نشانی کرد. این مواد شامل مواد رسانا، نیمه رسانا و عایق هستند. امکان لایه نشانی روی زیرلایه ها با ابعاد بزرگ در این روش وجود دارد. در صورت استفاده از خنک کننده، از زیر لایه‌ها با دمای ذوب پایین مانند پلیمرها و پلاستیک ها می‌توان استفاده نمود.

۲- **حکاکي (Etching):** در صنعت نیمه رساناها برای حکاکي هدف از روش کندوپاش استفاده می‌شود. این روش زمانی استفاده می‌شود که می‌خواهیم حکاکي ها نامنظم و در راستای عمود بر هدف باشند.

۳- تمیز کردن سطوح و زیر لایه ها: از آنجا که در روش کندوپاش اتمهای سطح توسط بمباران یونهای پرنرژی آرگون کنده می‌شوند، می‌توان از روش کندوپاش برای حذف آلودگی های سطوح استفاده نمود.

۴- هر چند روش کندوپاش برای ساخت لایه در مقیاس های نانو تا میکرومتر استفاده می‌شود، تحت شرایط کنترل شده می‌توان با به کارگیری آن نانوذرات فلزی و یا نانوذرات نیمه رسانا تولید کرد.

منابع

- [۱] فیزیک لایه‌های نازک، لودمییدا اکرتوا، ترجمه هادی ساوالانی، مرکز نشر دانشگاهی، چاپ اول ۱۳۸۵.
- [2] P.M. Martin, Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings, Science Applications and Technology, Third Edition, Published by Elsevier Inc,U.S, (2010).
- [3] M. Rizzo and G. Bruno, Surface Coatings, Nova Science Publishers, Inc. New York, (2009).
- [4] Milton Ohering, “Materials Science of Thin Films, Deposition and Structure”, 2nd Edition, New York, Academic Press (2002).
- [5] Wang. Z, Handbook of Nanophase and Nanostructured Material, Kluwer Academic, (1991).
- [6] www.edu.nano.ir

