

## کندوپاش (Sputtering)

کندوپاش (Sputtering) یکی از پرکاربردترین روش های لایه‌نشانی فیزیکی از فاز بخار (Physical Vapor Deposition – PVD) است که در صنایع مختلف از جمله ساخت نیمه‌هادی‌ها، اپتیک، و نانوتکنولوژی استفاده می‌شود.

### ۱. اصول عملکرد (Working Principle)

در این فرآیند از یک محفظه خلأ استفاده می‌شود. گاز بی‌اثر آرگون (Ar) وارد محفظه شده و با اعمال ولتاژ بالا، به پلاسما تبدیل می‌شود. یون‌های مثبت آرگون با انرژی بالا به سطح یک ماده جامد به نام "هدف (Target)" برخورد کرده و اتم‌های آن را با انرژی جنبشی خود از سطح جدا می‌کنند. اتم‌های کنده شده از هدف، در فضای محفظه حرکت کرده و روی سطح قطعه کار (زیرلایه) نشسته و تشکیل یک لایه نازک (فیلم) می‌دهند.

طبق تعریف آیوپاک (IUPAC)، کندوپاش "حذف مواد سطحی (اتم‌ها، خوشه‌ها و مولکول‌ها) توسط بمباران ذرات" است.

در یک تعریف فنی‌تر، کندوپاش فرآیندی است که در آن یون‌های گاز بی‌اثر (معمولاً آرگون) شتاب داده شده و به سطح یک ماده (هدف) برخورد می‌کنند. این برخورد باعث انتقال تکانه و خارج شدن اتم‌های سطح هدف می‌شود.

### ۲. انواع کندوپاش (Types of Sputtering)

کندوپاش به روش‌های مختلفی انجام می‌شود. رایج‌ترین آنها عبارتند از:

نوع	توضیح
کندوپاش دی‌سی (DC Sputtering)	ساده‌ترین روش که از یک منبع تغذیه جریان مستقیم (DC) استفاده می‌کند. مناسب برای مواد رسانا مانند فلزات.
کندوپاش فرکانس رادیویی (RF Sputtering)	از منبع تغذیه فرکانس رادیویی (معمولاً ۱۳,۵۶ مگاهرتز) استفاده می‌شود. این روش برای لایه‌نشانی مواد نارسانا (دی‌الکتریک) مانند اکسیدها و نیتrideها ضروری است.
کندوپاش مغناطیسی (Magnetron Sputtering)	رایج‌ترین روش صنعتی. با استفاده از میدان مغناطیسی در پشت هدف، الکترون‌ها را در نزدیکی سطح هدف به دام می‌اندازد. این کار مسیر حرکت الکترون‌ها را افزایش داده و احتمال برخورد آنها با اتم‌های گاز آرگون را بالا می‌برد، در نتیجه نرخ یونیزاسیون و نرخ لایه‌نشانی (سرعت کندوپاش) بسیار افزایش می‌یابد.
کندوپاش راکتیو (Reactive Sputtering)	در این روش، علاوه بر گاز آرگون، یک گاز واکنش‌دهنده (مانند $O_2$ برای ساخت اکسیدها یا $N_2$ برای ساخت نیتrideها) به محفظه اضافه می‌شود. اتم‌های کنده شده از یک هدف فلزی با گاز واکنش‌دهنده ترکیب شده و لایه‌ای از یک ترکیب (مانند $TiN$ ، $TiO_2$ ، $Al_2O_3$ ) بر روی زیرلایه تشکیل می‌دهند.

### ۳. اجزای اصلی (Key Components)

- **محفظه خلأ (Vacuum Chamber):** محیط بسته و ایزوله‌ای که فرآیند در آن انجام می‌شود. برای رسیدن به خلأ بالا (حدود  $10^{-8}$  تور) طراحی شده است.
- **هدف (Target):** ماده مبدأ که قرار است لایه نازک از آن ساخته شود. می‌تواند فلز، آلیاژ، سرامیک یا سایر ترکیبات باشد.
- **زیرلایه (Substrate):** قطعه‌کاری که لایه نازک روی آن نشست می‌کند (مانند ویفر سیلیکونی، شیشه و...).
- **سیستم پمپاژ (Pumping System):** شامل پمپ‌های توربو مولکولی و پمپ‌های پشتیبان برای ایجاد خلأ بالا.
- **منبع تغذیه (Power Supply):** تأمین کننده ولتاژ و توان الکتریکی DC یا RF برای ایجاد پلاسما.
- **ورودی گاز (Gas Inlet):** برای کنترل جریان گازهای آرگون، اکسیژن، نیتروژن و....

### ۴. مزایا و معایب کندوپاش (Advantages & Disadvantages)

بر اساس منبع آکسفورد، مهم‌ترین مزایا و معایب این روش عبارتند از:

✓مزایا:

- **نرخ لایه‌نشانی بالا (High Deposition Rate):** به طور مثال برای فلزات تا  $100$  آنگستروم بر ثانیه که برای کاربردهای صنعتی با تولید بالا بسیار مناسب است.
- **کیفیت عالی فیلم (Excellent Film Quality):** فیلم‌های تولید شده چگالی بالا و تنش متوسط تا زیاد دارند.
- **یکنواختی خوب (Good Uniformity):** منجر به افزایش بازده تولید می‌شود.
- **خلوص بالا (High Purity):** به دلیل انجام در خلأ، میزان آلودگی بسیار پایین است.
- **انعطاف‌پذیری (Flexibility):** قابلیت لایه‌نشانی طیف گسترده‌ای از مواد شامل فلزات، آلیاژها، اکسیدها، نیتريد‌ها و سایر دی‌الکتريک‌ها.

✗معایب:

- **گرمايش زیرلایه (Substrate Heating):** برخورد ذرات پرانرژی به زیرلایه می‌تواند باعث افزایش دمای آن شود که برای برخی مواد حساس به حرارت مضر است.
- **جهت‌مندی کم (Low Directionality):** اتم‌های کنده شده از هدف در همه جهات پخش می‌شوند. هر چند این مشکل با بهینه‌سازی هندسه سیستم قابل بهبود است.

- نرخ پایین برای دی‌الکتریک‌ها: لایه‌نشانی مواد نارسا به مراتب کندتر از فلزات است (معمولاً ۰,۱ تا ۱۰ آنگستروم بر ثانیه).

## ۵. کاربردها (Applications)

کندوپاش کاربردهای بسیار گسترده‌ای در صنعت و فناوری دارد:

زمینه	مثال
صنعت الکترونیک و نیمه‌هادی‌ها	ساخت لایه‌های فلزی (مس، آلومینیوم) برای اتصالات داخلی در تراشه‌ها. لایه‌های مانع (TiN)، (TaN) ساخت هدهای خواندن/نوشتن هارد دیسک‌ها.
صنعت اپتیک (Optics)	ساخت پوشش‌های ضد انعکاس (AR) روی لنزها و شیشه‌ها. ساخت فیلترهای نوری و آینه‌ها.
ساخت مان و خودرو (Glass Coating)	تولید شیشه‌های کم‌گسیل (LOW-E) برای ساختمان‌ها و خودروها که موجب صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌شوند.
قطعات سخت و ابزارآلات (Hard Coatings)	پوشش‌دهی مته‌ها، قالب‌ها و تیغه‌ها با لایه‌های فوق‌سخت مانند TiN، TiCN و CrN که مقاومت به سایش و طول عمر آنها را افزایش می‌دهد.
نانو تکنولوژی	ساخت لایه‌های نازک برای تحقیقات در علوم مواد، نانوذرات و تجهیزات پیشرفته.

## جمع‌بندی نهایی ✨

کندوپاش یک فناوری کلیدی و حیاتی در ساخت ادوات مدرن، از گوشی هوشمند در جیب شما گرفته تا تجهیزات پیشرفته فضایی است. این تکنیک با ارائه تعادل عالی بین کیفیت فیلم، خلوص و نرخ تولید، به یکی از ستون‌های اصلی صنعت لایه‌نشانی تبدیل شده است. اگر به دنبال لایه‌نشانی دقیق با قابلیت کنترل بالا هستید، کندوپاش مغناطیسی انتخابی ایده‌آل است.