

به نام خدا



مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

www.Iran-mavad.com



نانو ساختارها

فیلم های نازک

صفورا کفاش یزدی - کارشناسی ارشد - مهندسی مواد - دانشگاه شیراز
محمد هادی مقیم - دکتری تخصصی - مهندسی مواد - دانشگاه شیراز دانشکده فنی و مهندسی گروه مهندس

مفهوم لایه های نازک

به طور کلی لایه به ماده یا موادی گفته می شود که به صورت پوششی بر یک سطح یا ماده می نشینند و باعث ایجاد خواص الکتریکی، فیزیکی و مکانیکی سطحی جدیدی می شود که خصوصیات سطحی زیر لایه را ارتقاء می بخشد.

معمولاً در فیزیک حالت جامد، مواد را به صورت توده ای مورد بررسی قرار می دهند. در عموم روش های لایه نشانی، هنگامی که ماده از حالت توده ای به صورت اتم ها، ملکول ها یا یون های مجزا در آیند و روی سطح زیر لایه نشینند، پوششی ایجاد می شود که آنرا لایه می نامند. چگالش ذرات اتمی، ملکولی یا یونی برای تشکیل لایه بر روی زیر لایه توسط فرایندهای فیزیکی و شیمیایی مختلفی صورت می گیرد. شکل ۱ شماتیک ساختار لایه و زیر لایه را نشان می دهد.



شکل ۱ شماتیک ساختار لایه و زیر لایه نسبت به هم

معمولاً اگر لایه تشکیل شده نازک باشد، خواص فیزیکی جدیدی از خود بروز می دهد که با خواص همان لایه به صورت توده ای متفاوت است که به این ترتیب می توان قابلیت های جدیدی به محصول افزود. اصولاً لایه ها و پوشش های مختلف از نقطه نظر ضخامت به سه گروه تقسیم می شوند که عبارتند از:

۱. لایه های بسیار نازک با ضخامت کمتر از ۵۰ انگستروم

۲. لایه های نازک با ضخامت بین ۵۰ تا ۵۰۰۰ انگستروم

۳. لایه های ضخیم با ضخامت بیش از ۵۰۰۰ انگستروم

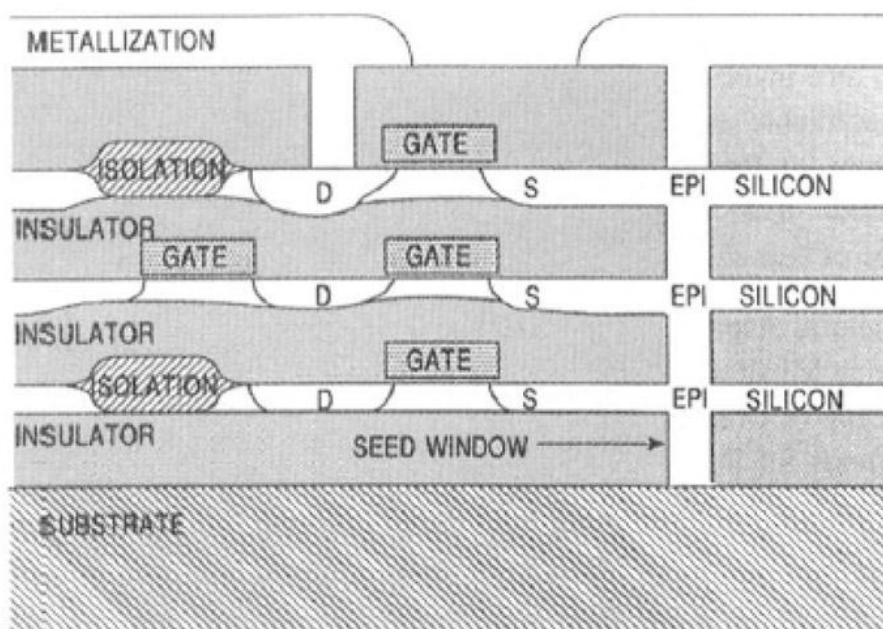
طبق تعریف بالا، لایه های نازک لایه هایی هستند که ضخامت آنها بین ۵۰ تا ۵۰۰۰ انگستروم می باشد. به بیان دیگر لایه های نازک، لایه های با دقت اتمی طراحی شده ای از انواع مواد اعم از فلزات، عایق ها، نیمه رساناها هستند. لایه های نازک را می توان در دسته پوشش های نانو ساختار دسته بندی کرد. همچنین کاربرد عمده این لایه های نازک در اصلاح خواص سطح جامدات است.

لایه های نازک و بسیار نازک، از دو ویژگی مهم برخوردار هستند. اولین ویژگی، ضخامت زیرمیکرونی آن است که هر چه به اندازه نانو نزدیک تر شود، ویژگی های متفاوت تری را برای لایه به وجود می آورد. دومین ویژگی آن است که لایه ها می توانند سطوح فوق العاده بزرگی نسبت به ضخامت داشته باشند. این دو ویژگی باعث پدید آمدن خواص متفاوت تر، و کاربردی می شوند که در قسمت خواص لایه های نازک به آن پرداخته خواهد شد.

اهمیت لایه های نازک

در سال های اخیر، علم لایه های نازک در میان سایر علوم رشد قابل ملاحظه ای داشته و حجم وسیعی از تحقیقات را به خود اختصاص داده است. بی شک رشد چشمگیر ارتباطات، پردازش اطلاعات، ذخیره سازی، صفحه های نمایش، صنایع تزئینی، ابزارآلات نوری، مواد سخت و عایق ها نتیجه تولید لایه های نازک براساس فناوری های نوین می باشد. در ساخت لایه های نازک نیز در سال های اخیر تحولات وسیعی صورت گرفته است که خود ناشی از پیشرفت در فناوری خلاء، تولید میکروسکوپ های الکترونی و ساخت وسایل دقیق و پیچیده ی شناسایی مواد است. همچنین باز شدن مباحثی نظیر میکروالکترونیک، اپتیک و نانوتکنولوژی

مدیون اهمیت پوشش های لایه نازک می باشد. از نقطه نظر تاریخی در ابتدا تکنولوژی لایه نازک در صنایع مدارهای مجتمع (شکل ۲) استفاده شد. در ادامه طی ۴۰ سال اخیر، نیاز صنایع به ابزارهای کوچکتر و سریعتر، تکنولوژی و فیزیک لایه های نازک را جهت رسیدن به این هدف بهبود بخشید.



شکل ۲- تصویر مقطع عرضی مدل یک مدار مجتمع (IC) سه بعدی

لایه های نازک با ضخامت زیر میکرونی، با خواصی ناشی از همان دو ویژگی اصلی آنها که شامل نازک بودن و بزرگی فوق العاده نسبت سطح به حجم است، کاربردهای فراوانی در فناوری های نوین یافته اند. برخی خصوصیتی که در اثر نازک بودن سطح به وجود می آید شامل افزایش مقاومت ویژه، ایجاد پدیده تداخل نور، پدیده تونل زنی، مغناطیس شدگی سطحی، تغییر دمای بحرانی ابررساناها می باشد. همچنین برخی خصوصیتی که از بزرگی سطح لایه های نازک ناشی می شود شامل پدیده جذب سطحی فیزیکی و پدیده جذب سطحی شیمیایی، پدیده پخش و فعالسازی می باشد.

با توجه به عملکرد و خواص لایه های نازک، می توان از آنها جهت بهبود تکنولوژی هایی نظیر سلولهای خورشیدی، سنسورها، کاربردهای نوری، مهندسی الکترونیک و فروالکترونیک نیز استفاده نمود. امروزه کاربرد لایه نشانی در صنایع، موضوع توسعه یافته ای است. به گونه ای که بخش بزرگی از زندگی مدرن را مدیون توسعه صنعت لایه نشانی می دانند.

تاریخچه لایه های نازک

فناوری لایه های نازک قدمتی چند هزار ساله دارد. این تکنولوژی، به طور همزمان، هم یکی از قدیمی ترین هنرها و هم یکی از جدیدترین علوم می باشد. احتمالاً مصریان اولین کسانی بودند که از هنر زرکوبی و طلاکاری برای تزیین و مقاوم سازی سطوح استفاده می کرده اند. در حدود چهار هزار سال پیش، هنر چکش کاری طلا با تولید ورقه های بسیار نازک زیبا و پایدار در برابر فرایندهای شیمیایی کاربرد داشته است. همچنین در گذشته، سالیان متمادی لایه نشانی جیوه بر روی قطعات مسی انجام می گرفته است. صرفنظر از امکان استفاده لایه های نازک، فناوری تولید لایه نازک از حدود ۳۰۰ سال پیش آغاز شد. اولین روشی که منجر به تولید لایه نازک فلزی شد، در سال ۱۸۳۸ به روش الکترولیز بود. در قرن ۱۹ میلادی لایه نازک مایع از دیدگاه اپتیکی بسیار مورد توجه بوده است. رفته رفته با پیشرفت تکنولوژی، در قرن ۲۰ میلادی تولید لایه نازک جامد رشد کرد. در اوایل قرن ۲۰ میلادی، با رشد تکنولوژی میکروالکترونیک، ساخت لایه های نازک تر از ۱ میکرومتر (زیرمیکرونی) اهمیت ویژه ای بدست آورد و در اواخر قرن ۲۰ با ظهور و پیشرفت مباحث نانومتری و پیدایش روش های شناسایی نظیر XPS، تولید لایه ی نازک نانومتری (زیر ۱۰۰ نانومتر) پیشرفت چشمگیری پیدا کرد.

فیزیک لایه های نازک

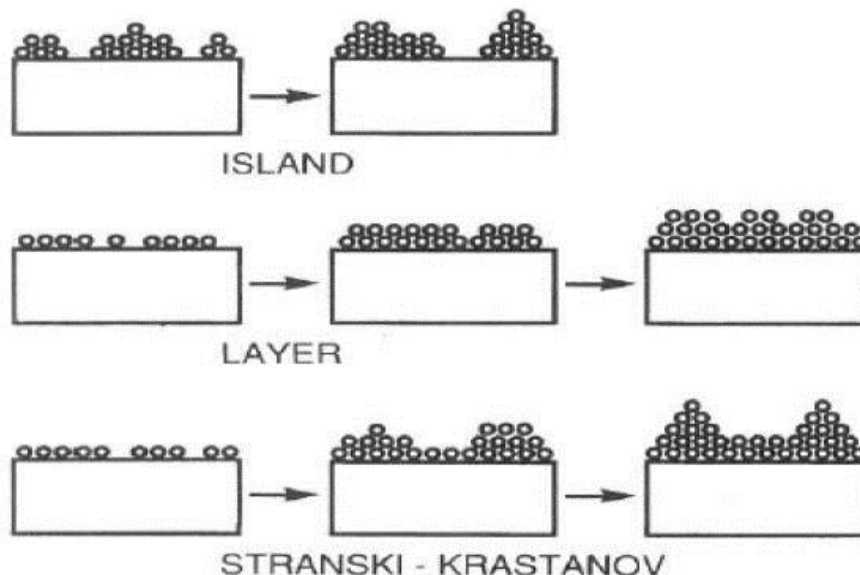
فرایند رشد لایه های نازک در حالت لایه نشانی شبیه توده مواد، بصورت صفحه کامل نیست. وقتی با حجم ماده مقایسه می شود، خواص فیزیکی لایه نازک روی زیرلایه، قویاً ممکن است متفاوت باشد که وابسته به ساختار و مورفولوژی آن است. ویژگیهایی نظیر اندازه دانه، شکل، جهت و ... به مقدار زیادی مرتبط با مراحل جوانه زنی و رشد تعیین می شود و می تواند متاثر از شرایط لایه نشانی باشد [۷ و ۸]. فرایند رشد اتمی به این صورت است که در ابتدا یک ذره از فاز بخار، کندانس می شود که ممکن است بلافاصله تبخیر مجدد شود و یا در میان سطح نفوذ کند. فرایند نفوذ ممکن است به جذب در مکان های خاصی بیانجامد. طی فرایند رشد، برای بدست آمدن لایه ای با سطح صاف، به موبیلیته سطحی کافی جزء نفوذ کننده و دمای بالا نیاز می باشد.

برای تشکیل لایه، ماده اولیه سه مرحله اساسی را طی می کند. در مرحله اول، ماده اولیه به ذره های اتمی، ملکولی یا یونی تبدیل می شود. سپس در مرحله دوم، فاصله بین منبع تا زیرلایه را طی می کند و در مرحله آخر، چگالش ذرات بر روی زیرلایه و تشکیل یک لایه جامد صورت می گیرد. چگالش لایه های نازک به شکل های مختلفی رخ می دهد که هر شکل آن به عوامل متعددی وابسته است که از آن دسته می توان به برهم کنش بین اتم های لایه ی در حال رشد و اتم های لایه و زیرلایه اشاره کرد. بطور عمده سه نوع رشد لایه نازک مشاهده گردیده است:

۱. رشد لایه به لایه

۲. رشد جزیره ای

۳. رشد لایه ای-جزیره ای



شکل ۳-شمتیک انواع فرایند رشد

شکل ۳ شمتیک سه فرایند را به خوبی نشان می‌دهد. فرایند رشد لایه به لایه زمانی اتفاق می‌افتد که نیروی برهم کنش بین اتم‌های زیرلایه و لایه، قویتر از نیروی برهم کنش بین فقط اتم‌های لایه باشد. ابتدا یک لایه از اتم‌ها بر روی زیرلایه ی جامد شکل می‌گیرد، سپس لایه دوم روی لایه اول تشکیل می‌گردد. لایه جدید، تنها زمانی شروع به رشد می‌کند که لایه قبلی کامل شده باشد. این نوع رشد، به رشد فرانک و ندرمرو نیز معروف است. اما چنانچه برهم کنش بین اتم‌های لایه بیشتر از برهم کنش بین اتم‌های لایه و زیرلایه باشد، لایه‌ها بصورت جزیره ای رشد خواهند کرد. نام دیگر این نوع رشد، رشد ولمر-ویر می‌باشد. پیوند اتم‌ها به یکدیگر در حالت رشد جزیره ای قوی تر از پیوند آنها به زیرلایه است. رشد جزیره ای-لایه ای، که حالتی بین رشد لایه به لایه و رشد جزیره ای می‌باشد، یک یا چند تک لایه تشکیل می‌شود و سپس جزایر تکمیل می‌گردد. نام دیگر فرایند رشد، استرانسکی-کرسٹانف می‌باشد. در این حالت از رشد، بین لایه ی پوشش داده شده و زیرلایه ممکن است یک شبکه نامطابق ایجاد شود. اندازه دانه لایه نازکی که روی زیرلایه تشکیل می‌شود، بستگی به سرعت و دمای لایه نشانی آن دارد.

کیفیت لایه های نازک

با توجه به نوع کاربرد لایه های نازک می توان کیفیت ساخت آنها را تغییر داد. از عواملی که در کیفیت لایه نازک موثرند می توان به سرعت لایه نشانی، دمای زیرلایه، نوع خلاء، ساختار زیرلایه و تطابق آن با لایه اشاره نمود. در مورد سطح مشترک لایه و زیرلایه، بایستی مرز مشترک آن عاری از آلودگی و ناخالصی باشد و ناصافی آن به حداقل ممکن خود برسد تا اتصال در سطح مشترک به خوبی صورت گیرد. در مورد ساختار نیز، نظم اتمی لایه و زیرلایه می تواند نقش مهمی در ویژگی های لایه نازک داشته باشد. همچنین خواص شیمیایی به دلیل ایجاد واکنش شیمیایی که ممکن است بین اتم های لایه و زیرلایه صورت بگیرد، بایستی به دقت مورد بررسی قرار گیرد. در حیطه خواص حرارتی، نزدیکی ضریب انبساط حرارتی لایه و زیرلایه موضوع حائز اهمیتی است تا لایه ایجاد شده بر روی زیرلایه چروکیده یا پاره نشود. همچنین در برابر شوک های حرارتی بایستی مقاوم باشند و در مورد خاصیت مکانیکی، لایه و زیرلایه بایستی از استقامت مکانیکی خوبی برخوردار باشند

پوشش ها براساس ضخامت آنها در سه گروه، زیر ۵۰ آنگستروم، بالای ۵۰۰۰ آنگستروم و بین این دو مقدار دسته بندی می شوند که لایه های نازک را در ضخامت بین ۵۰ و ۵۰۰۰ آنگستروم قرار می دهند. تولید این لایه ها از حدود ۳۰۰ سال پیش آغاز شده است اما طی چند سال اخیر با پیشرفت فناوری نانو، شمار زیادی از تحقیقات را به خود اختصاص داده است. اهمیت لایه های نازک علاوه بر خواص پوششی آنها، شامل خواص الکتریکی، نوری و... نیز می باشد که از دو ویژگی اساسی لایه های نازک که همان نازک بودن و بزرگی فوق العاده نسبت سطح به حجم است، حاصل می گردد و باعث پیشرفت در صنایع میکروالکترونیک، فروالکترونیک، اپتیک و ... گشته است. خواص فیزیکی لایه های نازک عموماً متفاوت از توده ماده است و با توجه به شرایط لایه نشانی و ساختار لایه تشکیل شده، می تواند تغییر کند. سرعت لایه نشانی، دمای زیرلایه، نوع خلاء، ساختار زیرلایه و تطابق آن با لایه از جمله عوامل تاثیر گذار بر کیفیت لایه نازک می باشند. اتم ها در فاز بخار، در صورت نفوذ در مکانهای خاصی

روی سطح ماده، کندانس شده و موجب رشد لایه می گردد که براساس همین مکانهای خاص سطحی و میزان نیروی پیوند بین اتم های لایه و زیرلایه، فرایند رشد لایه نازک تعیین می شود.

خواص لایه نازک

خواص لایه های نازک نظیر خواص مکانیکی، نوری، الکتریکی و ... به پارامترهای زیادی وابسته است که این پارامترها مربوط به روش تولید و کیفیت و نوع ماده ی زیر لایه خواهند بود. در مورد روش های لایه نشانی از پارامترهای مربوط به روش تولید می توان به میزان خلا ، جریان گاز عبوری حین فرایند رشد لایه، سرعت لایه نشانی و خلوص مواد پوشش اشاره کرد. در این مقاله در مورد خواص برجسته لایه های نازک بحث خواهد شد.

خواص مکانیکی

یکی از خواص مهم لایه های نازک خواص مکانیکی می باشد. روش های مختلف تولید و ساخت لایه های نازک، باعث ایجاد عیوب از جمله نابجایی ها در لایه ها می شود و چون در لایه های نازک این عیوب قابلیت حرکت ندارند در جای خود قفل می شوند. غلظت بالای نابجایی ها و عدم تحرک آنها در لایه نازک سبب افزایش خواص مکانیکی نظیر سختی و مقاومت به سایش آنها می شود که قابل مقایسه با بالک ماده نیست. از طرفی، افزایش شدید غلظت نابجایی ها موجب ایجاد تنش در ساختار لایه نازک می شود و از آنجا که معمولاً بیشتر روش های لایه نشانی در دمای بالاتر از دمای محیط استفاده می شوند (نظیر روش های PVD و CVD ، مقداری تنش حرارتی نیز در لایه نازک ایجاد می شود که مقدار آن تابع اختلاف دمای لایه نشانی و دمای کاربردی لایه نازک می باشد.

رفتار مکانیکی لایه های نازک مانند استحکام و چسبندگی آن ها سهم بسزایی در کارایی لایه های نازک دارد. عوامل موثر بر خواص مکانیکی شامل اندازه و شکل دانه های تشکیل شده درون لایه ها؛ حضور تهی جاها، نا بجایی ها، خلل و فرج؛ و ... می باشد. تنش در لایه های نازک به دو نوع تنش های گرمایی و تنش های ذاتی تقسیم می شود. تنش نوع اول، به این دلیل ایجاد می شود که اکثر فرایندهای لایه نشانی در دمای بالا انجام می

شود و چون مواد مختلف، ضرایب انبساط گرمایی متفاوتی دارند، در هنگام لایه نشانی بین لایه و زیرلایه این تنش ایجاد می شود. دومین نوع تنش که به تنش ذاتی یا داخلی معروف است به عواملی چون فرایندهای رشد غیر تعادلی بستگی دارد و موجب تشکیل ساختارهای غیر تعادلی می شود. از دیگر خواص مکانیکی لایه های نازک، استقامت کششی لایه های نازک می باشد. تنش کششی لازم برای اینکه لایه ای ترک بردارد کمیت مهمی است که هر چه میزان آن بزرگتر باشد، لایه سخت تر کشیده می شود. به طور کلی استقامت کششی لایه، تابع ضخامت لایه است. همچنین تشکیل لایه اکسیدی بر روی لایه می تواند باعث افزایش استقامت کششی لایه گردد.

خواص الکتریکی

بررسی خواص الکتریکی مواد عمدتاً براساس نظریه نواری صورت می گیرد که در آن ترازهای انرژی الکترونی و چگالی حالت ها، فلز یا نیم رسانا و یا عایق بودن ماده را تعیین می کنند. این ترازهای انرژی در توده مواد و در سطح مربوط به لایه های نازک با یکدیگر متفاوتند. به این ترتیب که برخی ترازهای انرژی ممنوعه در حالت توده مواد تبدیل به ترازهای گسسته مجاز می شوند. همچنین در فصل مشترکی که دو سطح با یکدیگر برهم کنش دارند، ترازهای انرژی دیگری را تحت تاثیر قرار می دهند. کاربرد این مباحث در اتصالات بین قسمت های مختلف مدارهای مجتمع، وسایل میکروالکترونیک، الکترونیک و... با استفاده از لایه های نازک می باشد. در مواد رسانا صرفنظر از اینکه یک ماده بالک یا لایه نازک باشد، تعدادی حامل بار الکتریکی (n) با بار (q) داریم که با سرعت مشخص (V) در میدان الکتریکی (e) حرکت می کند که سبب عبور جریان با چگالی (j) در ماده می شود.

$$j = nqV$$

در جاییکه μ موبیلیته الکترون هاست؛

$$V = \mu e$$

$$j = \sigma e$$

بنابراین رسانایی مواد (σ) برابر می شود با:

$$\sigma = nq\mu$$

در مورد لایه نازک علاوه بر اینکه تعداد حامل های بار کاهش می یابد، به علت کاهش ضخامت لایه، حرکت الکترون ها نیز محدود می شود. به همین علت الکترون ها با اندک انحراف از مسیر حرکتشان (Surface Scattering)، باعث کاهش رسانایی می شوند. فاصله یک انحراف از مسیر حرکت تا انحراف دیگر را طول پویش آزاد میانگین (Mean Free Path) می نامند که رسانایی ماده تابع این پارامتر می باشد. ضخامت لایه نازک می تواند کمتر از طول پویش آزاد آن گردد، در این حالت، الکترون ها دائما با دیواره لایه نازک برخورد می کند و رسانایی ماده بسیار کاهش می یابد و این به معنی افزایش شدید مقاومت الکتریکی لایه نازک خواهد بود. در لایه های نازک فلزی، مقاومت الکتریکی بیشتر از بالک ماده است که این میزان با افزایش ضخامت لایه نازک، کاهش پیدا می کند.

در ساخت لایه های نازک، سه نوع مورفولوژی می تواند ایجاد شود:

۱. لایه، ساختار کاملا منسجم داشته باشد.

۲. لایه دارای تخلخل باشد.

۳. لایه بصورت ذرات جدا از هم تشکیل شود.

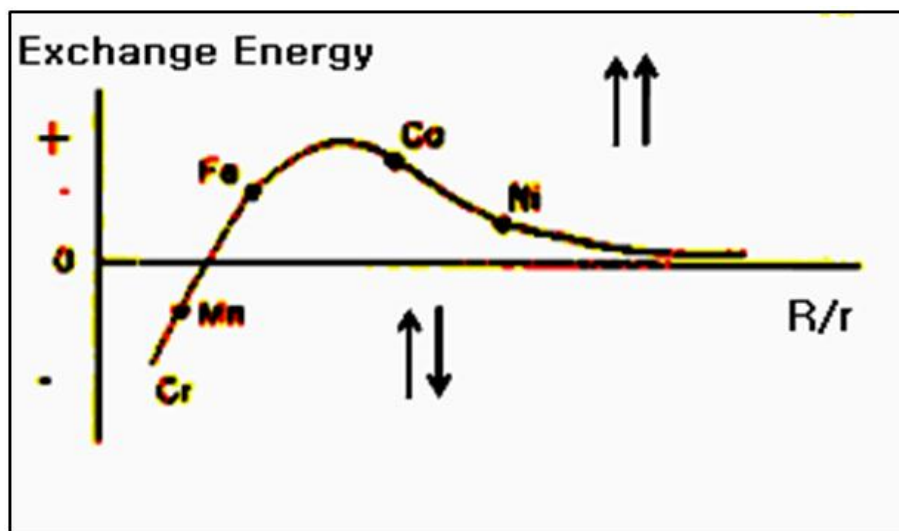
خواص الکتریکی لایه های نازک شدیداً به مورفولوژی آن بستگی دارد. در این میان، بهترین رسانایی مربوط به لایه های نازک منسجم و کمترین میزان رسانایی در لایه های با ذرات جدا از هم می باشد. در لایه های فلزی منسجم نیز، رسانایی بسیار بیشتر از لایه های فلزی غیر منسجم می باشد. اما برخلاف لایه های فلزی منسجم، با افزایش دما رسانایی لایه های فلزی غیر منسجم افزایش می یابد. رسانایی لایه نازک منسجم (σ) از رابطه زیر به دست می آید:

$$\sigma = ne^2 l / m V$$

در جایگاه l طول پویش آزاد الکترون، n تعداد حامل های بار، e بار الکترون، m جرم الکترون و V سرعت میانگین الکترون ها در ناحیه فرمی است.

خواص مغناطیسی

اساس خاصیت مغناطیسی مواد به چرخش الکترون به دور خود یا اسپین الکترون (Spin) مربوط است. مطابق شکل، اگر نسبت R/r شعاع اتم به شعاع اوربیتال تک الکترونی به گونه ای باشد که میزان انرژی تبدلی (Exchange Energy) در ناحیه مثبت قرار گیرد، ماده می تواند خاصیت مغناطیسی از خود نشان بدهد



شکل ۴ نمودار تعیین فرومغناطیس و آنتی فرو مغناطیسی مواد

انرژی تبدلی در واقع انرژی است که موجب موازی شدن اسپین الکترون ها می شود. فلزات واسطه نظیر Fe و Co و Ni و Gd جز مواد مغناطیسی طبیعی هستند. به منطقه ای که در آن اسپین الکترون ها موازی و هم جهت است، ناحیه مغناطیسی (Magnetic Domain) گفته می شود. اندازه این دومین ها در حدود ۵۰ میکرومتر می باشد. با کاهش ضخامت لایه نازک خاصیت مغناطیسی نیز کاهش می یابد. زیرا در این حالت به علت افزایش تعداد الکترون های سطحی و آزادی بیشتر این الکترون ها، به سختی می توان همه الکترون ها را هم جهت و موازی نمود. کاهش بیشتر ضخامت لایه های نازک به کمتر از اندازه دومین مغناطیسی می تواند آنها را به لایه

های پارامغناطیس تبدیل کند. اما در لایه های نازک، آثار پارامغناطیس و دیا مغناطیس به قدری ضعیف است که به سختی آشکار می شود. خواص فرو مغناطیس به دمای زیرلایه، آهنگ لایه نشانی و اجزای سازنده بستگی دارد. با استفاده از فلزات مغناطیسی (Fe) و Co و Ni می توان لایه های نازک فرومغناطیس تولید نمود که کاربرد وسیعی در ابزار حافظه کامپیوتر دارند زیرا در لایه های نازک به علت کاهش تعداد دومین ها، زمان مغناطیس شدن و مغناطیس معکوس، کاهش می یابد. خاصیت مغناطیسی لایه های نازک به شدت به مورفولوژی و میکروساختار و تاحدودی به شکل هندسی لایه بستگی دارد.

خواص نوری

پدیده های مختلف نوری در مواد شامل بازتاب (Reflection)، جذب (Absorption)، عبور (Transmission) و تداخل (Scattering) نور می باشد.

$$R_{\lambda} + A_{\lambda} + T_{\lambda} + S_{\lambda} = 1$$

به طوری که R_{λ} درصد بازتاب، A_{λ} درصد جذب، T_{λ} درصد عبور و S_{λ} درصد پراکندگی نور می باشد. پارامترهای اصلی واکنش نور با لایه های نازک شامل ضریب شکست (n: Refraction Index) و ثابت جذب (k: Index of Absorption) می باشد. به طور کلی هیچ ماده ای وجود ندارد که نور را کاملاً جذب کند یا آنرا به طور کامل بازتاب کند. تمام جامدات قسمتی از نور را جذب و قسمتی از آن را بازتاب می کنند. چنانچه در ماده ای، $k \gg n$ باشد یعنی در آن ماده جذب بالا اتفاق می افتد مانند مواد عایق و دی الکتریک ها و اگر $k < n$ در لایه های نازک در محدوده نانومتری با ضخامت بالاتر از ۱۰ نانومتر، ضریب شکست (n) لایه از ضریب شکست همان ماده در حالت بالک کوچکتر است و در مقابل، ضریب جذب آن (k) بالاتر از بالک ماده است. بنابراین در لایه های نازک جذب نور بالاتری دارند.

درجه افزایش k و کاهش n تابع پارامترهای لایه نشانی نظیر نحوه لایه نشانی، تخلخل لایه و ضخامت آن می باشد. معمولاً برای لایه نشانی با اهداف نوری، از روش های فیزیکی استفاده می شود. از تغییراتی که در ثابت های جذب و بازتاب لایه نازک ایجاد می شود، می توان در کاربردهای وسیعی نظیر آینه ها و لایه های

ضدانعکاس (Antireflection) استفاده نمود. در مباحث خواص نوری در لایه های نازک، بیشترین کاربرد مربوط به سیستم های چندلایه است که با ترکیب چند لایه با ضخامت ها و ضریب شکست های متفاوت می توان کاربردهای متفاوتی را ایجاد نمود.

خواص شیمیایی

در لایه های نازک به علت سطح تماس زیاد لایه با محیط، واکنش پذیری لایه نسبت به ماده بالک افزایش می یابد، لذا از این خاصیت لایه های نازک می توان به عنوان سنسور شناسایی مواد شیمیایی استفاده نمود.

خواص حرارتی

لایه های نازک از آنجا که نسبت سطح به حجم بالایی دارند لذا تعداد اتمهای سطحی آنها بیشتری دارند و چون اتم های سطحی ماده آزادی عمل بیشتری نسبت به اتم های درون شبکه دارند، به همین دلیل دمای ذوب لایه نازک کمتر از دمای ذوب همان ماده در حالت بالک ماده می باشد.

بررسی خواص لایه های نازک مشخص است که خواص لایه نسبت به توده ماده رفتار متفاوتی از خود نشان می دهد. خواص الکتریکی وابسته به نوع عیوب ایجاد شده خواهد بود. در بحث خواص الکتریکی لایه های نازک گفته شد که رسانایی الکتریکی لایه با کاهش ضخامت آن، کاهش می یابد و در مقابل میزان مقاومت الکتریکی در لایه های نازکتر، مقادیر بزرگتری خواهد داشت. با کاهش ضخامت لایه های نازک، میزان مغناطیس شدن آنها نیز کم می شود و در مورد خواص نوری، با کاهش ضخامت لایه، جذب نور در آن افزایش خواهد داشت. همچنین به علت افزایش میزان سطح به حجم در لایه های نازک، تغییر دما و واکنش شیمیایی نسبت به توده ماده با سرعت بیشتری انجام خواهد گرفت.

روشهای سنتز لایه های نازک

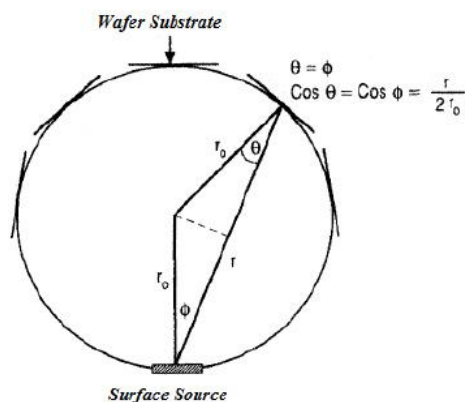
روشهای سنتز لایه های نازک به دو دسته عمده روش های فیزیکی و روش های شیمیایی تقسیم بندی می شوند. این روش ها بسته به پروسه اعمال لایه، منبع انرژی و محیط اعمال لایه نامگذاری می شود. در این بین، روش های لایه نشانی بخار شیمیایی جزء متنوع ترین روش های لایه نشانی می باشند.

روش های فیزیکی: (Physical Method)

قدیمی ترین روش پوشش دهی فیلم های نازک، روش فیزیکی است که در سال ۱۸۵۷ توسط فارادی با تبخیر یک فیلامان فلزی انجام گرفت. این روش شامل دو روش تبخیری (Evaporation) و پراکنش یا کندوپاش (Sputtering) می باشد.

Evaporation

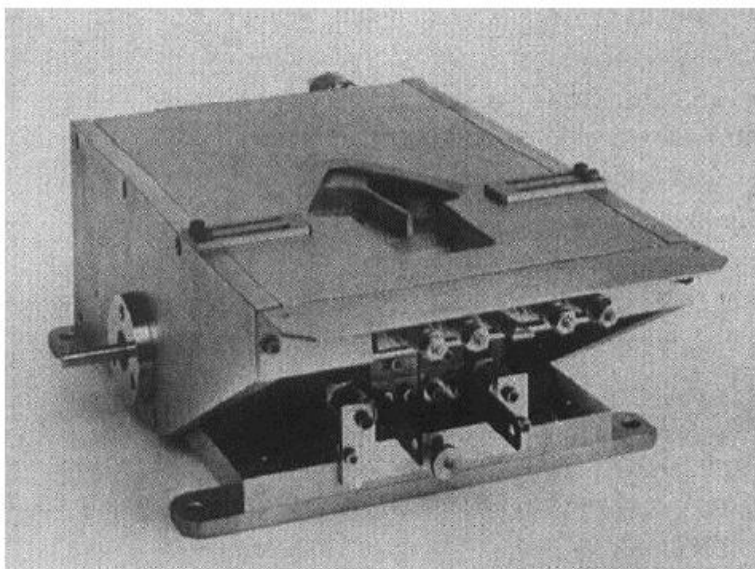
در این روش ماده مورد نظر درون محفظه ای با فشار معین (معمولاً فشار کمتر از ۱ اتمسفر) قرار می گیرد. سپس با اعمال حرارت تبخیر شده و بخار حاصل بر روی زیر لایه کندانس می شود. در این روش، نوع و شکل فیلامان گرم کننده روی سرعت پوشش دهی و خصوصیات لایه تشکیل شده تاثیر می گذارد. در انتخاب فیلامان بایستی دقت نمود که فشار بخار فیلامان نبایستی از فشار بخار تارگت مورد نظر بیشتر باشد تا به هنگام تبخیر تارگت، فیلامان همراه با آن تبخیر نشود.



شکل ۵. شماتیک قرارگیری منبع و زیرلایه در روش تبخیری جهت دستیابی به رسوب یکنواخت

از جمله موادی که با این روش لایه نشانی می شوند آلومینیوم، کروم، مس، طلا، نیکل، کادمیم، پالادیم، تیتانیوم، مولیبدن، تنگستن و تانتالیم می باشد. معمولاً فیلامان ها از یک ماده دیر گداز نظیر تنگستن، مولیبدن یا گرافیت انتخاب می شوند. اما چنانچه هدف، ساخت لایه های نازک دیرگداز مثل تنگستن و تانتالیم باشد، بایستی از روش قوس الکتریکی برای تبخیر تارگت استفاده نمود.

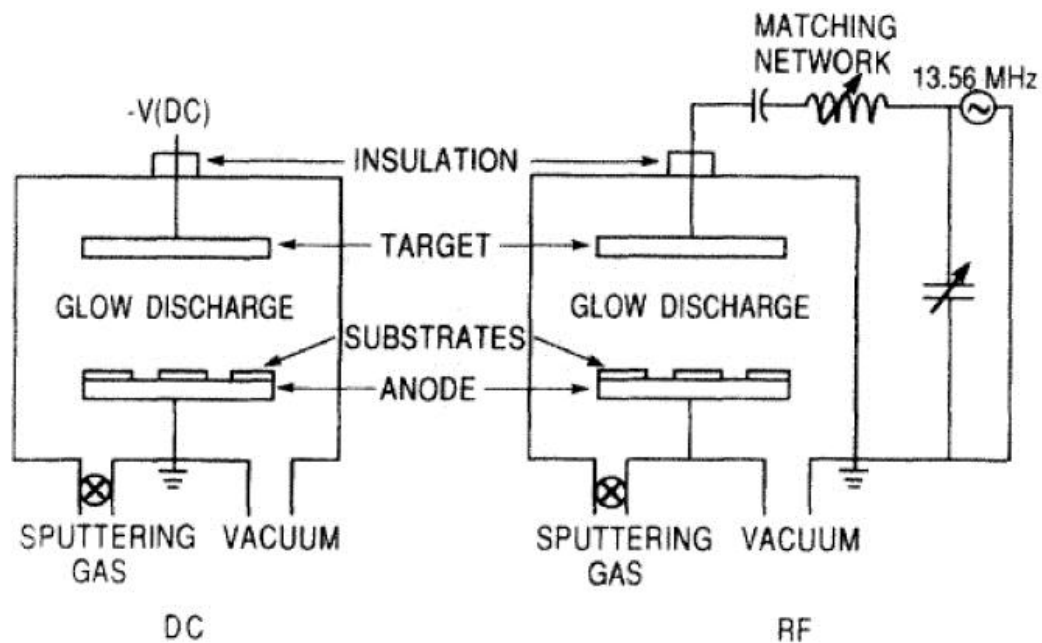
در تکنولوژی های بالاتر، از روش پرتو الکترونی با انرژی بالا (Electron Beam Evaporation) جهت تبخیر ماده استفاده می شود. در این روش با کنترل ولتاژ شتاب دهنده الکترون، انرژی پرتو الکترونی تنظیم شده و حرارت به صورت متمرکز بر روی تارگت اعمال می گردد



شکل ۶ واحد تبخیر پرتو الکترونی

Sputter deposition

در روش پراکنش، برخورد یون های سنگین و بی اثر مثل آرگون، که در یک میدان الکتریکی شتاب پیدا کرده اند، باعث کندن اتمهای تارگت از سطح و تبخیر آن درون محفظه خلا می شود. سپس این اتم های پراکنده شده بر روی سطح زیرلایه، کندانس می شوند. در این روش فشار محفظه، ولتاژ و جریان عبوری، نوع و شکل هندسی تارگت، شکل هندسی و شرایط سطحی زیرلایه و فاصله میان تارگت و زیر لایه از جمله عوامل مهم و تاثیرگذار لایه نشانی می باشد.



شکل ۷ شماتیک ساده سیستم پراکنش

برای تولید لایه های نازک آلیاژی روش پراکنش مناسبتر از روش تبخیر می باشد. زیرا در روش تبخیری به علت اختلاف فشار بخار جزئی عناصر، دستیابی به لایه نازک با درصد آلیاژی مشخص بسیار مشکل می باشد. همچنین

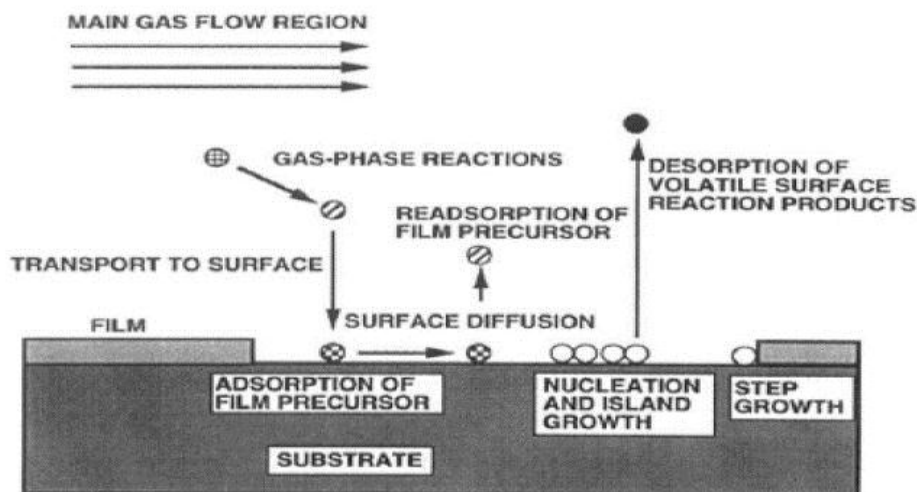
برای تولید لایه های ترکیبات اکسیدی، نیتریدی و یا سولفیدی می توان به همراه گاز آرگون، مقادیری اکسیژن، نیتروژن و یا گوگرد وارد محفظه نمود.

- روش های شیمیایی: (Chemical Method)

- رسوبدهی شیمیایی بخار (CVD: Chemical Vapor Deposition)

در این روش، ماده اولیه (Precursor) درون رآکتور قرار می گیرد. سپس، جریان گاز حاوی ماده اولیه، که تجزیه شیمیایی شده است، روی زیر لایه کندانس شده و لایه نازک را تولید می کند و در آخر گازها و مواد زائد از درون محفظه خارج می شوند. این روش برای انواع مواد شامل عناصر، آلیاژها، نیتrideها، اکسیدها، نانوکامپوزیت ها، نیمه رساناها و ترکیبات بین فلزی مناسب می باشد.

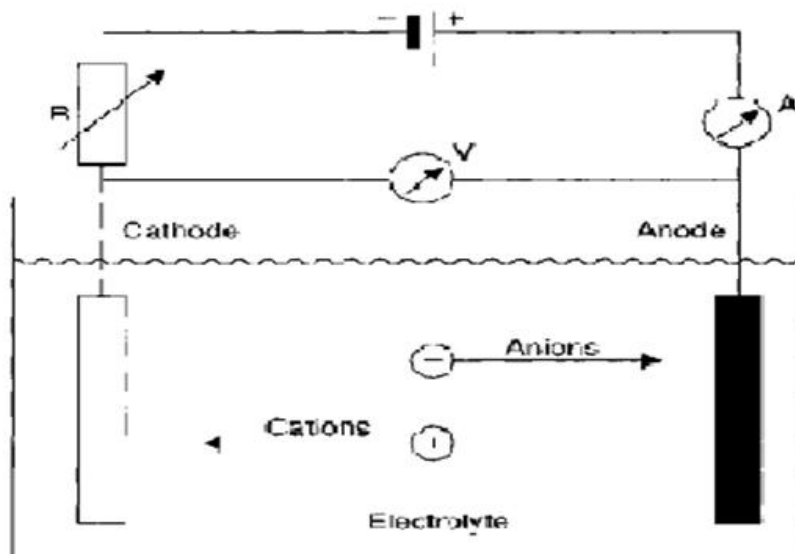
پوشش تولیدی در این روش دانسیته و خلوص بالایی داشته و جهت کاربردهایی نظیر قطعات الکترونیکی، لایه های نازک نیمه رسانا، لایه های نازک برای ابزار برشی و صنایع هوافضا استفاده می شود.



شکل ۸- مراحل انتقال گاز و فرایندهای واکنش در تشکیل لایه به روش CVD

آبکاری الکتریکی (Electroplating)

آبکاری الکتریکی روش الکتروشیمیایی است که از آن برای ساخت لایه های نازک فلزی بر روی زیرلایه رسانای الکتریکی استفاده می شود. از محاسن این روش، قابلیت لایه نشانی فلزات، آلیاژها، مواد کامپوزیتی و انجام فرایند لایه نشانی در دمای اتاق می باشد. تجهیزات این روش شامل منبع انرژی، کاتد (فلز زیرلایه)، آند (مصرفی یا غیر مصرفی) و حمام الکتrolیت، حاوی یون های لایه نازک مورد نظر، می باشد. در اثر اختلاف پتانسیل بین کاتد و آند، یون های مثبت فلز که در محلول الکتrolیت می باشند، به سمت کاتد رفته و با گرفتن یک یا چند الکترون به آند فلزی تبدیل می شوند و به صورت یک لایه روی کاتد (زیرلایه) می نشینند. از طرف دیگر یون های منفی به آند رفته و با از دست دادن الکترون های خود به آند به یک نمک محلول تبدیل می شود و به محلول باز می گردد. الکترون های جامانده در آند از طریق منبع تغذیه به کاتد می روند و به این ترتیب، جریان الکتریکی در مدار برقرار می شود. نتیجه به دام افتادن این الکترون ها، لایه نشانی یک فلز روی زیرلایه است.

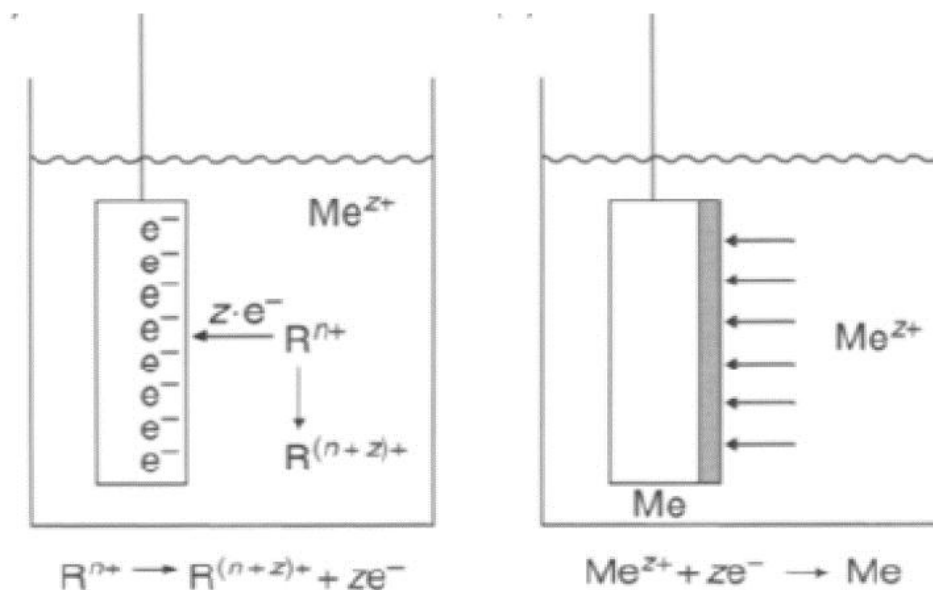


شکل ۹ آبکاری الکتریکی با جریان مستقیم

فاکتورهای مهم در این روش، pH و ترکیب شیمیایی حمام، چگالی جریان، دما و سرعت همزدن حمام می باشد. اگر پارامترهای آبکاری بدون تغییر باقی بمانند، سرعت لایه نشانی با افزایش چگالی جریان اعمالی، افزایش خواهد یافت. در نتیجه واکنش های جانبی نیز می توانند اتفاق بیفتند که این واکنش ها کارایی آبکاری الکتریکی را کاهش می دهند.

آبکاری الکترولس (Electroless Plating)

اساس این روش، مانند روش آبکاری الکتریکی است با این تفاوت که در روش الکترولس، احیای یون فلزی روی زیرلایه توسط یک احیاکننده و به صورت شیمیایی انجام می شود. در این روش آند و کاتد نداریم و الکترولیت، حاوی یک احیا کننده قوی، و یونی است که بایستی احیا شود. این روش محدود به مس و نیکل است ولی بسیاری از محدودیت های روش آبکاری الکتریکی را ندارد .



شکل ۱۰- لایه نشانی به روش الکترولیز

فناوری الکترولیز مزیت هایی نسبت به لایه نشانی الکتریکی دارد که به شرح زیر می باشد:

- به هیچ اتصال الکتریکی احتیاج ندارد.
- امکان لایه نشانی بر روی سطوح نارسانا، به خوبی سطوح رسانا وجود دارد.
- در این فناوری به دلیل اینکه خطوط میدان وجود ندارد، رسوب ایجاد شده یکنواخت تر است.
- برای پوشش های سه بعدی مناسب است.

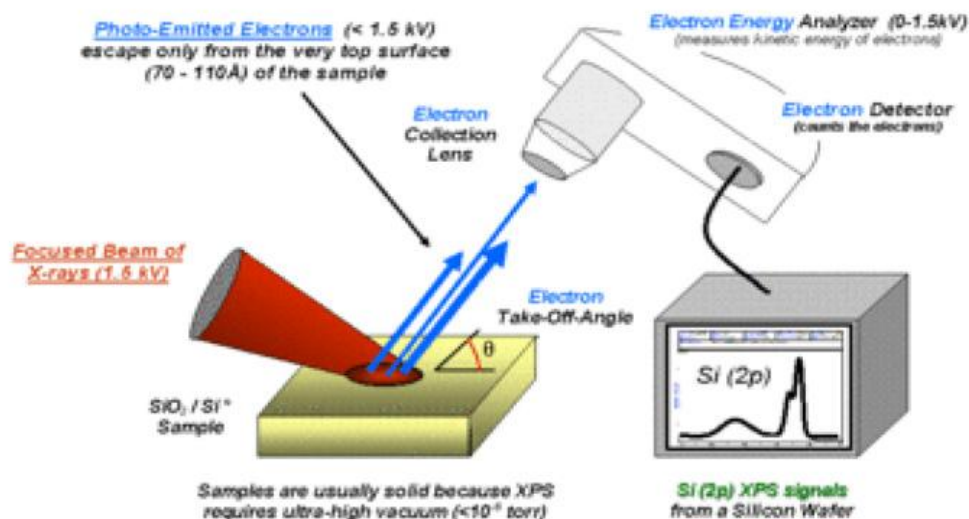
برای استفاده از آبکاری الکترولس روی سطوح سرامیکی، دو انتخاب زبر کردن سطح یا اصلاح شیمیایی آن در دسترس می باشد.

آنالیز لایه های نازک

روش های آنالیز لایه های نازک همان روش های آنالیز سطح می باشد. شناسایی لایه های نازک بایستی هم از لحاظ نوع ماده، هم خصوصیات فیزیکی و هم از حیث ساختار و مورفولوژی صورت گیرد. از آنجا که مهمترین خصوصیت در لایه های نازک ضخامت آن می باشد، لذا عمده ترین روش های آنالیز در لایه های نازک شامل (XPS = X-ray Photoelectron Spectroscopy، AES = Auger electron Spectroscopy و) (SIMS = Secondary Ion Mass Spectroscopy می باشد

طیف شناسی فوتوالکترون اشعه ایکس (XPS)

این روش جزء روش های طیف شناسی الکترون است که در آن پرتو ایکس با انرژی بالا به نمونه برخورد کرده و از لایه های به فاصله چند اتم از سطح نمونه، الکترون خارج می گردد. به همین دلیل است که این روش برای آنالیز لایه های سطحی روش مناسبی می باشد. از آنجا که انرژی اتصال الکترون در لایه های اتمی (Binding Energy) برای هر عنصر، میزان مشخصی می باشد، لذا شناسایی عناصر از این طریق صورت می گیرد. در این روش علاوه بر آنالیز کمی و کیفی عناصر، شناسایی ترکیب شیمیایی مواد نیز صورت می گیرد.



شکل ۱۱- نمونه کار اسپکتروسکوپ فوتوالکترون اشعه ایکس

طیف شناسی الکترون اوژه (AES)

طیف شناسی اوژه یکی از روش های معمول مطالعه آنالیز سطوح است که برای بررسی شیمیایی و ترکیبی سطح از آن استفاده می شود. اساس این روش، بر پایه الکترون هایی است که از یک اتم برانگیخته خارج می شوند. در این روش پرتو الکترونی به سطحی ترین لایه اتمی نمونه برخورد می کند و با برخورد الاستیک خود باعث کندن الکترون های اوژه از سطح ماده می شود.



شکل ۱۲ اسپکتروسکوپ الکترون اوژه

طیف شناسی جرمی یون ثانویه (SIMS)

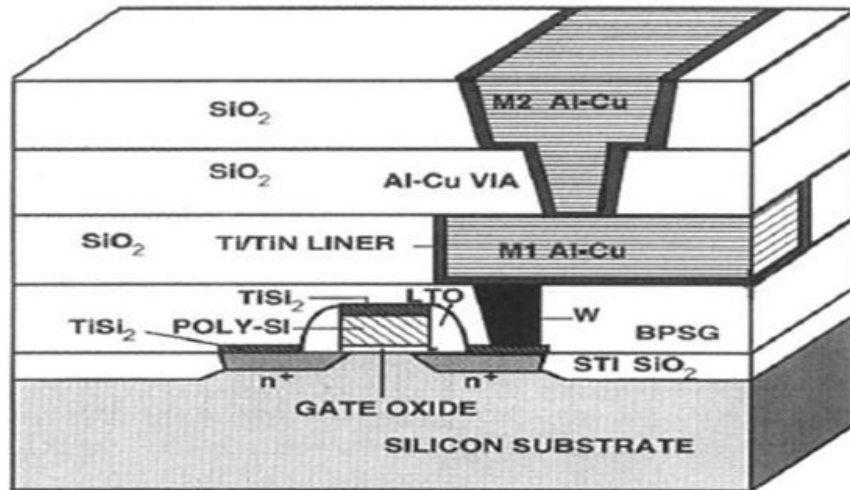
روش SIMS یکی از روش های آنالیز ترکیبات سطوح ولایه های نازک می باشد که در این روش، با استفاده از برخورد پرتو یونی (Ion Beam) و کنده شدن یون های ثانویه، نسبت جرم به بار یون ثانویه اندازه گیری می شود و از این طریق، می توان نوع عنصر و ترکیب ملکولی سطوح تا عمق ۱-۲ نانومتر را تعیین نمود. روش SIMS یکی از دقیق ترین روش های تشخیص عنصری سطوح مواد است.

کاربرد لایه های نازک

استفاده از لایه های نازک در ساخت وسایل پیچیده و مدرن امروزی بسیار متداول شده است، به طوری هر روز شاید بتوان با کاربردهای جدیدی از لایه های نازک آشنا شد. از مهمترین کاربردهای لایه های نازک، وسایل الکتریکی نیمه رسانا، ابزارهای حافظه و پوشش های نوری می باشد.

Transistor

ترانزیستور لایه نازک (TFT)، یکی از انواع خاص ترانزیستورهای اثرمیدان است که از پوشش یک لایه نازک فعال نیمه هادی به علاوه لایه دی الکتریک و فلزی که همگی بر روی یک زیرلایه قرار گرفته اند، بدست می آید. از کاربرد های آن می توان به ساخت ابزار نمایشی کریستال مایع اشاره نمود. یکی از انواع این ساختارها، شامل یک لایه اکسیدی بین دو لایه فلزی و نیمه هادی (MOS: Metal-Oxide-Semiconductor Transistor) می باشد و در ماکروالکترونیک کاربرد وسیعی دارد.



شکل ۱۲ مقطع عرضی ساختار ترانزیستور MOS از منبع

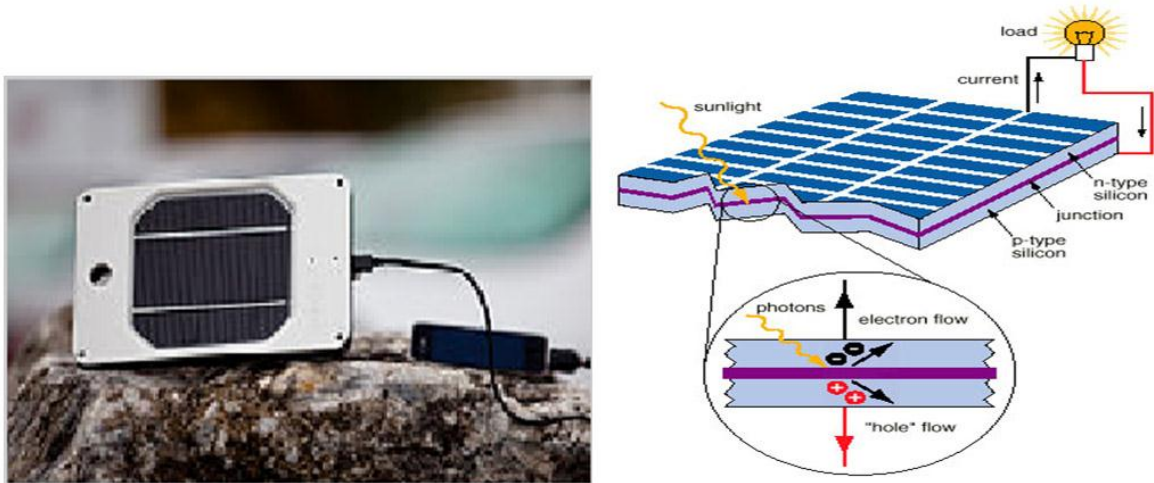
به عنوان مثال، ترانزیستور لایه نازک سیلیکون آمورف هیدروژنه شده به علت دمای پایین و وسعت امکانات پوشش دهی آن، کاربردهای وسیعی را در سوئیچینگ (Switching) ابزارهای نمایشی کریستال مایع دارد. عملکرد ترانزیستورها وابسته به کیفیت فصل مشترک بین لایه نازک و لایه دی الکتریک است

GMR

از دیگر کاربردهای مهم لایه های نازک در (GMR=Giant Magneto Resistance) می باشد که ساده ترین نوع آن، متشکل از یک لایه فرومغناطیس نانومتری (مثل نیکل) می باشد که روی ساختار فلزی غیر مغناطیسی (مثل مس) قرار گرفته است که با قرار گرفتن در میدان مغناطیسی، رسانایی بسیار بالایی در ماده پدید می آورد. به علت امکان افزایش شدید دانسیته ضبط مغناطیسی در ابزارهای حافظه توسط ساختارهای GMR، در سالهای اخیر ساخت هدهای مغناطیسی (Reading Heads) بر همین اساس متداول شده است.

Solar Cell

سلول های خورشیدی، سلول هایی هستند که نور خورشید را غیرمستقیم به الکتریسیته تبدیل می کند.



شکل ۱۳ نحوه کار سلول خورشیدی (سمت راست) - نمونه سلول خورشیدی (سمت چپ)

جهت استفاده از انرژی خورشیدی، از صفحه های جمع کننده آلومینیوم-مس یا استیل گالوانیزه استفاده می شود. اما برای کمتر کردن افت گرمایی به صورت هدایت و همرفت، آنها را توسط لایه های نازک، ایزوله و ضدبازتاب می کنند. برای مثال از لایه های CuLaSe_2 یا از سیستم های لایه نشانی NiAl_2O_3 استفاده می شود. همچنین در سلول های فوتوولتایی که در تبدیل مستقیم لیزری انرژی خورشیدی به الکتریسیته استفاده می شود، معمولاً از Si که روی آن لایه نازکی از P با استفاده از خاصیت پخشی قرار گرفته است، ساخته شده و به این ترتیب با جذب نور در پیوندگاه، جریان الکتریکی تولید می شود.

بحث و نتیجه گیری

روش فیزیکی ساخت لایه های نازک شامل دو روش تبخیر و پراکنش می باشد که در روش اول با مبنای حرارتی و در روش دوم با مبنای مکانیکی باعث تبخیر ماده می شود. در گروه روش های شیمیایی، روش CVD به علت دانسیته و خلوص بالای لایه های نازک تولیدی، در صنایع الکترونیک و هوافضا کاربرد وسیعی دارد و روش آبکاری الکتریکی به علت در دسترس بودن و هزینه پایین، قابلیت کاربردی بالا و لایه نشانی در دمای پایین بسیار مورد استفاده قرار می گیرد.

از جمله روش های آنالیز لایه های نازک، روش XPS می باشد که علاوه بر آنالیز کمی و کیفی عناصر، قابلیت تشخیص ترکیب شیمیایی لایه را نیز دارد و روش SIMS یکی دقیق ترین روش های تشخیص عناصر در لایه نازک می باشد.

از مهمترین کاربردهای لایه نازک می توان به ساخت ترانزیستورهای نیمه هادی MOS اشاره کرد که در ساخت ابزار نمایشی کریستال مایع استفاده می شوند. همچنین لایه های نازک GMR که در ساخت هدهای مغناطیسی کامپیوتر استفاده می شوند، و سلول های خورشیدی برای ایزوله و ضد بازتاب گردن آنها، جهت کاهش افت گرمایی از جمله کاربردهای مهم لایه های نازک می باشند.