

## خواص لایه‌های نازک

لایه‌های نازک خواص بسیار جالبی دارند که متفاوت از خواص توده‌ای مواد تشکیل دهنده آنها می‌باشد. در این مبحث به بررسی رفتار لایه‌های نازک از دیدگاه خواص مختلف آنها پرداخته شده است که این خواص شامل خواص الکتریکی، خواص مغناطیسی، خواص نوری، خواص مکانیکی، خواص شیمیایی و خواص حرارتی لایه‌های نازک می‌باشد.

### ۱- خواص لایه نازک

خواص لایه‌های نازک نظیر خواص مکانیکی، نوری، الکتریکی و ... به پارامترهای زیادی وابسته است که این پارامترها مربوط به روش تولید و کیفیت و نوع ماده‌ی زیر لایه خواهند بود. در مورد روش‌های لایه‌نشانی از پارامترهای مربوط به روش تولید می‌توان به میزان خلا، جریان گاز عبوری حین فرایند رشد لایه، سرعت لایه‌نشانی و خلوص مواد پوشش اشاره کرد [۱]. در این مقاله در مورد خواص برجسته لایه‌های نازک بحث خواهد شد.

### ۱-۱- خواص مکانیکی

یکی از خواص مهم لایه‌های نازک خواص مکانیکی می‌باشد. روش‌های مختلف تولید و ساخت لایه‌های نازک، باعث ایجاد عیوب از جمله نابجایی‌ها در لایه‌ها می‌شود و چون در لایه‌های نازک این عیوب قابلیت حرکت ندارند در جای خود قفل می‌شوند. غلظت بالای نابجایی‌ها و عدم تحرک آنها در لایه نازک سبب افزایش خواص مکانیکی نظیر سختی و مقاومت به سایش آنها می‌شود که قابل مقایسه با بالک ماده نیست. از طرفی، افزایش شدید غلظت نابجایی‌ها موجب ایجاد تنش در ساختار لایه نازک می‌شود و از آنجا که معمولاً بیشتر روش‌های لایه‌نشانی در دمای بالاتر از دمای محیط استفاده می‌شوند (نظیر روش‌های PVD و CVD)، مقداری تنش حرارتی نیز در لایه نازک ایجاد می‌شود که مقدار آن تابع اختلاف دمای لایه‌نشانی و دمای کاربردی لایه نازک می‌باشد [۶-۲].

رفتار مکانیکی لایه‌های نازک مانند استحکام و چسبندگی آن‌ها سهم بسزایی در کارایی لایه‌های نازک دارد. عوامل موثر بر خواص مکانیکی شامل اندازه و شکل دانه‌های تشکیل شده درون لایه‌ها؛ حضور تهی‌جاها، نابجایی‌ها، خلل و فرج؛ و ... می‌باشد. تنش در لایه‌های نازک به دو نوع تنش‌های گرمایی و تنش‌های ذاتی تقسیم می‌شود. تنش نوع اول، به این دلیل ایجاد می‌شود که اکثر فرایندهای لایه‌نشانی در دمای بالا انجام می‌شود و چون مواد مختلف، ضرایب انبساط گرمایی متفاوتی دارند، در هنگام لایه‌نشانی بین لایه و زیرلایه این تنش ایجاد می‌شود. 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 می‌شود. از دیگر خواص مکانیکی لایه‌های نازک، استقامت کششی لایه‌های نازک می‌باشد. تنش کششی لازم برای اینکه لایه‌ای ترک بردارد کمیت مهمی است که هر چه میزان آن بزرگتر باشد، لایه سخت‌تر کشیده می‌شود. به طور کلی استقامت کششی لایه، تابع ضخامت لایه است. همچنین تشکیل لایه اکسیدی بر روی لایه می‌تواند باعث افزایش استقامت کششی لایه گردد [۷].

## ۱-۲- 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، و سایل میکروالکترونیک، الکترونیک و... با استفاده از لایه های نازک می باشد [۷].

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  $\mu$  موبیلیته الکترون هاست؛

$$V = \mu e$$

$$j = \sigma e$$

بنابراین رسانایی مواد ( $\sigma$ ) 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 دائماً 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 کاملاً 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.

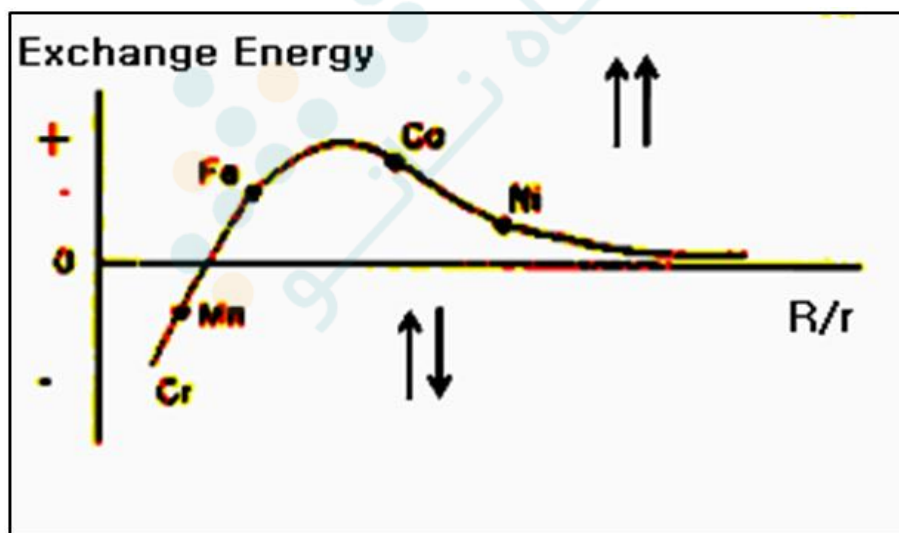
رسانایی لایه نازک منسجم ( $\sigma$ ) از رابطه زیر به دست می آید:

$$\sigma = ne^2 l / mV$$

در جایکه  $l$  طول پویس آزاد الکترون،  $n$  تعداد حامل های بار،  $e$  بار الکترون،  $m$  جرم الکترون و  $V$  سرعت میانگین الکترون ها در ناحیه فرمی است [۶-۲].

### ۱-۳- خواص مغناطیسی

اساس خاصیت مغناطیسی مواد به چرخش الکترون به دور خود یا اسپین الکترون (Spin) مربوط است. مطابق شکل ۱، اگر نسبت  $R/r$  شعاع اتم به شعاع اوربیتال تک الکترونی به گونه ای باشد که میزان انرژی تبادلی (Exchange Energy) در ناحیه مثبت قرار گیرد، ماده می تواند خاصیت مغناطیسی از خود نشان بدهد [۸].



شکل ۱- نمودار تعیین فرومغناطیس و آنتی فرو مغناطیسی مواد [۸]

انرژی تبادلی 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 محدودی به شکل هندسی لایه بستگی دارد [۲-۷].

#### ۴-۱- خواص نوری

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

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

به طوری که  $R_{\lambda}$  درصد بازتاب،  $A_{\lambda}$  درصد جذب،  $T_{\lambda}$  درصد عبور و  $S_{\lambda}$  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 کاملا 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. معمولا 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 [۲-۶].

## ۱-۵- 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 .

## ۱-۶- 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 [۴-۲].

## بحث و نتیجه گیری

در 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.

---

منابع و مراجع

---

[1] K. N. Chopra & A. K. Maini, "Thin Film and Their Applications in Military and Civil Sectors" Defence Research and Development Organisation, 2010.

[2] M. Ohring, "The Materials Science of thin Films", Academic press. 1992.

[3] K. N. Chopra & I. Kuar, "Thin Film Device Applications", Technology and Engineering, 1983.

R. W. Berry, P. M. Hall & M.T. Harris "Thin film Technology", Van Nostrand Company, 1968.

[5] S.M. Sze "Semiconductor Devices-Physics and technology", John Wiley, 1985

[6] A. Wagendristel & Y. Wang, "An Introduction of Physics and Technology of Thin Films", 1994.

[۷] ع. رازقی زاده، "فیزیک لایه های نازک"، دانشگاه پیام نور: تهران، ۱۳۸۸.

[8] <http://www.nitt.edu/home/academics/departments/physics/faculty/lecturers/justin/students/magnetic/exchange/>

