بسم الله الرحمن الرحیم

واژه های کلیدی: نانوذره، ترانزیستور اثر میدانی، اکسید روی ، تحرکپذیری، الکترون ،دی اکسید روی ،لایه نازک

امروزه شرکت های متعددی در زمینه ساخت حسگر های گاز فعالیت دارند. در میان حسگرهای گازی موجود، «حسگرهای مقاومتی گاز» (RGS) برای چندین دهه به خاطر آشکارسازی گازهای قابل اشتعال و سمی، اهمیت فراوان یافته اند. حسگرهای مقاومتی، تراکم ذرات را بوسیله ی تغییر مقاومت (هدایت) الکتریکی ثبت می کنند. علت شهرت این حسگرها بنام مقاومتی نیز به همین خاطر می باشد. این حسگرها عمدتاً از نیمه هادی های اکسید فلزی(همچون SnO_2 ,zno , ZnO_2 , Fe_2O_3) ساخته می شوند.

علاوه بر بهبود حسگرهای اکسید روی ، اثر احساس گاز در دیگر نیمه هادیهای اکسید فلزی پیشنهاد گردید. به دلایل فنی ، حسگرهای فلزی مبتنی بر zno در کاربردهای عملی، از اهمیت ویژه ای برخوردارند. هدایت الکتریکی در حسگرهای اکسید روی همانند همه ی نیمه هادی های نوع n، در حضور گازهای احیا کننده، همچونH_2 ، CO، هیدرو کربن ها و بنبان های الکلی افزایش می یابد. گرچه حسگر های zno ارزان اندو حساسیت بسیار بالایی نیز به طیف وسیعی از گازهای احیا کننده از خود نشان می دهند، با این حال از معایبی همچون عدم داشتن حساسیت انتخابی و جابجایی پاسخ نیز رنج می برند.

فهرست

فصل اول ۹

بررسی منابع ۹

۱-مقدمهای بر لایه نازک ۱۰

۱-۱-لایه ۱۰

۱-۱- ۲- لایه نازک ۱۰

۱-۱- ۳- پوشش های چند لایه نازک ۱۱

۱-۲-نانوحسگرها و کنترل آلودگی هوا ۱۴

۱-۳- فیزیک لایه نازک ۱۵

۱-۳-۱- کیفیت لایه های نازک ۱۷

۱-۳-۲- خواص حاصل از ضخامت کم لایه ها ۱۷

۱-٤- خواص مکانیکی ۱۷

۱-۵- خواص الکتریکی ۱۸

۱-۷- خواص نوری ۲۲

۱-۸-خواص شیمیایی ۲۳

۱-۹- خواص حرارتی ۲۳

۱-۱۰- روش های ساخت و لایه نشانی ۲۳

۱-۱۱ روش های فیزیکی:(PHYSICAL METHOD) ۲۴

۱-۱۱-۱ تبخیر ۲۴

۱-۱۱-۲ SPUTTER DEPOSITION ۲۶

۱-۱۲ روش های شیمیایی:(CHEMICAL METHOD) ۲۷

۱-۱۲-۱- رسوب دهی شیمیایی بخار(CVD:CHEMICAL VAPOR DEPOSITION) ۲۷

۱-۱۲-۲- آبکاری الکتریکی(ELECTROPLATING) ۲۸

۱-۱۲-۳- آبکاری الکترولس(ELECTROLESS PLATING) ۲۹

۱-۱۲-٤ اپی تکسی باریکه مولکولی (MULECULAR BEAM EPITAXY)(MBE) ۳۱

۱-۱۲-۵ لایه گذاری به وسیله پالس لیزریPULSED LASER DEPOSITION: PLD ۳۲

۱-۱۲-٦ لایه نشانی حمام شیمیاییCHEMICAL BATH DEPOSITION: CBD ۳۴

۱-۱۳-فرایند جذب ۳۵

۱-۱۳-۱ جاذبها ۳۶
۱-۱۳-۲- قدرت جذب یک ماده تابع عوامل زیر است : ۳۷

۱-۱۴- حسگر گازی ۳۷

۱-۱٤-۱پارامترهای مورد توجه در انتخاب حساسه..... ۳۸
۱-۱٤-۲ انواع حساسه ها ۴۰

فصل دوم..... ۴۱

۲-۱- خصوصیات حسگرها ۴۱

۲-۲- روش انجام آزمایش خواص حسگری ۴۲

۲-۳- بررسی خواص حسگری ۴۳

۲-۴- نانوحسگرهای گازی ۴۶

۲-۵- کارکرد حسگرهای گازی ۴۸

۲-۵- ترانزیستور اثر میداني یا *FET*..... ۴۸

۲-۵-۱ ساختار و عملکرد ترانزیستور *FET* ۴۹
۲-۳-۲ ترانزیستور *FET* ۵۱
۲-۳-۴- تاثیر غلظت گاز بر حساسیت ۶۶

۲-۴- سرعت پاسخگویی..... ۶۸

۲-۵- تغییرات حساسیت با دما..... ۶۹

۲-۶- اثر فشار جزئی اکسیژن ۷۲

۲-۷- مکانیزم مربوط به حسگر..... ۷۴

۲-۸- نیاز به افزودنیها ۸۴

الف-تاثیر افزودنی بر حساسیت ۸۵
ب- اثر افزودنی بر رفتار دمایی حسگر..... ۸۶
ج-اثر افزودنی بر رفتار غلظت گازی حسگر ۸۷
د.تاثیر افزودنی بر سرعت پاسخگویی..... ۸۹
ه.اثر افزودنی بر ابعاد دانه ها..... ۹۰

۲-۹- فرآیند های اصلی در حسگرهای آلاییده شده ۹۱

۲-۱۰-۱ الف افزودنی به عنوان کاتالیزور..... ۹۲

۲-۱۰- حسگرهای اکسید فلزی دیگر..... ۹۳
۲-۱۰-۱ اکسید نیکل ۹۴
۲-۱۱- تغییرات اهمی سنسور گاز: ۹۸
۲-۱۲- جدول مشخصات نانو ذره اکسید روی:..... ۱۰۰
۲-۱۳- بررسی انرژی بین باندی کانال..... ۱۰۱
۲-۱٤-تعریف کانال هدایت و وابستگی اهمی کانال ۱۰۱
فصل سوم.....
۳-۱- عملکرد نفوذ گاز..... ۱۰۷
۳-۲ حساسیت:..... ۱۰۹
۳-۳- ترانزیستور MOSFET:..... ۱۱۰
۳-۴-بررسی ترانزیستور ۱۱۱
۳-۵-ساختارسنسورگاز..... ۱۱۳

مقدمه :

گازها در زندگی بشر وجود داشته اند و معمولا بوی آنها معرف نوع گاز بوده است . برخی گازها فاقد بو هستند. و استنشاق آنها خطرناک است . بنابراین لزوم استفاده از این سنسورهای گاز دراندازه گیری غلظت و تشخیص نوع گاز بسیارضروری است .حسگرهای گازی با پیشرفت علوم جدید از تنوع بسیار زیادی برخوردارند . حسگرهای گاز با ماده پایه اکسید روی به دلیل حساسیت و برگشت پذیری مناسب از مهمترین حسگرهای گازی هستند . در این پژوهش ساخت لایه نازک مد نظر بوده است که بنابر این عمده رفتارهای حسگری این سیستم مربوط به وقایعی است که در سطح صورت میگیرد . تشکیل حالتهای سطح یکی از مهمترین مواردی است که نقش بزرگی در توضیح اتفاقات دارد . جذب، پخش وعدم جذب عوامل گازی وتبادل الکتریکی این عوامل با سطح می تواند تغییرات هدایتی در سطح را شرح دهد .

در این پژوهش هدف ، بررسی ومطالعه نحوه ساخت سنسور چند لایه گاز بااستفاده ازماده پایه ی اکسید روی می باشد. که مواد به کار برده شده در همچین ساختارهایی مورد بررسی قرارگرفته و هدف بهبود کارایی این نوع ساختارها می باشد.

فـصل اول

بررسی منابع

۱- مقدمه‌ای بر لایه نازک

۱-۱-لایه

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 می‌بخشد.

معمولا 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 درآیند و روی سطح زیرلایه نشینند، پوششی ایجاد می شود که آنرا لایه می نامند. چگالش ذرات اتمی، مولکولی یا یونی برای تشکیل لایه بر روی زیرلایه توسط فرایندهای فیزیکی و شیمیایی مختلفی صورت می گیرد.
معمولا 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 شوندکه 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

۱-۱- ۲- لایه نازک

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 متفاوتتری 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 خواصی متفاوت و کاربردی می شوند .

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 خصوصیاتی 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 خصوصیاتی 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.

۱-۱- ۳- پوشش های چند لایه نازک

این پوشش ها از هزاران لایه و هر لایه با ضخامتی در حدود ۱ تا ۵ نانومتر ساخته می شوند. هر لایه ساختار کریستالی خاصی دارد و از عناصر مختلفی نظیر نیکل، تیتانیم، وانادیم و آلومینیم ساخته می شوند. این پوشش ها بسیار متراکم بوده و چگالی بالایی دارند و به عنوان پوشش های چندلایه با دانسیته بالا نیز شناخته می شوند. استفاده از این نوع پوشش ها روی

قطعات صنعتی باعث بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی آن ها و همچنین دوام قطعات شده است. از مهمترین پوشش های چندلایه می توان به پوشش هایAlN/ZrN ، CrN/AlNو TiN/CrN اشاره کرد.

پوشش های چندلایه نازک از لایه های متناوب با فازهای مختلف تشکیل شده اند. این لایه ها سختی و مدول الاستیک بالا و خواص سایشی خوبی دارند. دلیل افزایش سختی پوشش های نازک چندلایه، قرار گرفتن لایه های خیلی نازک با طول خط نابجایی متفاوت روی هم و در نتیجه نزدیک شدن استحکام به حد تئوری آن است. به دلیل متفاوت بودن طول خط نابجایی ها در هر لایه، نابجایی ها نمی توانند از یک لایه به لایه دیگر حرکت کنند چرا که طول خط نابجایی ها متفاوت است. همچنین لایه ها به قدری نازک هستند که منابع نابجایی به طور مستقل وارد عمل نمی شوند. بنابراین سختی این پوشش ها افزایش چشمگیری می یابد.

دسته بندی پوشش های چند لایه:

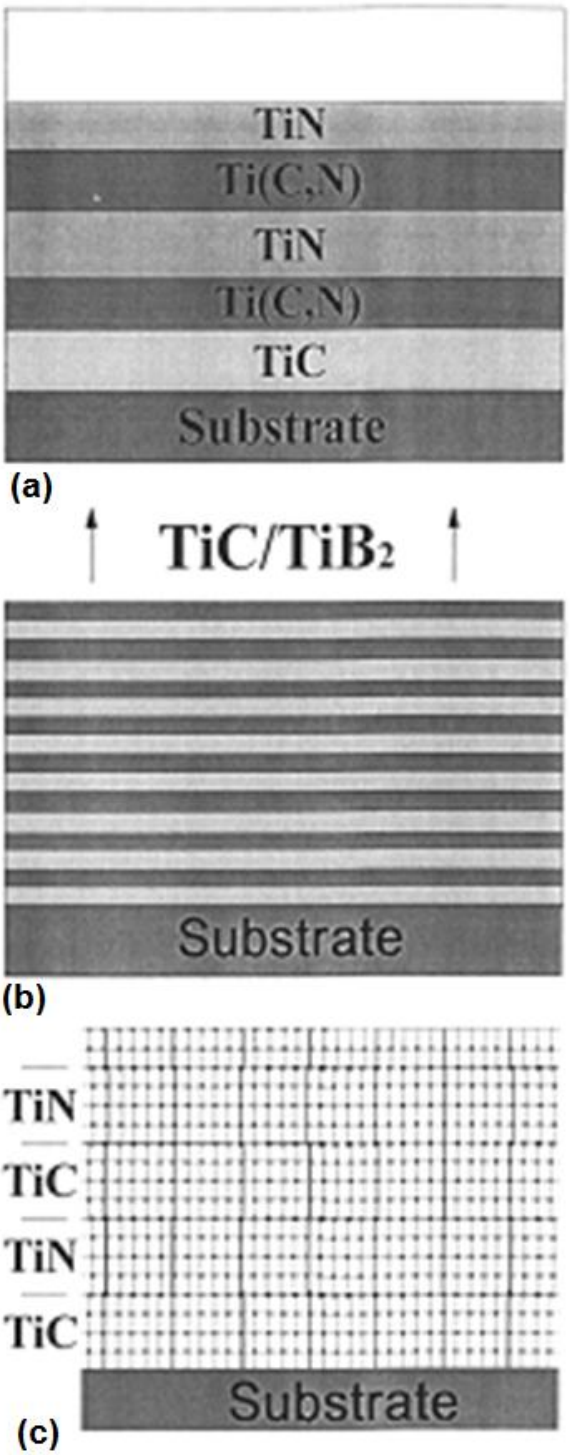
۱ . پوشش ها باتعداد محدودی از لایه ها: بیشتر پوشش ها که امروزه استفاده می شوند به این گروه تعلق دارند.شکل ۱-۱ قسمت (a) نمونه ای از این نوع پوشش را نشان می دهد.

۲ . پوشش ها با تعداد زیادی لایه که از نظر ساختار کریستالی مشابه نیستند : نمونه ای ازاین نوع پوشش در شکل ۱-۱ قسمت (b) نشان داده شده است.

۳ . پوشش ها با تعداد زیادی لایه که از نظر ساختار کریستالی مشابه هستند(superlattice) : برخی از شرایط برای این نوع پوشش ها بدین شرح است :

- ساختار کریستالی مواد به کار رفته مشابه باشد
- دارای پیوند های شیمیایی مشابهی باشند
- اختلاف شعاع اتمی و فواصل شبکه ی آنها قابل چشم پوشی باشد.

نمونه ای از این نوع پوشش در شکل ۱-۱ نشان داده شده است.



شکل۱-۱- دسته بندی پوشش های چند لایه

۱-۲- نانوحسگرها و کنترل آلودگی هوا

اکسید روي با ساختار ورتزایت(HCP) به علت انحراف استکیومتري به خاطر وجود عیوب غیر ذاتي مانند جاي خالي اکسیژن، یک نیمه‌هادي از نوع n بوده که خواص الکترونیکي و نوري بسیار خوبي دارد. گاف انرژي این ماده ۳.۳۷ الکترون ولت و انرژي تهییج آن ۶۰ میلي الکترون ولت در دماي محیط است لایه‌هاي نازک اکسید روي در صورتي که داراي ریزساختار نانومتري باشند، به علت افزایش نسبت سطح به حجم، خواص حسگري بسیا خوبي خواهند داشت.

استفاده از ZnO, SnO_2 به عنوان حسگر گازي براي اولین بار توسط Seiyama و همکارانش در سال ۱۹۶۲ میلادي گزارش شد. ZnO یکي از اولین و پر کاربردترین اکسیدهاي فلزي حسگر (Metal Oxide Sensor MOS) است که مورد استفاده قرار مي گیرد. این ماده در دماهاي متوسط و نسبتاً بالا ۵۰۰-۴۰۰ نسبت به بسیاري از گازها حساسیت خوبي را از خود نشان مي دهد از جمله گازهایي که حساسیت حسگر ZnO نسبت به آن ها بررسي شده است مي توان به هیدروژن ، LPG ، مونوکسید کربن ،متان ، اتانول ، پروپانول ،آمونیاک ، اکسیژن ، تري متیل آمین، بنزن، استون، تولوئن و زیلین اشاره کرد.

عکس العمل اکسیدهاي فلزي نیمه هادي نسبت به گازها، افت مقاومت الکتریکي آن ها (افزایش هدایت الکتریکي) است. اما چگونه حضور گازها منجر به افت مقاومت مي شود؟

مدلي که به طور عمده براي توضیح دادن این پدیده پذیرفته شده است به صورت زیر است :

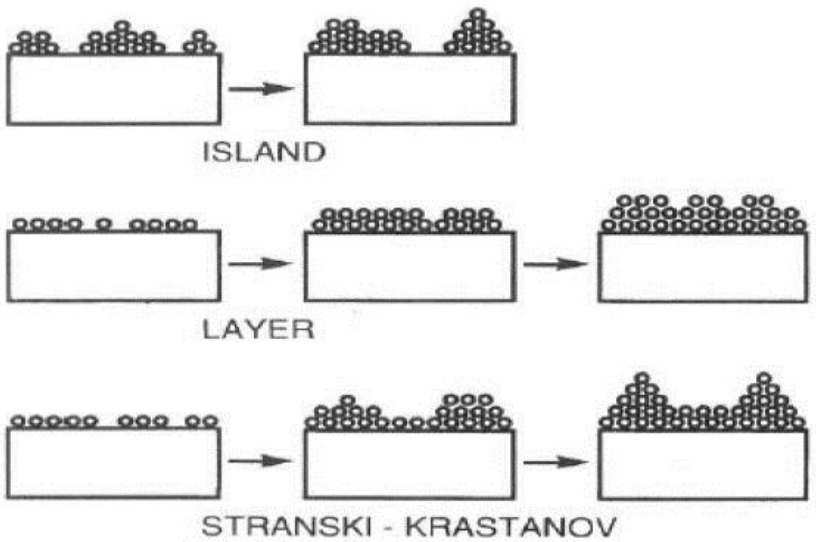
هنگامي که اکسیژن در سطح نیمه هادي جذب مي شود به صورتی شکسته مي شود که باعث خروج الکترون از نیمه هادي مي گردد. این خروج الکترون منجر به افزایش مقاومت نیمه هادي مي گردد (نیمه هادي نوع n را در نظر بگیرید) در حضور یك گاز قابل سوختن نظیر هیدروژن با هیدروژن واکنش مي دهد و در نتیجه الکترون دوباره به درون نیمه هادي بر مي گردد و منجر به کاهش مقاومت نیمه هادي مي گردد..

۱-۳- فیزیک لایه 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 (شکل۱-۲)، جهت و ... به مقدار زیادی مرتبط با مراحل جوانه زنی و رشد تعیین می شود و می تواند متاثر از شرایط لایه نشانی باشد فرآیند 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 منجر شود . طی فرآیند 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 گرد. 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



شکل۱-۲- روند اجرایی سه فرآیند

شکل ۱-۲ شماتیک سه فرآیند را به خوبی نشان می‌دهد. فرآیند رشد لایه به لایه زمانی اتفاق می افتد که نیروی برهم کنش بین اتم های زیرلایه و لایه، قویتر از نیروی برهم کنش بین فقط اتم های لایه باشد. ابتدا یک لایه از اتم ها بر روی زیرلایه ی جامد شکل می گیرد، سپس لایه دوم روی لایه اول تشکیل می گردد. لایه جدید، تنها زمانی شروع به رشد می کند که لایه قبلی کامل شده باشد. این نوع رشد، به رشد فرانک وندرمرو نیز معروف است. اما چنانچه برهم کنش بین اتم های لایه بیشتر از برهم کنش بین اتم های لایه و زیرلایه باشد، لایه ها بصورت جزیره ای رشد خواهند کرد. نام دیگر این نوع رشد، رشد ولمر-وبر می باشد. پیوند اتم ها 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 می باشد، یک یا چند تک لایه تشکیل می شود و سپس جزایر تکمیل می گردد. نام دیگر فرایند رشد، استرانسکی-کرستانف می باشد. 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 می شود، بستگی به سرعت و دمای لایه نشانی آن دارد.

۱-۳-۱- 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.

۱-۳-۲- خواص حاصل از ضخامت کم لایه ها

این خواص 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

۱-٤- 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 معمولا بیشتر روش های لایه نشانی در دمای بالاتر از دمای محیط استفاده می شوند (نظیر روش های PVDوCVD)، 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 ساختار های 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.

۱-۵- خواص الکتریکی

بررسی خواص الکتریکی مواد عمدتا براساس نظریه نواری صورت می گیرد که در آن ترازهای انرژی الکترونی و چگالی حالت ها، فلز یا نیم رسانا ویا عایق بودن ماده را تعیین می