

عنوان مقاله:

پوشش دهی به روش های PVD , CVD

گردآورنده:

فاطمه باقری

زمستان ۹۶

اللَّهُ أَحْمَدُ

فهرست مطالب

۱	تقسیم بندی ترسیب مواد مختلف توسط چهار روش رسوبگذاری مذکور.....	۲
۲	تعریف کلی PVD و CVD.....	۳
۳	معرفی روش رسوب دهی فیزیکی بخار و انواع آن.....	۳
۳-۱	رسوب دهی فیزیکی بخار به روش تبخیر حرارتی.....	۴
۳-۱-۱	یکنواختی پوشش سطوح غیرمسطح.....	۵
۳-۲	رسوب دهی فیزیکی بخار به روش کندوپاش.....	۶
۳-۳	مکانیسم رشد لایه نازک در PVD.....	۸
۳-۴	بررسی جزئی تر روش PVD.....	۱۰
۳-۴-۱	چرا ما باید از گاز آرگون استفاده کنیم؟.....	۱۴
۳-۴-۲	پراکندگی RF.....	۱۵
۳-۴-۳	چه مشکلی در استفاده از PVD معمولی برای رسوب یک عایق مثل سیلیکون دی اکسید وجود دارد؟.....	۱۵
۳-۴-۴	PVD RF چیست؟.....	۱۶
۳-۴-۵	پلاسمای فلزی یونی شده و پلاسمای فلزی موازی.....	۱۸
۳-۵	نتیجه گیری.....	۲۰
۴	معرفی روش های رسوب دهی شیمیایی بخار (CVD).....	۲۰
۴-۱	تاریخچه روش CVD.....	۲۰
۴-۲	اساس روش CVD.....	۲۱
۴-۳	بررسی جزئی تر روش PVD.....	۲۳
۴-۴	مزایای روش CVD.....	۲۶
4-5	معایب روش CVD.....	۲۶
۴-۶	کاربردهای فرایند CVD.....	۲۸
۴-۷	انواع روش های CVD بر اساس پیش ماده.....	۲۸
۴-۷-۱	پیش ماده گازی.....	۲۸
۴-۷-۲	پیش ماده مایع.....	۲۹

۲۹.....	پیش ماده جامد.....	۳-۷-۴
۳۰.....	انواع روش های CVD براساس خصوصیات فیزیکی بخار.....	۸-۴
۳۰.....	روش های مبتنی بر پلاسما.....	۹-۴
۳۳.....	انواع روش های CVD براساس فشار.....	۱۰-۴
۳۵.....	نتیجه گیری.....	۱۱-۴
۳۵.....	مقایسه بین CVD و PVD.....	۵
۳۶.....	CVD و ترسیب الکتروشیمیایی و پوشش اسپین.....	۶
۳۷.....	ECD یا روش الکتروشیمیایی.....	۷
۳۸.....	اسپین در پوشش.....	۸
۳۹.....	بررسی فیلمهای نازکی از نانو کامپوزیتها و پوششهای رسوب داده شده توسط روشهای PVD و CVD.....	9
۴۰.....	سنتز فیلمهای نانوکامپوزیت و پوششها.....	۱-۹
۴۲.....	نتیجه گیری.....	۲-۹

مقدمه

در این مطلب آموزشی تکنیک‌های مختلف رسوب‌گذاری که در ساخت قطعات الکترونی میکرو استفاده می‌شود بررسی می‌شود. اگر یک ماده مثل مس یا تنگستن بر روی قطعه نازک سیلیکونی^۱ رسوب داده شود، راه‌های متفاوتی برای رسیدن به این هدف وجود دارد. روش‌های رسوب‌گذاری در صنایع نیمه هادی به چهار گروه تقسیم بندی می‌شود.

۱. رسوب بخار فیزیکی (PVD)^۲

۲. رسوب بخار شیمیایی (CVD)^۳

۳. رسوب الکتروشیمیایی (ECD)^۴

۴. پوشش اسپین^۵

در میان این چهار فرایند، PVD و پوشش اسپین جز فرایندهای فیزیکی و CVD و ECD جز فرایندهای شیمیایی هستند. در تولید قطعات IC مقدار واقعی مواد رسوب داده شده به تنهایی در هر مرحله بسیار کم است. مواد رسوب داده شده به شکل یک فیلم نازک، تقریباً مانند نقاشی روی یک سطح و در

^۱ wafer

^۲ Physical Vapour Deposition

^۳ Chemical Vapour Deposition

^۴ Electro Chemical Deposition

^۵ Spin Coating

واقعیت بسیار نازک‌تر از پوشش رنگ است.

الزامات فیلم نازک:

هر روش رسوب‌گذاری باید شرایط خاصی را برآورده کند؛

۱. رسوب باید در سراسر قطعه نازک تشکیل شود.
۲. کنترل خوب بسیار ضروری است. اگر ضخامت مواد رسوب داده شده روی ورق نازک 1000 nm باشد، تغییرات در مکان‌های مختلف باید در حدود ۱ تا ۲ درصد باشد. یعنی ضخامت فیلم پس از رسوب‌گذاری حداقل 980 nm و حداکثر 1020 nm باشد.
۳. در قسمت شیارها و حفره‌ها، پوشش دیواره جانبی باید خوب باشد.
۴. مواد باید چسبندگی خوبی داشته باشند و نباید به راحتی جدا شوند.
۵. ذرات گرد و غبار نباید در طول فرایند رسوب‌گذاری، بر روی سطح زیرلایه بنشینند.
۶. ساختار کریستال فیلم تهیه شده باید از کیفیت کافی برخوردار باشد، زیرا خواص فیلم را تحت تاثیر قرار می‌دهد. به عنوان مثال؛ هنگامی که مس رسوب می‌کند، به سائز دانه‌بندی بزرگ احتیاج است. زیرا مقاومت الکتریکی کمتری خواهد داشت.
۷. اگر بخواهیم آلیاژها را رسوب دهیم، ترکیب باید در طی فرایند رسوب‌گذاری یکنواخت باشد.

۱ تقسیم بندی ترسیب مواد مختلف توسط چهار روش رسوب‌گذاری

مذکور

به طور کلی روش PVD، برای رسوب تیتانیوم، تیتانیوم نیترات، تانتالیوم، تانتالیوم نیترات، آلومینیوم و فیلم‌های بسیار نازک از مس، که به لایه دانه‌ای موسوم است، استفاده می‌شود. روش CVD، برای رسوب تنگستن، تیتانیوم، مس دانه‌ای، سیلیکون دی اکسید، سیلیکون نیتريد و ... استفاده می‌شود. روش رسوب‌گذاری الکتروشیمیایی ECDL برای رسوب‌گذاری مس استفاده می‌شود. روش پوشش اسپین برای

رسوب‌گذاری عایق‌ها و مواد دی‌الکتریک، که معمولاً به صورت ترکیبات آلی در طبیعت هستند، استفاده می‌شود.

در گذشته، برخی از فلزات تبخیر می‌شدند و بخارات آن فلز بر روی زیرلایه نشانده می‌شد. سپس دمای زیرلایه را پایین می‌آوردند و در اثر تشکیل بخار سرد، فلز جامد تشکیل می‌شد. (در واقع تصعید به گونه‌ای اتفاق می‌افتاد). این روش‌ها با مصرف زیاد انرژی همراه بود و مشکلات زیادی را به همراه داشت. این روش برای تمام مواد جامعیت نداشت و مخصوصاً برای آلیاژها روش مناسبی نبود. همچنین این مواد بر روی مکان‌های دیگر از جمله دیواره‌های محفظه نیز ترسیب می‌شدند، که در حال حاضر برای ساخت IC استفاده نمی‌شوند. IC: تراشه؛ به مجموعه‌ای از مدارات الکترونی که با استفاده از مواد نیمه رسانا (مثل سیلیکون) در ابعاد کوچک ساخته می‌شوند)

۲ تعریف کلی CVD و PVD

اگر مواد خام به شکل گازی وارد شوند، و ماده نهایی بر روی زیرلایه بعد از یک واکنش قرار داده شود، به این روش CVD یا رسوب بخار شیمیایی گفته می‌شود. اگر ماده در حالت جامد، اما به عنوان ذرات یا اتم‌های بسیار کوچک فرستاده شود و بدون واکنش بر روی زیرلایه قرار داده شود، PVD یا رسوب بخار فیزیکی می‌گویند.

ابتدا جزئیات PVD را بررسی می‌کنیم.

۳ معرفی روش رسوب دهی فیزیکی بخار و انواع آن

رسوب فیزیکی بخار طیف وسیعی از روش‌های پوشش دهی در خلاء را شامل می‌شود که در آن مواد بصورت فیزیکی از یک منبع در محفظه خلاء تبخیر و یا کنده شده و روی سطح یک زیرلایه به صورت لایه نازک می‌نشیند.

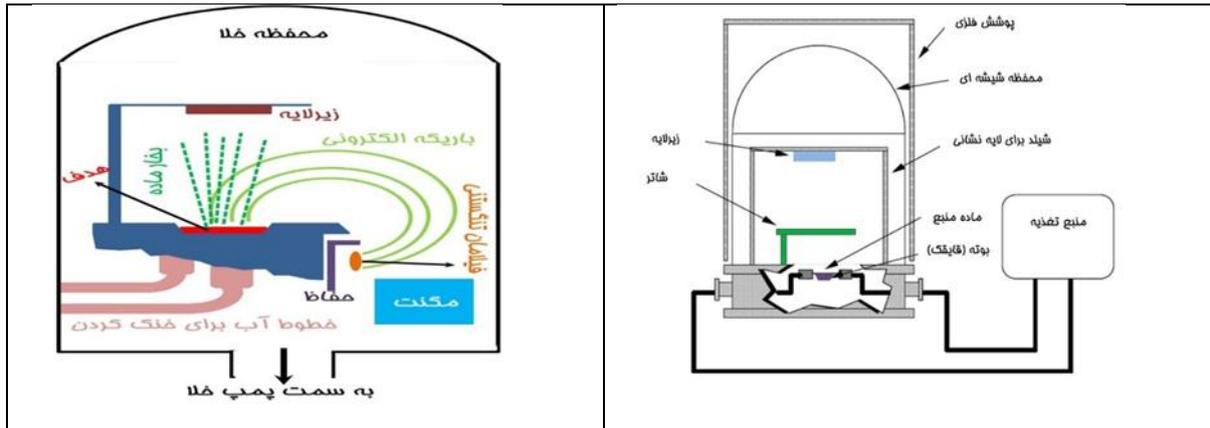
مواد پوشش دهنده می‌توانند ترکیبات دی‌الکتریک، فلز، آلیاژ یا مخلوطی از آن‌ها باشند و بسته به

نوع فرآیند رسوب دهی، خواص متفاوتی مانند نوری، الکتریکی و مکانیکی مختلف داشته باشند. به عنوان مثال اکسید تیتانیوم نمونه ای از ترکیبات اکسید فلزی است که بسته به پارامترهای رسوب دهی می تواند لایه های نازک شفاف، هادی الکتریکی، واکنش پذیر شیمیایی، خنثی شیمیایی و یا نمایش دهنده جذب طیف انتخابی را تشکیل دهد. پارامترهای فرایند تعیین کننده ترکیب، حالت اکسیداسیون، ساختار کریستالی و دانسیته فشردگی لایه نازک است. پوشش دهی می تواند روی انواع زیرلایه ها مانند فلز، شیشه یا پلاستیک انجام شود. از پارامترهای تاثیرگذار می توان به نوع ماده رسوب کننده، ترکیب شیمیایی و ساختار سطح زیرلایه، فرآیند آماده سازی سطح اشاره کرد.

رسوب فیزیکی بخار به روش های مختلف انجام می شود، که به تفصیل هر کدام بررسی می شود.

۳-۱ رسوب دهی فیزیکی بخار به روش تبخیر حرارتی

در این روش فلز یا آلیاژ در محفظه خلاء با فشار تقریباً ۱۰ torr به شیوه های مختلف تبخیر شده و به سمت زیرلایه حرکت می کند و در انتها بر روی آن متراکم می گردد. از ویژگی های مثبت این روش می توان به سرعت پوشش دهی بالای آن اشاره کرد. یکی از محدودیت های این روش، عدم کاربرد آن برای مواد با نقطه ذوب بالا و همچنین سرامیک ها است. همچنین به دلیل استفاده از دمای پایین در مقایسه با سایر روش ها، انرژی جنبشی برای ایجاد چسبندگی مناسب بین زیرلایه و لایه نازک کافی نیست. در این روش ماده پوششی به روش های مختلفی مانند گرم کردن به روش مقاومتی، توسط پرتو الکترونی و یا گرم کردن قوسی و القایی افزایش دما پیدا می کند تا نهایتاً تبخیر گردد (شکل ۱).



شکل ۱: نمایی از دستگاه PVD تبخیری با استفاده از سمت راست: مقاومت الکتریکی؛ سمت چپ: پرتو الکترونی

جدول ۱ برخی معایب و مزایای منابع تبخیر مختلف را ارائه می دهد.

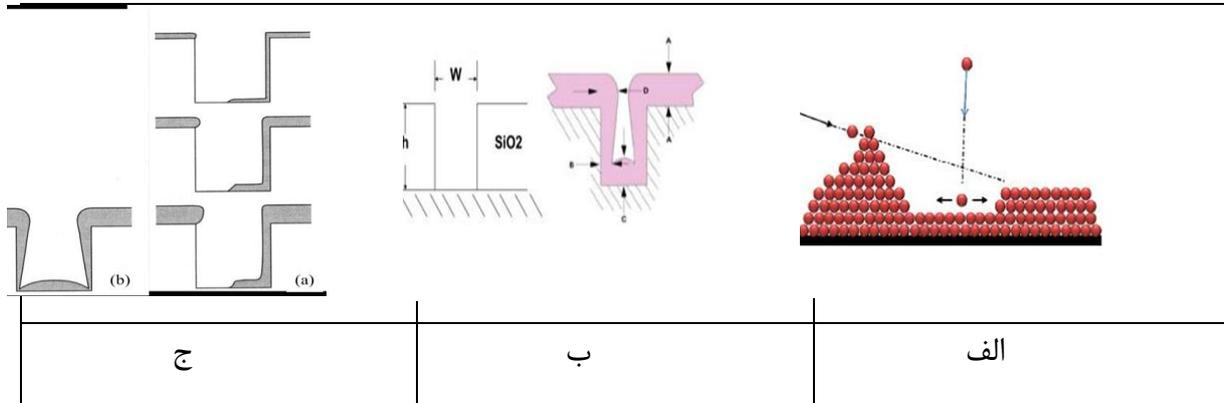
جدول ۱: معایب و مزایای منابع مختلف حرارتی

معایب	مزایا	منبع گرما
آلودگی	بدون تابش	مقاومت
تابش	آلودگی کم	پرتو الکترونی
آلودگی	بدون تابش	RF
گران	بدون تابش و آلودگی کم	لیزر

۳-۱-۱ یکنواختی پوشش سطوح غیر مسطح

پوشش دهی سطوح غیر مسطح^۶ در روشی که از منبع تبخیری استفاده می کند به دلیل جهت حرکت ماده تبخیر شده و پدیده سایه افکنی اتم ها، (همانطور که در شکل ۲ الف نشان داده شده است) ضعیف است. افزودن عامل گرمایش زیرلایه با افزایش نفوذ سطحی ماده و چرخش زیرلایه با به حداقل رساندن پدیده سایه زنی، تا حدودی باعث حل مشکل یکنواختی پوشش می شود. در هر حال در روش تبخیری نمی توان برای نسبت ابعادی بزرگتر از یک (نسبت ارتفاع به پهنا یا قطر)، فیلم پیوسته ای را

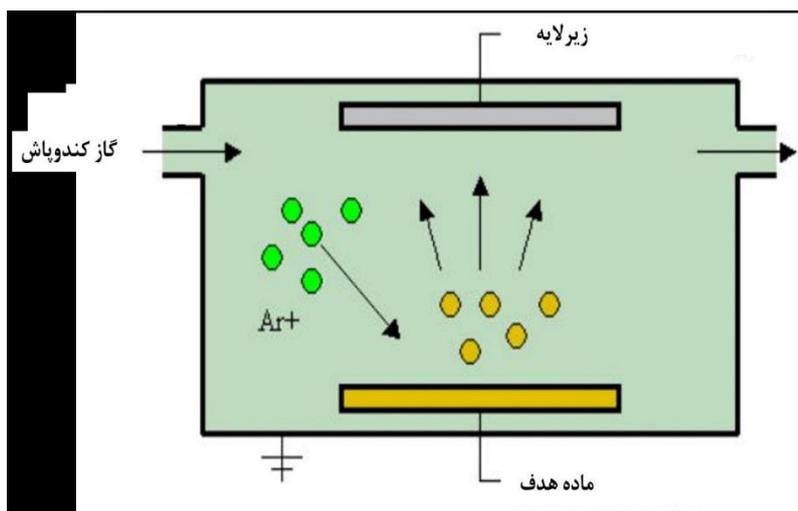
^۶ Step Coverage



شکل ۲: الف- نمایی از پدیده سایه افکنی اتم ها ب- نسبت ابعادی سطوح غیرمسطح و پوشش دهی آن ج- تحول زمانی پوشش دهی تبخیری سطح با نسبت ابعادی ۱ (a) با تحرک کم اتم ها (یعنی دمای کم زیرلایه) و بدون چرخش زیرلایه (b) با چرخش و گرمایش زیرلایه

۲-۳ رسوب دهی فیزیکی بخار به روش کندوپاش

در این روش، اتم های سطح ماده هدف با برخورد یون های موجود در پلاسما کنده شده و به سمت زیرلایه حرکت می کنند. سپس با فرآیند تراکم، هسته زایی و رشد، لایه نازکی را روی سطح تشکیل می دهند (شکل ۵). از مزایای این روش در مقایسه با روش تبخیری می توان به یکنواختی بهتر پوشش، آسیب تابشی کمتر از تبخیر با پرتو الکترونی و سهولت رسوب آلیاژ اشاره کرد. از معایب این روش نیز می توان به آسیب های ناشی از پلاسما مانند کاشت آرگون اشاره نمود. جدول ۲ مقایسه کاملی از این روش ها را نشان می دهد.



شکل ۳: نمایی از روش کندوپاش؛ گاز کندوپاش پس از ورود به محفظه، یونیزه شده و به ماده هدف برخورد می کند و موجب کندن اتم ها از ماده هدف می شود. اتم های کندن شده به سمت زیرلایه رفته و لایه نشانی می شوند.

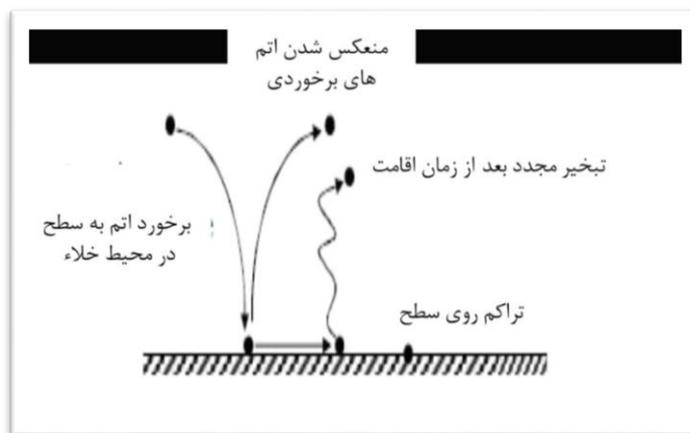
جدول ۲: مقایسه روش تبخیری و کندوپاش از جنبه های مختلف

کندوپاش	تبخیر	
یک لایه اتمی بر ثانیه	هزار لایه اتمی بر ثانیه (به عنوان مثال ۰/۵ میکرومتر بر دقیقه برای آلومینیوم)	نرخ
تقریباً نامحدود	محدود	انتخاب ماده
امکان شرکت ناخالصی (خلای متوسط)	بهبتر (عدم وجود هیچ گازی، خلاء بالا)	خلوص
در حالت استفاده از مگنترون، گرمایش زیرلایه قابل توجه است.	خیلی کم	گرمایش زیرلایه

آسیب سطح با بمباران یونی	خیلی کم، امکان آسیب سطح با استفاده از پرتو الکترونی و اشعه ایکس	آسیب سطحی
بسیار آسان با استفاده از اچ کردن در کندوپاش	امکان پذیر نیست	تمیز کردن درجا
ترکیب آلیاژ به شدت قابل کنترل است	غیر قابل کنترل	استوکیومتری و ترکیب آلیاژی
امکان آسیب تابشی	فقط در حالت استفاده از پرتو الکترونی	آسیب با اشعه ایکس
پرهزینه	آسان	تغییر در مواد منبع
کم	زیاد	تجزیه مواد
مناسب و خوب	دشوار است	امکان صنعتی شدن
در مساحت های بزرگ آسان است	دشوار است	یکنواختی
پرهزینه	کم هزینه	تجهیزات مورد استفاده
تعداد زیادی رسوب بر هر زیرلایه	فقط یک رسوب	تعداد رسوب در هر بار
امکان پذیر است	دشوار است	کنترل ضخامت
عالی	غالباً ضعیف است	چسبندگی به سطح
کم	زیاد	پدیده سایه افکنی اتم ها
با اعمال بایاس، گرمایش سطح و فشار امکان پذیر است	دشوار است	کنترل خواص فیلم (مانند اندازه دانه، پوشش سطوح غیریکنواخت)

۳-۳ مکانیسم رشد لایه نازک در PVD

در PVD، اتم‌های برخوردکننده به سطح در شرایط خلاء می‌توانند به سرعت منعکس شده، و یا بعد از زمان اقامت مجدداً تبخیر شده و یا روی سطح متراکم شوند (شکل ۴). تبخیر مجدد تابعی از انرژی پیوندی بین یک اتم و سطح، دمای سطح و شار اتم‌های متحرک است. به عنوان مثال، افزایش دمای سطح تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد منجر به تبخیر رسوب کادمیوم در حین تولید لایه نازک کادمیومی می‌شود.



شکل ۴: احتمال انعکاس، تبخیر مجدد و تراکم اتم‌های برخوردی به سطح

نسبت اتم‌های متراکم شده به اتم‌های برخوردی را "ضریب چسبندگی" می‌گویند. اتم‌ها ممکن است قبل از تراکم روی سطح تحرک داشته باشند. قابلیت تحرک یک اتم روی سطح به انرژی اتم، به برهمکنش اتم سطح (پیوند شیمیایی) و دمای سطح بستگی دارد. تحرک روی سطح می‌تواند با تغییر ترکیب شیمیایی و ساختار کریستالی نیز تغییر کند. همچنین صفحات سطح با کریستالوگرافی مختلف، انرژی آزاد سطحی متفاوتی دارند که نفوذ سطحی را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

در حقیقت اتم‌ها با از دست دادن انرژی روی سطح متراکم می‌شوند. آنها انرژی خود را به شیوه‌های زیر از دست می‌دهند:

- ساختن و شکستن پیوندهای شیمیایی با اتم‌های زیرلایه
- یافتن مکان‌های هسته‌زایی ترجیحی (نقص شبکه، مراحل اتمی، ناخالصی)

- برخورد با سایر اتم های سطحی نفوذ کننده (گونه های یکسان)
- برخورد یا واکنش با گونه های سطحی جذب شده

به طور کلی، تشکیل لایه نازک روی زیرلایه طی دو مرحله کلی هسته‌زایی و رشد ذرات اتفاق می افتد (شکل ۸ ب). وقتی سطح زیرلایه از جنس اتم های رسوب کننده باشد، فرآیند هسته‌زایی همگن و اگر از نوع دیگری باشد، فرآیند ناهمگن صورت می‌پذیرد. همچنین بر طبق نوع برهمکنش اتم های رسوب کننده و زیرلایه سه نوع مکانیسم هسته زایی ممکن است اتفاق بیافتد .

۱. مکانیسم فرانک و اندر منجر به رشد لایه به لایه می شود (رشد لایه ای)

۲. مکانیسم والمر وبر (رشد جزیره‌ای)

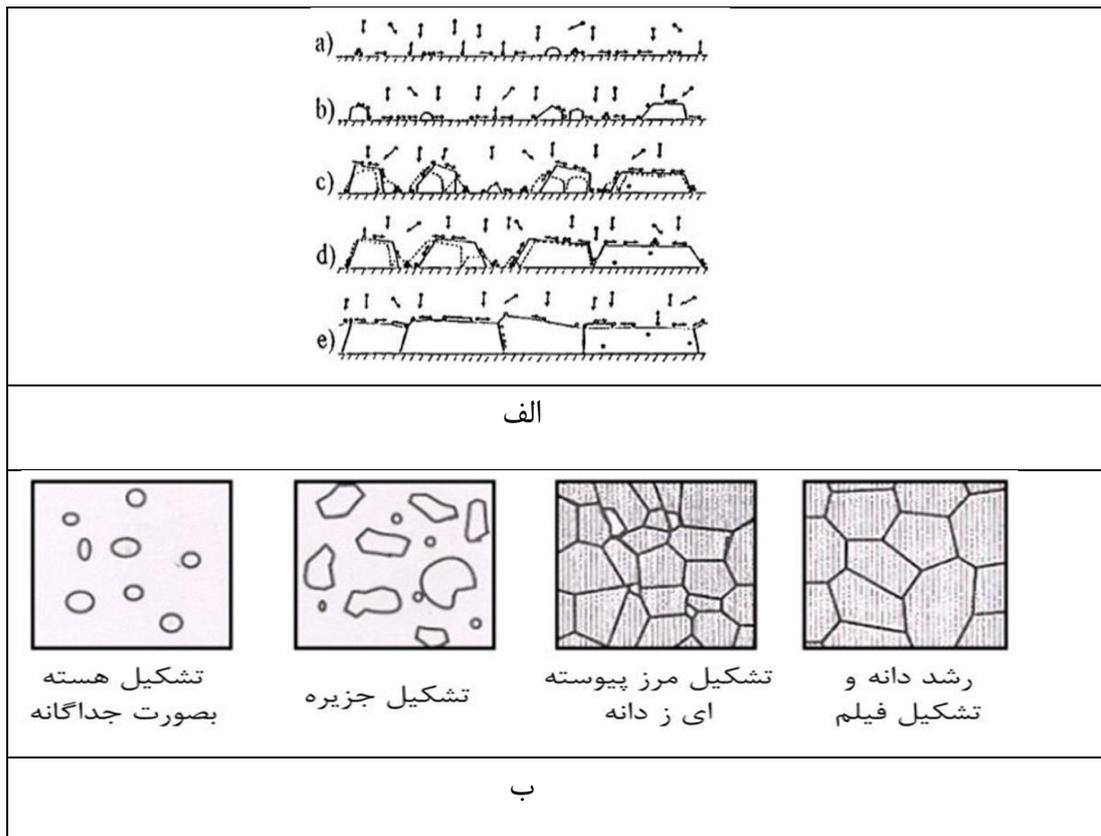
۳. مکانیسم استرانسکی کراستانو (رشد لایه‌ای + جزیره ای)

رشد لایه نازک نیز در طی سه مرحله صورت می پذیرد (شکل ۵ الف)

۱. تجمع بخار روی زیرلایه و انتقال به مکان ترجیحی برای هسته زایی (بخش a)

۲. اتصال جریان جدید از اتم‌های گازی به یک هسته در حال رشد و کاهش انرژی سطحی (بخش b و c)

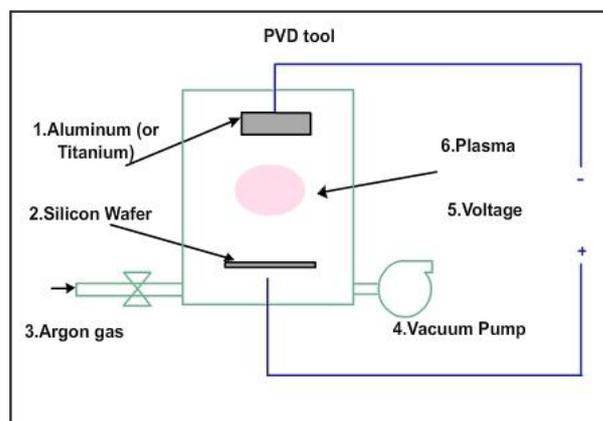
۳. تشکیل فیلم، این مرحله به دمای زیرلایه و انرژی سیستم بستگی دارد (بخش d و e)



شکل ۵: الف- مکانیسم رشد لایه نازک ب- مراحل تشکیل لایه نازک روی سطح زیرلایه

۴-۳ بررسی جزئی تر روش PVD

ابعاد تجهیزات PVD، دارای ارتفاع ۴ فوت و قطر ۴ فوت می باشد. ماده‌ای که برای رسوب گذاری استفاده می شود، (به عنوان مثال تیتانیوم) در بالای صفحه قرار می گیرد. همانطور که در شکل ۶ می بینید.



شکل ۶: شکل شماتیک یک محفظه PVD

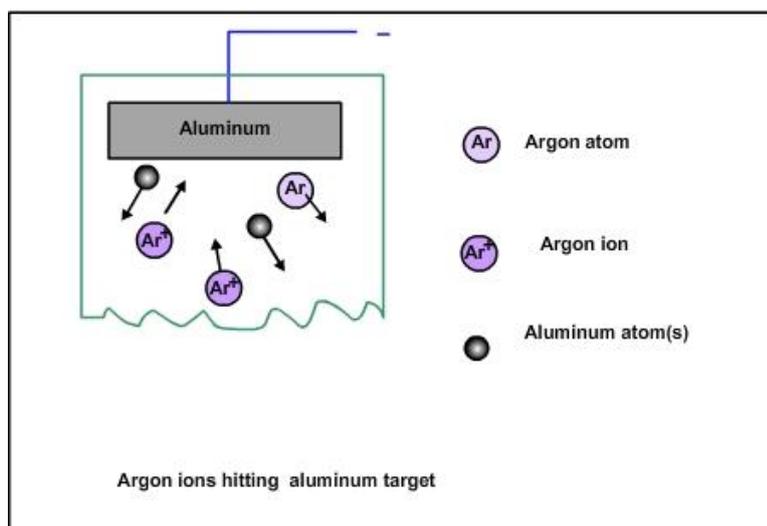
تنگستن به شکل یک دیسک با ضخامت ۱ اینچ و قطر ۵ یا ۶ اینچ است. در پایین محفظه زیر لایه سیلیکون نگه داشته می‌شود. به جز این، برای ورود گازها بر محفظه و تخلیه محفظه با پمپ تخلیه و اتصالات الکتریکی برای رسیدن به ولتاژ بالا (بیشتر از ۱۰۰۰۰ ولت) وجود دارد. یک صفحه با بار منفی در نزدیکی تنگستن قرار دارد و یک صفحه با بار مثبت در نزدیکی زیر لایه سیلیکونی قرار دارد. تنگستن یا هر ماده دیگر هدف^۷ است. چرا تنگستن هدف است؟ و روی لایه سیلیکون چگونه قرار می‌گیرد؟

اجازه بدهید مثالی را مطرح کنیم؛

در خانه‌های قدیمی، اگر داخل خانه بایستیم و یک توپی را به سمت سقف پرتاب کنیم، به دلیل قدیمی بودن خانه، گرد و غبار روی کف خانه سقوط می‌کند. برخی از این ذرات گرد و غبار ممکن است درشت باشند و به کف زمین نچسبند. در روش PVD، ما می‌توانیم یک فرایند مشابه را تصور کنیم. در این روش به جای توپ از یون‌های آرگون استفاده می‌شود. سقف نشان دهنده هدف تنگستن است. هنگامی که یون‌ها به هدف برسند، چند اتم از هدف جدا خواهد شد و بر روی سیلیکون قرار می‌گیرند. (آن‌هایی که درشت هستند، چسبندگی ندارند و بالعکس) این یک توضیح ساده‌ای از فرایند PVD است که اسپری PVD نیز نامیده می‌شود.

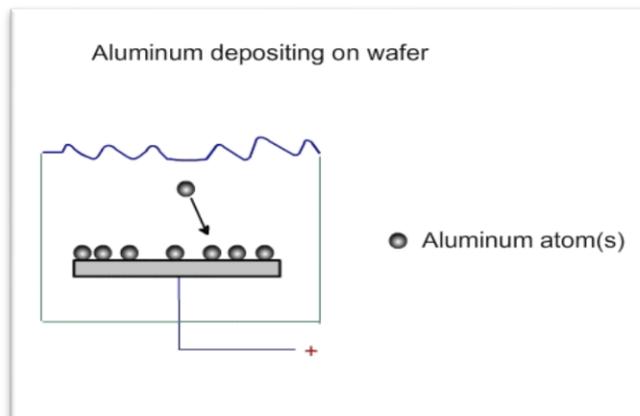
ابتدا هوای موجود در محفظه باید خالی شود و بایستی خلا ایجاد شود. سپس گاز آرگون وارد محفظه می‌شود و یک فشار پایین در محفظه برقرار می‌شود. اگر ولتاژ بالا به صفحات اعمال شود، یک پلاسما تشکیل می‌شود. پلاسما حاوی الکترون‌ها و یون‌های Ar^+ است. پلاسما را نمی‌توان با ۲۲۰ ولت معمولی تولید کرد. یون Ar^+ به سمت صفحه منفی جذب می‌شود و به آن سمت حرکت می‌کند. سپس یون‌های آرگون اتم‌های تنگستن را از جا می‌کند. به همین دلیل است که تنگستن در این فرایند هدف قرار می‌گیرد.

^۷ target

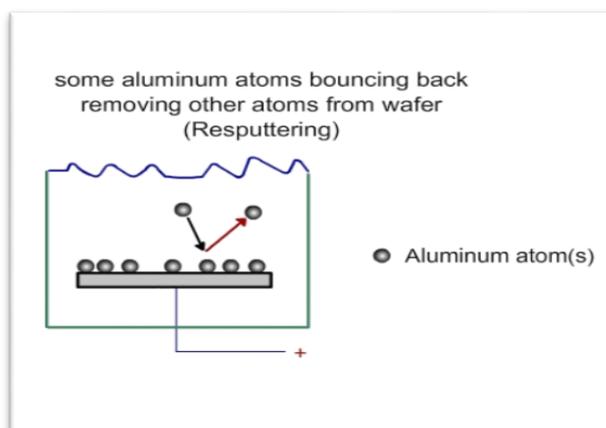


شکل ۷: ضربه یون‌های آرگون به هدف

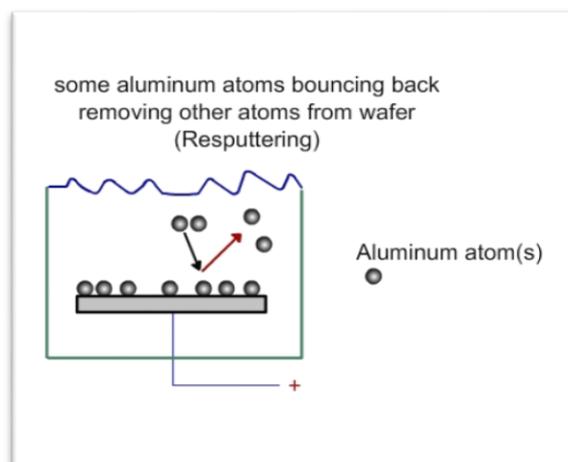
از آنجایی که یون‌های آرگون با نیروی زیاد به هدف برخورد می‌کنند، برخی از اتم‌های هدف شکسته می‌شوند و به بیرون پرتاب می‌شوند. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است. برای یک یون آرگون چند اتم تنگستن مورد هدف قرار می‌گیرد؟ این عدد بازده پراکندگی یا بیرون انداختن نامیده می‌شود. این عدد به سرعت یون‌های آرگون، همچنین زاویه تاثیر و استحکام باند هدف بستگی دارد. اتم‌ها از هدف به سمت زیرلایه سیلیکونی با نیروهای مختلف وارد می‌شوند. همه‌ی آن‌ها بر روی زیرلایه سیلیکونی ترسیب نمی‌شوند و برخی از آن‌ها ترسیب می‌شوند (شکل ۸). در حالی که برخی به عقب برمی‌گردند (شکل ۹). برخی هم ممکن است موادی که قبلاً روی زیرلایه نشسته را بردارند (شکل ۱۰)



شکل ۸: فرایند ترسیب در نزدیکی زیرلایه در یک محفظه PVD



شکل ۹: فرایند بیرون انداختن در نزدیکی زیرلایه در یک محفظه PVD



شکل ۱۰: فرایند پراکندگی دوباره در نزدیکی زیرلایه در یک محفظه PVD

در میان اتم‌های تنگستن که روی زیرلایه قرار می‌گیرند، به کسری که روی سطح می‌چسبند، ضریب چسبندگی نامیده می‌شود. اگر تمام اتم‌ها روی سطح بچسبند، ضریب چسبندگی ۱ می‌شود. اگر هیچ کدام از اتم‌ها چسبندگی نداشته باشند، ضریب چسبندگی ۰ می‌شود. معمولاً ضریب چسبندگی بین ۰/۷-۰/۸ است.

تکنیک‌های خاصی برای اطمینان از یکنواختی رسوب استفاده می‌شود. برای مثال خود قطعه سیلیکونی به آرامی می‌تواند بچرخد. اگر زیرلایه گرم شود، لایه رسوب داده شده نرم می‌شود و حرکت می‌کند و از روی سطح شسته می‌شود.

مزیت استفاده از آرگون برای ضربه زدن به هدف و قرار دادن مواد روی زیرلایه چیست؟

چرا فقط از خاصیت تبخیر در محفظه استفاده نکنیم. موادی مثل تنگستن دارای نقطه ذوب (3422°C) و نقطه جوش (5555°C) بسیار بالا است. خیلی مشکل هست که تنگستن توسط بخار رسوب کند و انرژی خیلی زیادی مورد نیاز است. با این حال در PVD از آنجایی که مواد توسط بمبارانی از یون‌های آرگون جابه‌جا می‌شوند، این عملیات در دمای نسبتاً پایین می‌تواند انجام شود.

۳-۴-۱ چرا ما باید از گاز آرگون استفاده کنیم؟

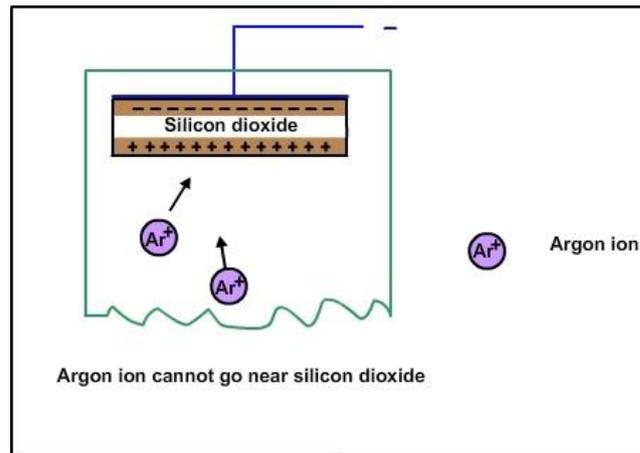
آرگون یک گاز بی اثر است که با سطح هدف یا سطح زیرلایه سیلیکون واکنش نمی‌دهد. اگر ما به جای آن از گاز اکسیژن یا نیتروژن استفاده کنیم، ممکن است این گازها با هدف یا سطح زیرلایه واکنش دهند. ما می‌توانیم از گازهای بی اثر دیگر مثل هلیوم یا نئون هم استفاده کنیم. با این حال، هلیوم یا نئون سخت‌تر یونیزه می‌شوند و همچنین از گاز آرگون گران‌تر هستند. بنابراین گاز آرگون برای پراکندگی استفاده می‌شود.

روش PVD برای رسوب‌گذاری تنگستن، تیتانیوم، تانتالیوم، مس، تیتانیوم نیتريد و تانتالیوم نیتريد استفاده می‌شود. در حال حاضر فلزات تیتانیوم تانتالیوم و نیتريد‌هایشان با استفاده از روش PVD رسوب‌گذاری می‌شوند. یک لایه نازک از مس، که به لایه دانه‌ای معروف است، با استفاده از روش PVD

رسوب گذاری می شود. در حالی که مس باقی مانده با استفاده از رسوب الکتروشیمیایی لایه گذاری می شود.

۳-۴-۲ پراکندگی RF

اکثر مواردی که در بالا اشاره شد هادی الکتریکی هستند. روش PVD را می توان با استفاده از عایق هایی مثل سیلیکون دی اکسید یا سیلیکون نیتريد اصلاح کرد.



شکل ۱۱: مشکل استفاده از ماده عایق به عنوان هدف

۳-۴-۳ چه مشکلی در استفاده از PVD معمولی برای رسوب یک عایق مثل سیلیکون دی

اکسید وجود دارد؟

بیایید به شکل ۱۱ نگاه کنیم، در ابتدا یون های آرگون به سیلیکون دی اکسید ضربه می زنند و برخی از سیلیکون دی اکسیدها جابه جا می شوند. آرگون روی سیلیکون دی اکسیدها گیر می افتد و از آنجایی که سیلیکون دی اکسید عایق است، بار جابه جا نمی شود. سیلیکون دی اکسید یک بار مثبت دریافت می کند و سمت دیگر شیشه بار منفی خواهد داشت. اما هیچ هدایت الکتریکی وجود نخواهد داشت. خیلی زود کل سطح بار مثبت می گیرد و چون یون های آرگون نیز دارای بار مثبت هستند، به شیشه نزدیک نمی شوند. بنابراین یون های آرگون نمی توانند به هدف ضربه بزنند و مواد هدف را نمی توانند بر روی سیلیکون ترسیب کنند. اگر ما از یک فلز استفاده می کردیم، بار مثبت به خاطر هدایت الکترن ها از سمت پشت هدف به سمت

پلازما خنثی می‌شد و به این ترتیب یون‌های آرگون به کارشان ادامه می‌دادند.

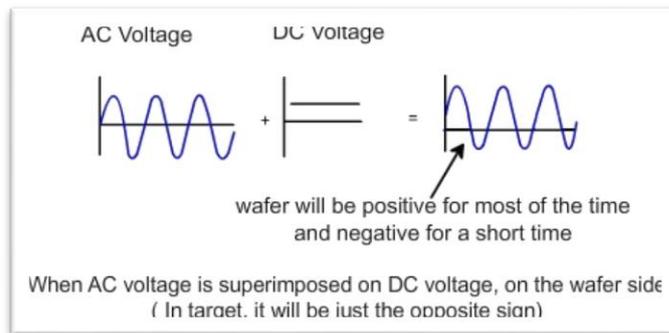
حال برای قرار دادن عایق با استفاده از روش PVD، الکترون‌ها بایستی به طور منظم به سطح محفظه

بخار عرضه شوند. این مهم، ولتاژ AC رادیویی (RF) نامیده می‌شود.

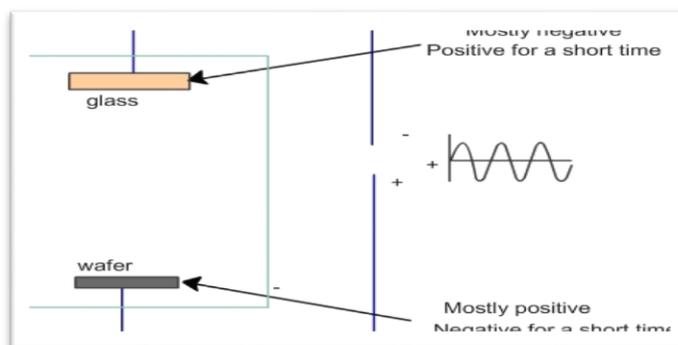
۴-۴-۳ PVD RF چیست؟

محفظه‌ای که از اسپری‌های RF استفاده می‌کنند بسیار شبیه به یک اسپری معمولی است. اما ولتاژ

اعمال شده در این مورد متفاوت خواهد بود. در شکل ۱۲ و ۱۳ این موارد توضیح داده شده است.



شکل ۱۲: پراکندگی RF، اضافه شدن ولتاژ AC به DC



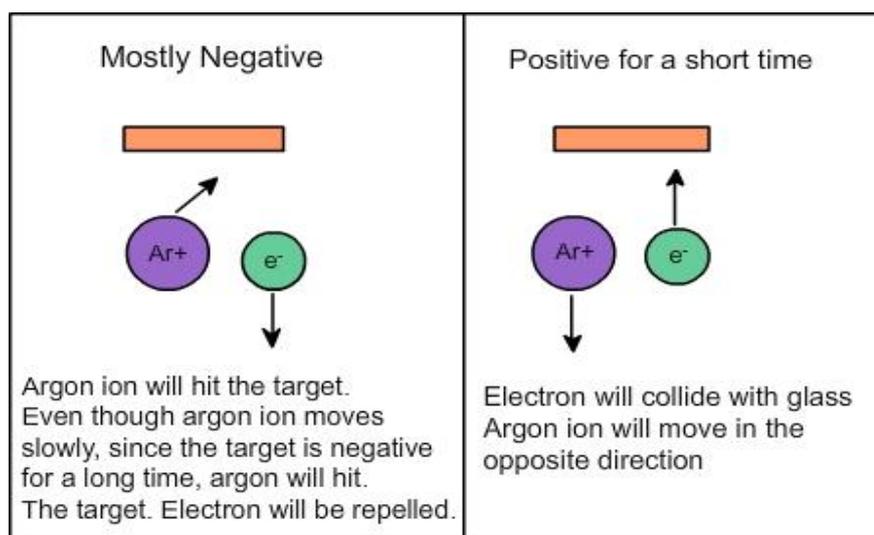
شکل ۱۳: شماتیکی از محفظه پراکندگی RF

اگر ما یک ولتاژ AC داشته باشیم و آن را به یک ولتاژ DC اضافه کنیم؛ یک ولتاژ ترکیبی داریم که در شکل نشان داده شده است. اگر ما فقط یک ولتاژ AC خالص را اعمال کنیم؛ در ۵۰٪ اوقات سیلیکون مثبت است و ۵۰٪ دیگر هدف مثبت است. اما وقتی که ولتاژ DC را به AC اضافه می‌کنیم، در ۷۵٪ زمان سیلیکون مثبت است و هدف در اکثر اوقات منفی است. برای یک زمان کوتاه، هدف مثبت و سیلیکون منفی خواهد بود.

کاربرد این چیست؟ هنگامی که این ولتاژ ACRF همراه با DC اعمال می‌شود، چه اتفاقی

می‌افتد؟

هنگامی که هدف بیشتر زمان‌ها منفی است، یون‌های آرگون به آن خواهند رسید و برخی از الکترون‌ها به سمت سیلیکون حرکت می‌کنند. شیشه توسط یون‌های آرگون برداشته می‌شود و بر روی سیلیکون قرار می‌گیرد. برای یک زمان کوتاه، الکترون در نزدیکی هدف مثبت است. در آن زمان الکترون‌ها به هدف جذب می‌شوند و به هدف ضربه می‌زنند. هدف حاوی یون‌های آرگون است. پس الکترون‌ها یون‌های آرگون را خنثی می‌کنند. همانطور که در شکل ۱۴ نشان داده شده. از این رو هدف خنثی خواهد شد. اساسا الکترون‌ها به سطح هدف از طرف پلاسما و نه از تماس الکتریکی در پشت اسپری می‌شوند.



Events near the target (glass)

شکل ۱۴: پراکندگی RF، اتفاقات نزدیک هدف

حال یون‌های آرگون به سیلیکون ضربه می‌زنند. از آنجایی که آرگون بسیار سنگین‌تر از الکترون است و به دلیل کمبود وقت، این اتفاق قابل مشاهده نیست و از آنجایی که الکترون‌ها خیلی سبک هستند، به سطح هدف هیچ آسیبی نمی‌رسانند و هیچ اتمی به خاطر برخورد الکترون از سطح هدف خارج نمی‌شود. ما دیدیم یون‌های آرگون به دلیل زمان ناچیز به سیلیکون نمی‌رسند. حتی اگر ضربه هم بزنند، با نیروی کمی این اتفاق می‌افتد. در مرحله اول بار الکترون منفی و بار هدف مثبت می‌شود، به همین دلیل یون آرگون به سیلیکون ضربه می‌زند و برخی از مواد را جابه‌جا می‌کند. این در واقع باعث تسهیل رسوب مناسب در مراحل بعدی می‌شود. این موضوع همچنین به پاک کردن هر نوع آلودگی از مواد قبلی کمک می‌کند. در حال حاضر ولتاژ AC باید در یک فرکانس بسیار بالا استفاده شود. به همین دلیل است که RF به فرکانس رادیویی نامیده می‌شود.

۳-۴-۵ پلاسمای فلزی یونی شده و پلاسمای فلزی موازی

در PVD تکنیک‌های پیشرفته زیادی وجود دارد، که یکی از آن‌ها PVD موازی نامیده می‌شود. و دیگری پلاسمای فلزی یونی شده^۸ یا نامیده می‌شود.

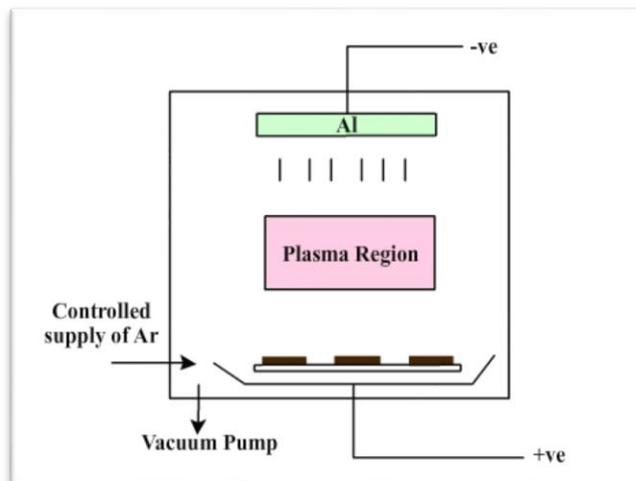
در طی رسوب‌گذاری، ما می‌خواهیم رسوب یکنواختی در سطح تشکیل شود. به عنوان مثال ضخامت فیلم رسوب داده شده باید در مرکز، لبه و در هر نقطه بین آن در سطح یکنواخت باشد. اگر هدف در مقایسه با زیر لایه سیلیکون خیلی کوچک باشد، به نظر می‌رسد یک منبع برای مواد ذخیره شده است. در این صورت مرکز سطح سیلیکون دارای رسوب بالاتر خواهد بود و لبه دارای رسوب پایین‌تر است. یکی از راه‌های بهبود این امر، افزایش سایز هدف است. اگر سایز هدف بزرگ باشد، رسوب یکنواخت تشکیل می‌شود. در این مورد هدف می‌تواند در نزدیکی سیلیکون باشد. از طرف دیگر ما می‌توانیم هدف را دورتر از سیلیکون قرار دهیم. اگر بیش از حد دور باشد، رسوب یکنواخت‌تری داریم. این مورد پرتاب بلند نامیده می‌شود. علاوه بر این سیلیکون می‌تواند در طول فرایند بچرخد و این موضوع در کسب ضخامت یکنواخت کمک کند. با این حال

^۸ Ion Metal Plasma (IMP PVD)

اگر فاصله ماکسیمم را افزایش دهیم، ناخودآگاه محفظه بزرگ خواهد شد و به صورت یک محفظه تخلیه عمل می‌کند. که به انرژی بالایی احتیاج دارد.

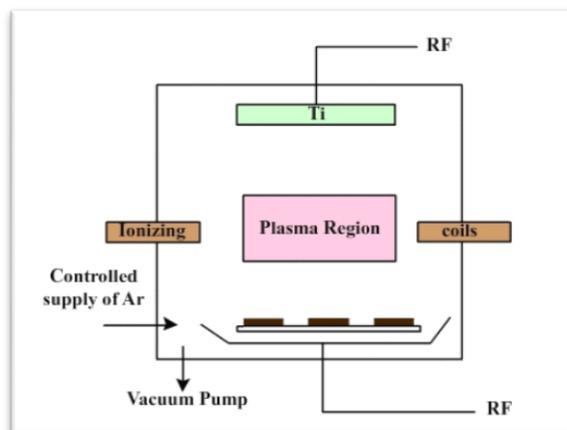
هدف تشکیل رسوب می‌تواند با روش دیگری به نام پرتو موازی شده به دست بیاید. طرحش در شکل

۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۵: پرتوهای جمع شده PVD

در این روش یک صفحه حفره‌دار بین هدف و زیرلایه سیلیکون قرار می‌گیرد. اتم‌های هدف که به سمت سیلیکون می‌آیند باید در خط مستقیم قرار بگیرند. فقط در این صورت است که از صفحه قرمز عبور می‌کنند. در غیر این صورت آن‌ها توسط یک صفحه متوقف می‌شوند. این تضمین می‌کند که همه اتم‌ها در یک زاویه مشابه به سیلیکون می‌رسند و فیلم رسوب داده شده تشکیل می‌شود.



شکل ۱۶: پلاسمای فلزی یونیزه شده IMP-PVD

پیشرفته ترین روش برای به دست آوردن ضخامت یکنواخت روش IMP یا پلاسمای فلزی یونیزه شده نامیده می‌شود. یک طرح کلی از تجهیزات IMP در شکل ۱۶ نشان داده شده است. در این مورد کلاسترهای فلزی که در حال حرکت به سمت سیلیکون هستند، با استفاده از سیم‌پیچ یونیزه کننده، یونیزه می‌شوند. بنابراین اتم‌های تیتانیوم و آرگون در حین حرکت، یونیزه می‌شوند. پس از باردار شدن به سمت سیلیکون جذب می‌شوند. از این رو اگر حتی آن‌ها از زوایای دیگر هدف خارج شوند، به دلیل نیروی جاذبه به شکل عمودی به سمت سیلیکون می‌روند. از آنجایی که همه این اتم‌ها در یک زاویه مشابه قرار دارند، پس رسوب یکنواخت تر است. بهترین کیفیت فیلم در هنگام استفاده از اسپری IMP به دست می‌آید.

۳-۵ نتیجه گیری

رسوب فیزیکی بخار که شامل روش های تبخیری و کندوپاش است، از رایج ترین رویکردها تولید لایه نازک به شمار می رود. هر یک از این روش ها از جنبه های مختلف، مزایا و معایبی دارند. از عمده ترین آنها می توان به بالا بودن نرخ تبخیر، خلوص بالای لایه نازک، آسیب سطحی کم و کم هزینه بودن تجهیزات در روش تبخیری و قابلیت کنترل ضخامت و خواص فیلم، ترکیب آلیاژ و چسبندگی عالی فیلم به زیرلایه اشاره کرد. مقدار فشار، دما، مشخصات زیرلایه، نوع منبع گرمایی از عوامل مهم و تاثیرگذار بر مشخصه لایه نازک ایجاد شده است.

در بخش بعدی به تکنیک دوم رسوب گذاری می پردازیم. (CVD)

۴ معرفی روش های رسوب دهی شیمیایی بخار (CVD)

روش رسوب گذاری شیمیایی از فاز بخار خود شامل انواع روش های طبقه بندی شده است که با توجه ظرافت ها و پیچیدگی های روش، قابل انتخاب است.

۴-۱ تاریخچه روش CVD

رسوب دهی شیمیایی بخار از ابتدا به عنوان یک راه موثر برای ساخت طیف وسیعی از قطعات و

محصولات به عنوان یک فرآیند تولید جدید در چندین بخش صنعتی شامل صنعت نیمه هادی، صنعت سرامیک و ... توسعه داده شده است. روش فوق بر اثر تلاش زیاد محققان دانشگاهی و صنعت در واحدهای تحقیق و توسعه از گستره اولیه خود در صنایع نیمه هادی و میکروالکترونیک بسیار فراتر رفته است. از دلایل توسعه پذیر بودن روش های CVD می توان به توانایی تولید لایه‌هایی با تنوع زیاد، پوشش فلزات، نیمه رساناها و ساخت لایه‌هایی با ترکیبات آلی و غیر آلی اشاره کرد. لایه‌های ایجاد شده معمولاً در شکل بلوری یا شیشه ای (آمورف) و با کنترل خواص مطلوب بدست می آیند.

CVD جزء تکنیک‌هایی است که به طور نسبی پیشرفت زیادی داشته است. به طور کلی در روش CVD، یک ماده ی جامد از واکنش شیمیایی در فاز بخار (و یا بر سطح بستر) بوجود می آید. تشکیل دوده به دلیل اکسید شدن ناقص هیزم در حال سوختن، در زمان های قبل از میلاد احتمالاً قدیمی ترین نمونه رسوب گذاری با استفاده از CVD می باشد. بهره برداری صنعتی از CVD به مقاله de Lodyguine در سال ۱۸۹۳ مربوط می شود که تنگستن را بر روی رشته های لامپ کربنی از طریق کاهش WCl_6 به وسیله H_2 رسوب داده بود.

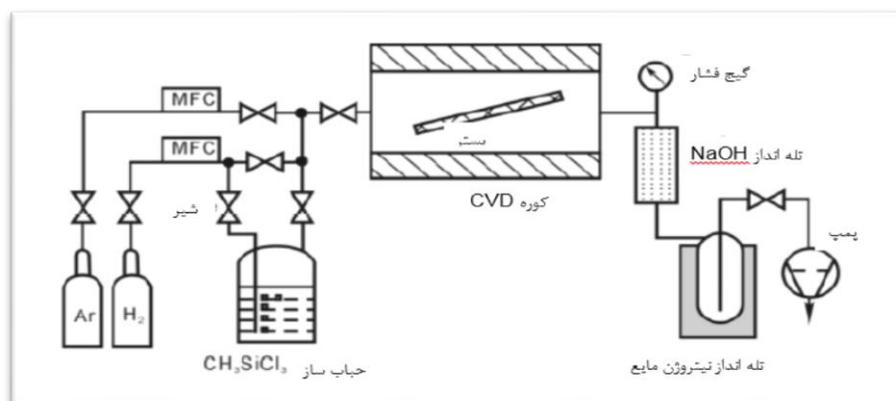
در ۴۰ سال گذشته کاربردهای CVD به طور قابل ملاحظه ای با تکیه بر جنبه های رسوب گذاری رشد بسیار زیادی داشته است. با پیشرفت فرآیند CVD این تکنیک مهم در پوشش دهی، برای تولید لایه های نازک، نیمه هادی‌ها و پوشش‌هایی با خصوصیات سطحی بهبود یافته تبدیل شود. بهبود در خصوصیات نظیر محافظت در برابر سایش، خوردگی، اکسید شدن، واکنش های شیمیایی، تنش حرارتی و فرآیندهای جذب نوترون از این دسته اند.

۴-۲ اساس روش CVD

در ساده ترین صورت آن، CVD شامل جریان گاز یا گازهای پیش ماده در یک محفظه است. در محفظه فوق یک یا چند سطح گرم که قرار است پوشش دهی شوند، وجود دارد. در این روش واکنش های شیمیایی بر روی (و یا در نزدیکی) سطوح داغ رخ می دهد. در نتیجه رسوب به صورت یک فیلم نازک بر

روی سطح به وجود می آید. این فرآیند منجر به تولید مواد شیمیایی می شود. همچنین مواد زائد و محصولات جانبی نیز بوجود می آیند که از محفظه، همراه با گازهای پیش ماده که واکنش نداده اند خارج می شود. رسوب دهی به طور معمول در دماهای حدود ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد انجام می پذیرد. برخلاف رسوب دهی فیزیکی فاز بخار که فرایندهایی مانند تبخیر، پراکنش و تصعید را شامل می شود، روش CVD دربرگیرنده تغییرات (واکنش های) شیمیایی در پیش ماده (یا بین پیش ماده ها) است.

شکل ۱۷ یک مثال نوعی از سیستم CVD می باشد، جایی که در آن گازهای واکنش دهنده، که به طور معمول گازهای پیش ماده گفته می شود، (در اینجا H_2 و CH_3SiCl_3) در دمای مناسب وارد محفظه واکنش می شوند. همان طور که گازها از راکتور می گذرند گازها در تماس با بستر^۹ داغ قرار می گیرند؛ سپس آنها واکنش می دهند و یک لایه جامد SiC بر روی بستر رسوب داده می شود. معمولاً از یک گاز خنثی مانند آرگون به عنوان رقیق کننده استفاده می شود. دما و فشار رسوب دهی دو عامل محدود کننده می باشند. در انتهای واکنش، گازهای خروجی شامل HCl توسط NaOH به دام انداخته می شود و قبل از خروج به اتمسفر توسط گاز N_2 متراکم می شود.



شکل ۱۷: یک مثال از سیستم CVD

بنابراین CVD یک نام عمومی برای گروهی از فرایندهایی است که شامل ایجاد یک لایه نازک توسط

^۹ substrate

واکنش شیمیایی و رسوب دهی لایه جامد بر روی بستر می شود. به طور کلی در حین فرایند CVD می توان گفت مراحل زیر اتفاق می افتند:

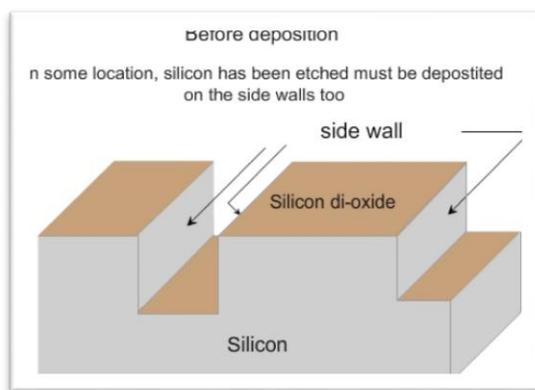
۱. حمل و نقل جرم گونه های گازی واکنش دهنده به مجاورت بستر؛
۲. انتشار^{۱۰} گونه های واکنش دهنده از طریق لایه مرزی به سطح بستر و یا واکنش های شیمیایی همگن برای تشکیل گونه های حدواسط؛
۳. جذب گونه های واکنش دهنده یا حد واسط بر روی سطح بستر؛
۴. مهاجرت سطحی، واکنش ناهمگن، ورود اتم به سطح در حال رشد، و تشکیل محصول های جانبی؛
۵. دفع محصولات جانبی در واکنش سطحی؛
۶. نفوذ محصولات جانبی به توده گاز؛
۷. انتقال محصولات جانبی به خارج از محیط واکنش.

۳-۴ بررسی جزئی تر روش PVD

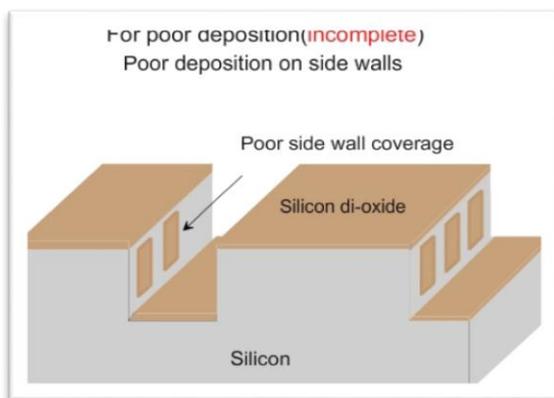
در روش PVD که در بالا توضیح داده شد، ترسیب یک ماده روی دیواره های جانبی، کار آسانی نیست. همان طور که در شکل ۱۸ نشان داده شده است. به خصوص اگر عمق زیاد باشد. اگر نسبت قطر (یا عرض) به عمق به عنوان نسبت ابعاد شناخته شده بسیار زیاد باشد، PVD نمی تواند پوشش در دیواره جانبی خوبی داشته باشد. (شکل ۱۹)

با این حال CVD را می توانیم برای پوشش دیواره جانبی خوب استفاده کنیم.

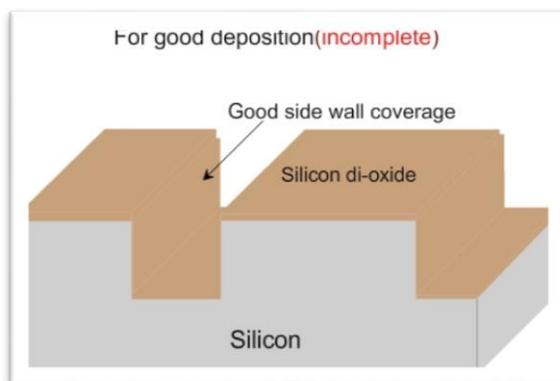
^{۱۰} Diffusion



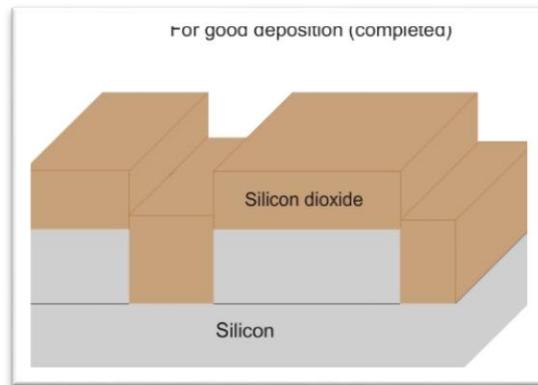
شکل ۱۸ : طرحی از زیرلایه رسوب داده شده و دیواره‌های جانبی پس از ترسیب



شکل ۱۹ : تصویری از یک فیلم ترسیب شده ضعیف بر روی دیواره‌های جانبی

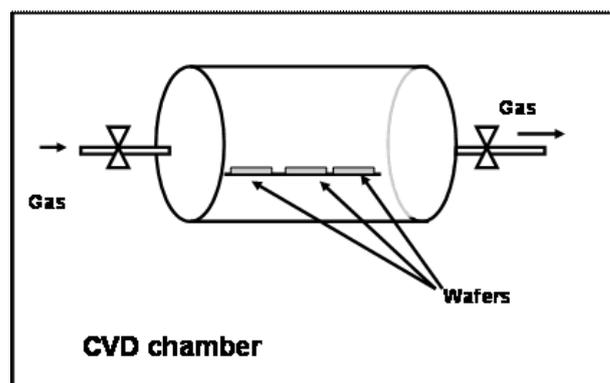


شکل ۲۰: تصویری از یک فیلم ترسیب شده خوب



شکل ۲۱: تصویری از یک فیلم ترسیب شده خوب پس از پایان فرایند رسوب گذاری

محفظه بزرگ CVD طولش ۶ فوت و عرضش ۳ فوت است. این محفظه دارای لوله‌ها و شیرهای اتوماتیک برای ایجاد خلا و عرضه گازهای مورد نظر با گازهای کنترل شده است. مواد رسوب داده شده به عنوان مثال تنگستن در قالب یک ترکیب به فرم گاز است. محفظه CVD همچنین دارای امکانات برای گرم کردن سیلیکون با شرایط کنترلی است. در شکل ۲۲ یک طرح ساده دیگر از CVD نشان داده شده است.



شکل ۲۲: شماتیکی از محفظه CVD

۴-۴ مزایای روش CVD

مانند سایر روش‌ها CVD دارای تعدادی مزیت می‌باشد که مواردی در ذیل آورده شده‌اند:

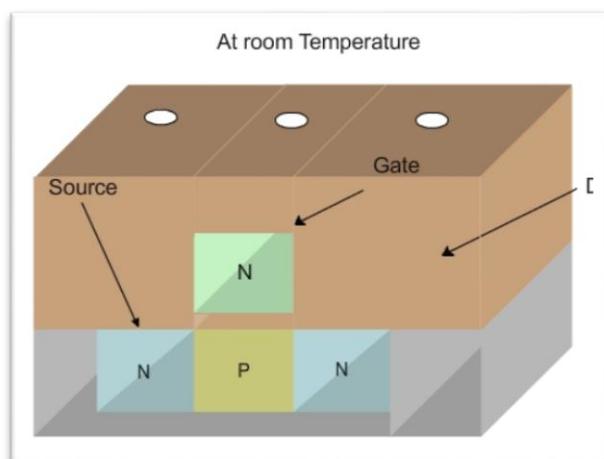
۱. فیلم‌های تشکیل دهنده با روش CVD به طور معمول منسجم می‌باشد بدین معنی که ضخامت لایه در تمامی نقاط قابل مقایسه و یکنواخت می‌باشد.
۲. توانایی رسوب گسترده‌ی وسیعی از مواد.
۳. رسوب دهی مواد قابل رسوب با درجه خلوص بسیار بالا.
۴. سرعت رسوب دهی مواد نسبتاً بالا است.
۵. نیاز نداشتن به شکست خلا برای رسوب لایه‌های مختلف.
۶. این روش توانایی کنترل ساختار کریستال، ساختار سطح، استوکیومتری و جهت دهی رسوب را دارد.

۴-۵ معایب روش CVD

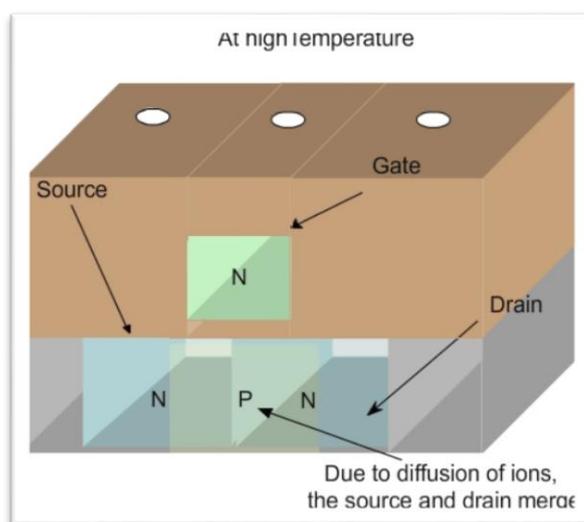
۱. این روش ایمنی کمی دارد و پیش ماده‌ها گاه آلاینده یا انفجار پذیر هستند.
 ۲. هیدرات‌ها و کربونیل‌ها سمی هستند (برای تولید ترکیبات فرار)
 ۳. مواد آلی فلزی در تماس با هوا آتشگیر هستند.
 ۴. تولید لایه‌هایی با خلوص بالا، نیازمند هزینه بالایی است.
- به طور کلی معایب خاصی در ارتباط با روند CVD وجود دارد. بسیاری از گازهای مورد استفاده در CVD خورنده و سمی هستند. از این رو باید اقداماتی جهت ایمنی انجام شود. همچنین هزینه مواد شیمیایی با خلوص بالا نیز زیاد است. اگر دما و فشار به خوبی کنترل نشود، واکنش در هوا اتفاق می‌افتد و تنگستن (یا هر چیز دیگری که قرار است رسوب کند) در هوا تشکیل می‌شود. این تنگستن مانند گرد و غبار ظاهر می‌شود و بر روی سیلیکون سقوط می‌کند. که این ذرات گرد و غبار چسبندگی خوبی ندارد و کیفیت

را پایین می‌آورد. دما در هنگام تولید تراشه به طور خودسرانه نمی‌تواند افزایش یابد. چون یک ترانزیستور با ناخالصی‌های مختلف و در مکان‌های مختلف ساخته می‌شود. هنگامی که سیلیکون گرم می‌شود، ترانزیستور به درستی عمل نمی‌کند. همانطور که در شکل ۲۳ و ۲۴ مشاهده می‌کنید. برای پیشگیری از این مشکل سیلیکون باید گرم شود.

پس چطور می‌توانیم مواد را به آن رسوب بدهیم؟ پلاسما برای کمک به اینجا می‌آید.



شکل ۲۳: شماتیکی از یک ترانزیستور در دمای اتاق



شکل ۲۴: شماتیکی از یک ترانزیستور در دمای بالا

۴-۶ کاربرد های فرایند CVD

رسوب دهی شیمیایی بخار به طور وسیع در تولید نیمه هادی ها (به عنوان یک بخش از فرآیند تولید نانوساختارهای نیمه هادی) و برای رسوب فیلم های گوناگون نظیر سیلیکون های پلی کریستال ، آمورف، اپی تکسیال، سیلیکون ، ژرمانیوم، تنگستن، سیلیکون نیتريد، سیلیکون اکسی نیتريد و تیتانیم نیتريد استفاده می شود. فرآیند CVD برای تولید الماس سنتزی نیز کاربرد دارد. این فرآیند برای پوشش دهی قطعات مختلف و رسیدن به خواص نوری، الکتریکی، گرمایی، مکانیکی و مقاومت خوردگی ماده به کار می رود. این روش همچنین برای تشکیل فیلم ها و الیافی که برای فیلتر کردن مواد کامپوزیت مصرف می شوند، کاربرد دارد.

۴-۷ انواع روش های CVD بر اساس پیش ماده

پیش ماده های گازی بیشتر مورد توجه هستند و ترجیح داده می شوند زیرا به آسانی می توان پارامترهای گازی را کنترل کرد. برای فرآیندهای CVD ، هر دو مواد مایع و جامد معمولاً به عنوان پیش ماده استفاده می شوند. در برخی از موارد، آنها برای تولید عرضه کافی باید گرم شده و به دمای مورد نیاز برسند، سپس توسط یک گاز حامل به محفظه ی واکنش انتقال داده شوند .

۴-۷-۱ پیش ماده گازی

منظور منابعی می باشند که در دمای محیط به صورت گاز وجود دارند. این مورد برای انتقال پیش ماده های گازی با استفاده از کنترل کننده های فشار، پمپ ها و جریان سنج ها بسیار راحت می باشد. به هر حال، برخی از پیش ماده های گازی پیروفوبیک^{۱۱} ، گران قیمت و خطرناک می باشند. بنابراین، آنها را با

^{۱۱} pyrophobic

یک گاز بی اثر رقیق می‌کنند. علاوه بر این، این نیز مهم است تا اطمینان حاصل شود که هیچ واکنش شیمیایی بین پیش ماده‌های گازی و همه اجزای جریان سنج، سوپاپ ها، گیج و لوله برای به حداقل رساندن خوردگی وجود ندارد. از نشت کردن نیز باید در سیستم ورود گاز اجتناب شود.

۴-۷-۲ پیش ماده مایع

بسیاری از پیش ماده های CVD در دمای اتاق در حالت مایع هستند. پیش ماده جهت تبخیر و انتقال توسط یک گاز حامل به محفظه واکنش بایستی تا دمای مناسبی حرارت داده شود. به طور کلی به ۳ طریق می توان پیش ماده مایع را تبخیر و به محفظه واکنش انتقال داد:

۱. تبخیر مستقیم؛ که در آن بخار به صورت مستقیم و بدون نیاز به گاز حامل انتقال داده می‌شود.
۲. انتقال با گاز حامل؛ که از روی مایع عبور داده می‌شود.
۳. حباب سازی درون مایع؛ که گاز حامل از پایین مایع آزاد می‌شود و به سمت بالا و محفظه واکنش می‌آید.

از بین روش‌های گفته شده روش حباب سازی ارجحیت بیشتری دارد زیرا این روش آسان تر است و سریع تر مخلوطی از گاز یکنواخت بدست می‌دهد.

۴-۷-۳ پیش ماده جامد

استفاده از پیش ماده های جامد دارای مشکلاتی هستند زیرا باید آن‌ها تا دمای تبخیر شدنشان حرارت داده می‌شوند که در برخی موارد دمای بسیار بالایی نیاز می‌باشد. سنتز در محل^{۱۲} اغلب برای تولید پیش ماده‌های جامد استفاده می‌شود. بدین صورت که مواد سازنده به صورت جدا در مسیر عبور گاز حرارت داده می‌شوند و با یکدیگر ترکیب شده و ماده مورد نظر را به وجود می‌آورند که در همین حین بر روی

^{۱۲} in situ

سطح بستر نیز نشانده می گردد.

۸-۴ انواع روش های CVD براساس خصوصیات فیزیکی بخار

CVD به کمک آئروسول^{۱۳} : روشی است که در آن پیش ماده با استفاده از آئروسول مایع / گاز، که

می تواند به صورت التراسونیک تولیدشود، به بستر منتقل می گردد. این روش برای استفاده پیش ماده غیر فرار مناسب است.

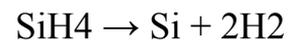
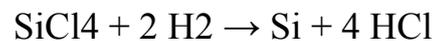
CVD تزریق مایع مستقیم^{۱۴} : روشی است که در آن پیش ماده به شکل مایع هستند (مایع یا

جامد محلول در یک حلال مناسب). محلول ها یا مایع در یک محفظه تبخیر نسبت به انژکتور (به طور معمول انژکتور خودرو) تزریق می شود. بخارات پیش ماده سپس به بستر همانند CVD کلاسیک منتقل می شود. نرخ رشد بالا را می توان با استفاده از این روش بدست آورد.

۹-۴ روش های مبتنی بر پلاسما

برخی از واکنش ها برای ترسیب مواد در زیر آمده است.

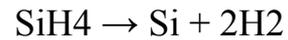
۱. برای ترسیب سیلیکون:



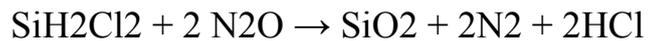
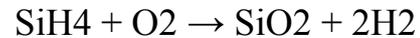
۲. برای ترسیب پلی سیلیکون

^{۱۳} Aerosol Assisted CVD, AACVD

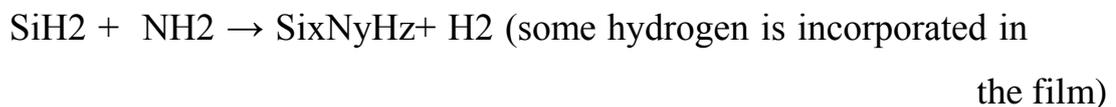
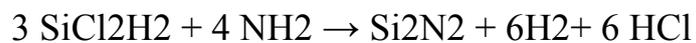
^{۱۴} DLICVD



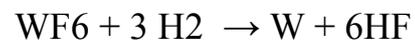
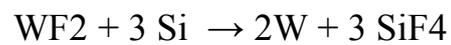
۳. برای ترسیب سیلیکون دی اکسید



۴. برای ترسیب سیلیکون نیتريد



۵. برای ترسیب تنگستن



اگر WF_6 و ديگر گازها عبور کنند در حالی که یک ولتاژ الکتریکی بالا در محفظه اعمال شود، پلاسما تشکیل می‌شود. این شبیه ایجاد پلاسماي PVD است. در حال حاضر واکنش حتی در دمای پایین نیز رخ می‌دهد. این نوع CVD به نام CVD پیشرفته یا PE-CVD معروف است. در این روش میدان مغناطیسی بالا برای افزایش تراکم پلاسما و بهبود کیفیت فیلم پوشیده شده استفاده می‌شود. به این فرایند CVD پلاسماي چگال یا HDP-CVD می‌گویند. دیدیم که مواد از جمله دی اکسید سیلیکون را می‌توان با استفاده از CVD رسوب داد. مثلا تترا اتیل اکسی سیلان (TEOS) می‌تواند در دمای بالا حرارت داده شود) یا در حضور پلاسما تجزیه شود) و دی اکسید سیلیکون تشکیل دهد. به طور مشابه گاز سیلان (SiH_4) و آمونیاک به شکل نیتريد سیلیکون واکنش می‌دهد. این فیلم‌ها نیتريد LP، نیتريد PE، یا نیتريد HDP

نامیده می‌شوند که بسته به روش مورد استفاده نام‌گذاری‌ها متفاوت است. در ادامه برخی از روش‌های مبتنی بر پلاسما بیان شده است.

CVD کمک شده با پلاسما میکروویو^{۱۵}: روشی است که در آن پلاسما توسط امواج میکروویو

تشکیل می‌شود.

CVD ارتقا یافته با پلاسما^{۱۶}: روشی است که در آن با بهره‌گیری از پلاسما به منظور افزایش نرخ

مواد شیمیایی واکنش پیش ماده استفاده می‌شود. فرآیند PECVD اجازه می‌دهد تا رسوب در دماهای پایین تر، که اغلب در ساخت نیمه هادی‌ها ضروری است، به کار برده می‌شود.

CVD لایه اتمی^{۱۷}: رسوبات لایه‌های پی در پی از مواد مختلف جهت تولید لایه، فیلم بلوری می

باشد.

CVD احتراقی^{۱۸}: رسوب دهی شیمیایی بخار با احتراق و یا تجزیه در اثر حرارت شعله، روش مبتنی

بر اتمسفر باز^{۱۹} برای رسوب فیلم نازک نانوساختار با کیفیت بالا است.

CVD آلی فلزی^{۲۰}: از این روش برای پیش ماده‌های آلی فلزی استفاده می‌شود.

CVD گرمایی سریع^{۲۱}: این فرایند CVD از لامپ‌های گرمایشی و یا روش‌های دیگر برای سرعت

گرم کردن سطح بستر استفاده می‌شود. گرمایش تنها بستر به جای گاز یا اتاق دیوار می‌تواند سبب کاهش واکنش‌های فاز گاز ناخواسته شود که می‌تواند به شکل‌گیری ذرات کمک کند.

^{۱۵} Microwave Plasma-assisted CVD, MPCVD

^{۱۶} Plasma-Enhanced CVD, PECVD

^{۱۷} Atomic-layer CVD, ALCVD

^{۱۸} Combustion Chemical Vapor Deposition, CCVD

^{۱۹} open-atmosphere

^{۲۰} Metal Organic CVD, MOCVD

^{۲۱} Rapid Thermal CVD, RTCVD

CVD آغاز شده با فوتون^{۲۲}: در این فرایند از نور UV برای تحریک واکنش های شیمیایی استفاده می شود. این روش شبیه به فرآیند پلاسما است، با توجه به اینکه پلاسما تشعشع قوی از اشعه UV می باشد.

۴-۱۰ انواع روش های CVD براساس فشار

در تکنولوژی CVD عبارت "درجه حرارت بالا" به ۸۰۰ درجه سانتی گراد اشاره دارد. و دمای پایین ممکن است به کمتر از ۴۰۰ درجه سانتی گراد برسد. دمای بسیار پایین ممکن است به دمای اتاق اشاره کند. در اکثر ابزارهای CVD، همه دیواره های محفظه در دمای پایین نسبت به سیلیکون نگهداری می شوند (یعنی دمای محیط). فقط سیلیکون حرارت می بیند، زیرا واکنش فقط در سیلیکون انجام می شود و نه در دیواره ها.

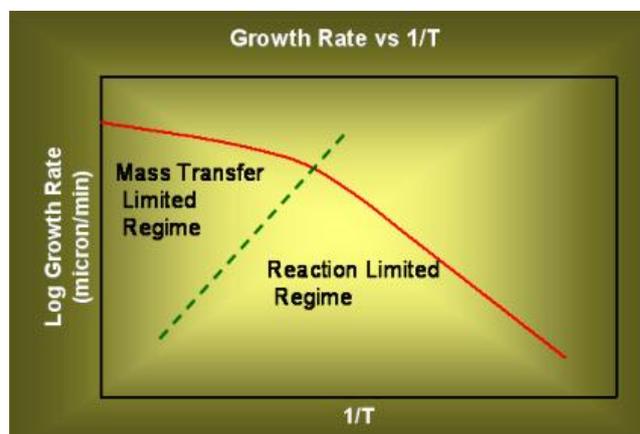
CVD در فشار اتمسفری^{۲۳}: در فشار محیط کار می کنند. یک روش CVD دیگری وجود دارد که در فشار عادی انجام می شود که CVD در فشار اتمسفر یا APCVD نامیده می شود. در این جا درجه حرارت نسبتا بالاتر است. (۵۰۰ تا ۸۰۰ درجه). در این روش یک سیم ضخیم به سرعت می تواند تشکیل شود. این روش فقط در چند مورد انتخاب شده استفاده می شود. کنترل انتقال جرم در مقابل کنترل واکنش: مراحل زیر در طول CVD رخ می دهد. ابتدا مولکول های واکنش دهنده به لایه مرزی سطح گاز-جامد نفوذ می کند. سپس جذب فیزیکی سطح می شوند. در مرحله سوم روی سطح نفوذ می کنند. در چهارمین مرحله با همدیگر واکنش می دهند و محصولات جامد تشکیل می شود. هر گونه محصولات جانبی گازی ممکن است که روی سطح جذب شود. پس آنها بیرون می روند و به طرف خارج بخار گاز نفوذ می کنند و به بیرون حمل می شوند.

هنگامی که درجه حرارت بالا استفاده می شود، سرعت واکنش خیلی بالا می رود و سرعت نفوذ واکنش گر ها از میان لایه های مرزی بالا می رود. پس سرعت رشد فیلم بالاتر می رود. از سوی دیگر هنگامی که

^{۲۲} Photon Initiated VD, PICVD

^{۲۳} Atmospheric Pressure CVD, APCVD

درجه حرارت پایین تر است، سرعت انتقال جرم کمی کاهش می یابد. اما سرعت واکنش به میزان زیادی کاهش می یابد و میزان واکنش سطح به سرعت رشد می کند. نمودار رشد فیلم در مقابل معکوس دما به صورت زیر است.



شکل ۲۵: یک طرح کیفی سرعت رشد (در مقیاس تناوبی) در مقابل معکوس دما.

APCVD معمولاً در درجه حرارت بالا عمل می کند، یعنی سرعت رشد فیلم تحت کنترل نفوذ یا انتقال جرم است.

CVD در فشار پایین^{۲۴}: در فشار کمتر از اتمسفر کار می کند. فشار نسبت به کاهش واکنش های

ناخواسته گازی جهت یکسان سازی در هنگام رسوب دهی کاهش می یابد. LPCVD معمولاً در دماهای نسبتاً کم عمل می کند و سرعت واکنش کنترل می شود. ما متوجه شدیم که گاهی اوقات درجه حرارت باید بین ۱۵۰ تا ۱۰۰۰ باشد. برای دماهای پایین می توان از هیترهای معمولی استفاده کرد. برای درجه حرارت بالا از لامپ های حرارتی استفاده می کنند. این لامپ ها، برای کنترل دما، قابلیت start و stop دارند. این موضوع به نوبه خود منجر به کنترل خوب فرایند رسوب می شوند.

^{۲۴} Low-Pressure CVD, LPCVD

CVD در خلا بسیار بالا^{۲۵} : در فشار های بسیار پایین به طور معمول تا پایین تر از ۶-۱۰ پاسکال

کار می کند.

این اواخر، گازهای آلی حاوی اتم های فلزی یا یون ها در CVD استفاده می شود این موارد به عنوان CVD های آلی فلزی یا MO-CVD معروف هستند.

بر اساس یک فرایندی که شبیه به CVD است. ممکن است فیلم هایی با مواد مشخص تولید شود با دقتا ضخامت یک اتم! که ترسیب لایه اتمی یا ALD نامیده می شود. ALD را می توان به عنوان یک تکنیک CVD با کنترل دقیق جریان شناخت.

۴-۱۱ نتیجه گیری

رسوب شیمیایی بخار، فرایندی است که در آن ترکیبات فرار یک ماده گاز های دیگر برای تولید و رسوب دادن یک جامد غیر فرار به طور اتمی بر روی یک زیر لایه مناسب به کار گرفته می شوند. امروزه فرایند های CVD برای تولید لایه های نازک و پوشش ها، کاربرد های زیادی در ساخت وسایل مختلف دارند. برای رسوب دادن با عایق بندی و لایه های منفعل (برای جلوگیری از خوردگی الکترو شیمیایی) که محرک توسعه روش های فرایند CVD است، به لایه های تک محور با کیفیت بالا نیاز است.

۵ مقایسه بین CVD و PVD

CVD فرایندی است که نیروی پرتاب بالایی دارد و رسوب گذاری در آن بر خلاف روش های پراکنشی، تبخیری و دیگر فرآیندهای PVD که رسوب گذاری در آن ها به صورت جهت دار صورت می

^{۲۵} Ultrahigh Vacuum CVD, UHVCVD

پذیرد، جهت دار نمی باشد. بنابراین می تواند برای پوشش دادن شکل های پیچیده و رسوب لایه های با تطبیق پذیری عالی به کار برده شود. گودی های عمیق، سوراخ ها، و دیگر شکل های سه بعدی پیچیده معمولا با استفاده از روش CVD به راحتی می تواند پوشش داده شود و این ویژگی فرآیند CVD باعث برتری آن نسبت به PVD می باشد.

CVD در مقایسه با PVD دارای پیچیدگی بیشتری می باشد و برای بدست آوردن شرایط رشد مناسب نیازمند تست های زیادی می باشد. واکنش های شیمیایی به طور کلی شامل گونه های گازی مختلف و تولید شماری از گونه های واسطه می باشد. همچنین این روش دارای گام های پیایی برای رسوب دهی می باشد.

CVD در مقایسه با PVD نیازی به خلا بالا ندارد و دستگاه به راحتی می تواند با شرایط محیطی سازگار گردد که این انعطاف پذیری از مزایای بسیار خوب این روش می باشد.

۶ CVD و ترسیب الکتروشیمیایی و پوشش اسپین

برای تولید لایه Al_2O_3 (آلومینا) یک واکنش بین بخار آب و TMA (تری متیل آلومینیوم) اتفاق می افتد.

واکنش کلی:

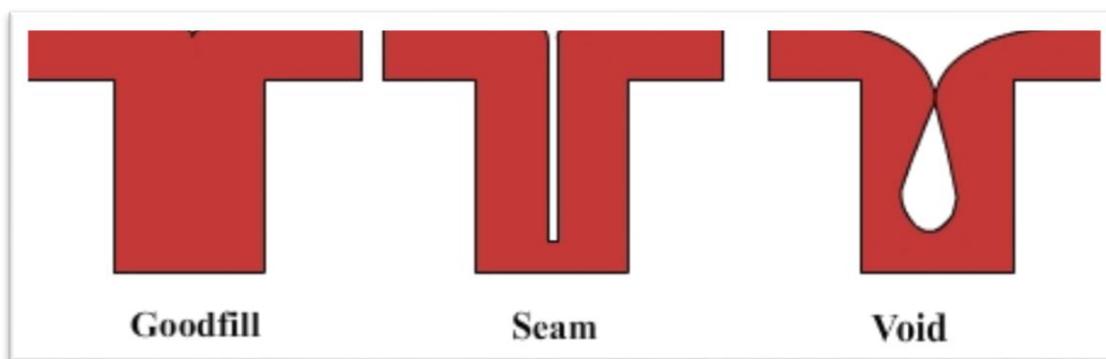


اگر هر دو واکنش دهنده به محفظه حاوی سیلیکون وارد شوند، لایه آلومینا بر روی سیلیکون شکل می گیرد، اما ضخامت کنترل آسان نخواهد بود. با این حال در ALD ابتدا تنها بخار آب به محفظه فرستاده می شود و یک لایه ای از آب بر روی سیلیکون قرار می گیرد. سپس محفظه تخلیه می شود و تمام بخار آب موجود به جز مولکول های جذب شده، برداشته می شود. سپس، یک پالس (شوگ) از TMA (ماده) در محفظه قرار داده می شود. در حال حاضر TMA با مولکول های آب موجود در سیلیکون واکنش داده می شود

و دقیقاً یک لایه آلومینا تولید می‌کند. محفظه دوباره تخلیه شده و بخار آب و TMP به ترتیب فرستاده می‌شوند تا تعداد دقیق لایه‌های آلومینا را تولید کنند. در حال حاضر ALD برای تولید اکسید در تراشه‌های پیشرفته استفاده می‌شود. ALD کنترل لازم را برای لایه‌های نازک فراهم می‌کند. واکنش بین تترادی‌متیل آمیدو هافنیوم (ساختار داده شده در زیر) و آب یا اوزون باعث تولید اکسید هافنیوم می‌شود.

۷ ECD یا روش الکتروشیمیایی

مس به عنوان مواد اتصالی در قطعات IC استفاده می‌شود. مس می‌تواند با روش‌های PVD و CVD ترسیب شود. با این حال، مسی که توسط روش ECD ترسیب می‌شود دارای مقاومت کمتر و ویژگی‌های پرکنندگی بهتری است. اصل ECD بسیار ساده است. حتی می‌توان در خانه آن را انجام داد. شما می‌توانید دو باتری معمولی بگیرید و یکی را در بالای دیگری قرار دهید و ۳ ولت ولتاژ اعمال کنید. (۲ تا ۱٫۵ ولتی) دو صفحه فلزی (مثل تیغه) باید به قطب مثبت و منفی توسط سیم وصل شوند. در یک لیوان شیشه‌ای، باید از آب و سولفات مس استفاده شود. اگر صفحات فلزی درون محلول غوطه‌ور شوند، بدون تماس با یکدیگر و سپس به باتری متصل شوند، مس بر روی فلز متصل به قطب منفی قرار می‌گیرد و اکسیژن در فلز دیگر تجمع می‌یابد. با استفاده از همین امیر طلا یا نقره نیز بر روی زیورآلات ارزان قیمت پوشیده می‌شوند. ما باید به یاد داشته باشیم که سیلیکون یک نیمه هادی است و باید رسوبات الکتروشیمیایی را هدایت کند. بنابراین یک لایه نازک از مس بر روی سیلیکون با استفاده از روش‌های PVD و CVD اول گذاشته می‌شود. (به نام لایه دانه‌ای)، سپس سیلیکون در مخزن حاوی سولفات مس نگهداری می‌شود. و با اتصالات به قطب‌ها، مس روی سیلیکون قرار می‌گیرد. اگر ما از شمش مس به عنوان آند استفاده کنیم، مس حل خواهد شد و محلول حاوی مس خواهد بود. با کنترل دمای حمام و اعمال ولتاژ، ضخامت رسوب مس را می‌توان کنترل کرد. به غیر از سولفات مس، چندین ماده شیمیایی دیگر به حمام اضافه می‌شود که باعث کیفیت خوب سطح می‌شود.



شکل ۲۶: مثالی از ترسیب با کیفیت ضعیف و خوب

بعضی از مواد شیمیایی بزرگ آلی به نام ماکرومولکولها به حمام اضافه می‌شود تا سطح مقعر به دست آید. این مواد در سطح و در داخل حفره جمع می‌شوند. بعضی مواد شیمیایی به نام شتاب دهند ه نیز به حمام الکتروشیمیایی اضافه می‌شود تا میزان رسوب را بهبود بخشد.

در حالی که PVD یا CVD را می‌توان برای پوشش دادن مس بر روی سیلیکون استفاده کرد، فقط برای پوشش لایه دانه‌ای استفاده می‌شود. چون مس با کیفیت بهتر توسط رسوب الکتروشیمیایی به دست می‌آید. مهاجرت الکتریکی تمایل ماده برای حرکت با جریان الکتریکی است. اگر مهاجرت الکتریکی زیاد شود، سیم به زودی از بین می‌رود و از این رو مناسب نیست. اگر مقاومت الکترومغناطیسی زیاد شود، ماده مناسب است. بنابراین مواد اتصال دهنده باید مهاجرت الکتریکی پایین و مقاومت الکترومغناطیسی بالایی داشته باشند. اگر سایز دانه‌بندی بزرگ باشد، مقاومت الکترومغناطیس بزرگتر می‌شود. از آنجایی که رسوب الکتروشیمیایی مس دارای اندازه دانه بزرگ و مقاومت الکتریکی کم و مقاومت الکتریکی بالا را می‌دهد. این روش در صنایع نیمه هادی برای رسوب مس استفاده می‌شود.

۸ اسپین در پوشش

اساس: این روش برای ترسیب مواد آلی استفاده می‌شود. در ابتدا ماده‌ی مورد نظر، در یک حلال مانند استون یا اتانول حل می‌شود. سپس سیلیکون بر روی یک بستر نگه‌داری می‌شود و با سرعت حدود ۵۰۰ دور

در دقیقه می چرخد. در حالی که سیلیکون می چرخد، محلول بر روی سیلیکون ریخته می شود. به علت چرخش محلول پخش می شود. سپس سیلیکون با سرعت بالاتر چرخانده می شود (حدود ۵۰۰۰ دور بر دقیقه). این ضخامت رسوب را کنترل می کند. اگر سیلیکون حرارت هم داده شود، حلال تبخیر خواهد شد و مواد در بالای ورقه به شکل یک فیلم قرار می گیرند. به صورت سنتی دی اکسید سیلیکون به عنوان عایق بین سیم های مسی استفاده می شود. به تازگی برخی از مواد به نام مواد با K پایین که دارای کمترین عدد دی الکتریک هستند به عنوان عایق بین سیم های مسی استفاده می شوند. برخی از نمونه های مواد با K کم عبارت اند از: PTFE: پلی تترا فلورو اتیلن یا تفلون، بنزوسیلیکو بوتن و پلی آمید (ساختار داده شده در زیر) این باعث می شود که تراشه سریع عمل کند و از دست دادن جریان الکتریکی کاهش می یابد. روش SPIN ON برای ترسیب مواد با K کم استفاده می شود.

در ادامه رابطه روش های PVD و CVD با پوشش های نانو کامپوزیت مطرح شده است.

۹ بررسی فیلم های نازکی از نانو کامپوزیت ها و پوشش های رسوب داده

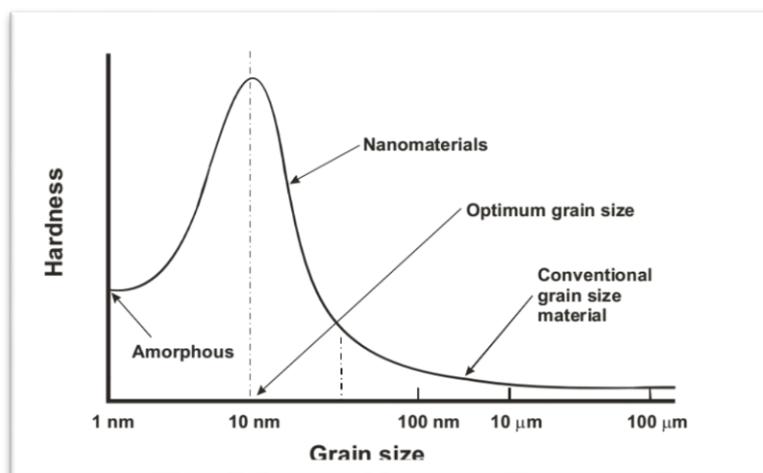
شده توسط روش های PVD و CVD

به طور معمول تصور می شود که مواد نانو کریستال از دانه ها کریستال ها، لایه ها، به عنوان مثال از اندازه های حدود ۱۰۰ نانومتر (معمولا کمتر از ۵۰ نانومتر است، اغلب کمتر از ۱۰ نانومتر، در مورد نانو کامپوزیت ها فوق العاده سخت، و ...) حداقل در یک جهت استفاده می شود. تعریف فوق بر اساس اندازه عناصر ساختاری است. که باید فقط به عنوان یک ارزش نظری دیده شود و اهمیت فیزیکی نداشته باشد. فیلم ها و پوشش های نازک به منظور بهبود ویژگی های سطح توسط مواد ساختاری بالک (توده محلول) به کار گرفته می شوند. بهبود ویژگی سطح شامل، مقاومت به خوردگی، مقاومت در برابر سایش، سختی، اصطحکاک، رنگ مورد نیاز مثل طلائی، سیاه یا برنج است. مسائل تحقیقاتی در زمینه تولید پوشش ها یکی از مهمترین اهداف توسعه مهندسی سطح است که پوشش های با خواص بالا و مقاوم در برابر سایش است. ابزارهای جدید شناخته شده توسط پوشش های تک لایه ای، چند لایه ای یا پوشش متغیر یا گرادینانی با استفاده از روش های

در حالی که در حین انتخاب مواد پوشش، ما با یک سری موانع ناشی از این واقعیت که از یک پوشش ایده‌آل غیر ممکن است خواص متعدد را به طور همزمان دریافت کرد. استفاده از پوشش‌های نانو ساختار به عنوان راه حل این مساله دیده می‌شود. نانو ساختارها و به طور ویژه نانوکامپوزیت‌ها توسط رسوب بخار شیمیایی رسوب داده می‌شوند. این موارد با توجه به خواص فیزیکی و شیمیایی منحصر به فرد مورد توجه قرار می‌گیرند. این خواص منحصر به فرد شامل؛ سختی بسیار بالا، مقاوم در برابر خوردگی، مقاومت بسیار عالی به اسید با درجه حرارت بسیار بالا، همچنین مقاومت به سایش و مقاومت فرسایشی است. این بررسی آنقدری جامع نیست که تمام جنبه‌های پوشش را شامل شود، اما هدف اصلی این است که یک حس عمومی از آنچه تاکنون انجام شده و قرار است انجام شود، ارائه دهیم.

۹-۱ سنتز فیلم‌های نانوکامپوزیت و پوشش‌ها

در مواد فله معمولی، اندازه ذرات خالص شده، بیانگر میزان سختی است. همین مساله برای فیلم یا پوشش نانو کامپوزیت درست است. جستجوی مواد پوشش با سختی بالا، بالاتر از سختی پوشش‌های پلی کریستال سنتی است. مواد بنیادی با ویژگی‌های ساختاری منحصر به فرد نانومتری وجود دارد. با کاهش اندازه دانه‌بندی، تکثیر و تحرک کم می‌شود و سختی مواد با توجه به رابطه hall-petch افزایش می‌یابد. این اثر به ویژه برای اندازه دانه تا ۱۰ نانومتر برجسته است. با این حال هنگامی که اندازه دانه کمتر از ۱۰ نانومتر باشد، تاثیر کمی دارد. یک مقدار بحرانی از اندازه دانه وجود دارد که در آن می‌توان حداکثر سختی را به دست آورد. (شکل ۲۷)



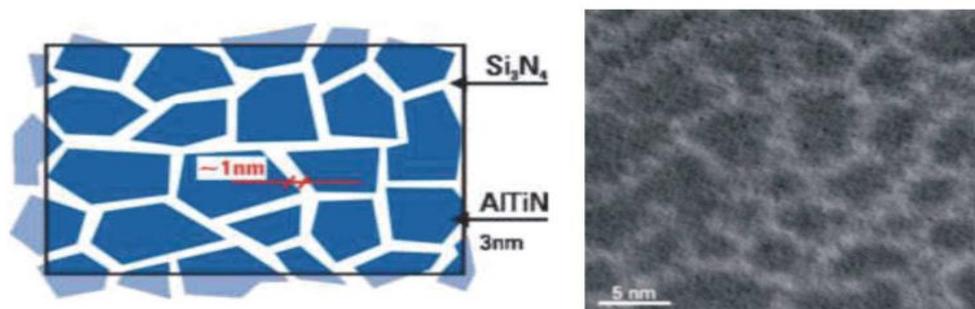
شکل ۲۷: نمودار سختی مواد به اندازه دانه

با توجه به معادله ، خواص استحکام مواد با کاهش سایز دانه افزایش می‌یابد. در مورد پوشش‌هایی که توسط فرایندهای PVD و CVD پوشیده شده است، ساختارهایی با سایز دانه‌بندی ۱۰ نانومتر، با حداکثر ویژگی‌های مکانیکی به دست می‌آید. پوشش‌هایی از این ساختار با سختی بسیار بالا (بیشتر از ۴۰ گیگا پاسکال)، انعطاف‌پذیری، پایداری در دماهای بالا و ... را نشان می‌دهد.

رابطه شناخته شده بین سختی و مقاومت به سایش، اساس برای توسعه مواد سخت و سخت تر شد. پیشرفت در زمینه تولید پوشش توسط تکنیک‌های pvd یا cvd امکان تولید پوشش‌های ساختار نانو کریستال را فراهم می‌کند که دارای خواص مکانیکی بالا و قابل استفاده است. پوشش‌های چنین ساختاری قادر به حفظ ضریب اصطحکاک کم (پوشش‌های خود روان کننده) در محیط‌های متعدد، حفظ سختی بالا و افزایش مقاومت است. مفهوم اصلی برای دستیابی به سختی بالای پوشش‌های نانو کامپوزیت و ویژگی‌های مکانیکی خوب و استحکام بالا مربوط به آن، به ویژه در مورد نانو کامپوزیت‌ها، حرکت و جابه جایی را محدود می‌کند. سختی بالا و مقاومت پوشش‌های نانو کامپوزیتی به دلیل این واقعیت است که جابه جایی و حرکت در دانه‌های کوچک و در فضاها بین آن‌ها سرکوب می‌شود. که موجب ظهور تغییر شکل‌های غیر واقعی می‌شود. هنگامی که اندازه دانه‌بندی در حد نانومتر کاهش می‌یابد، جابه جایی کلا محدود می‌شود. این نوع

پوشش‌ها همچنین با تعداد زیادی از مرزهای دانه‌ای با یک انتقال کریستال آمورف در بین ماتریس دانه‌ها، محدود سازی و توسعه ترک‌ها، همچنین مکانیسم مقاومت در برابر ترک خوردگی پوشش هر نانو کامپوزیت را توضیح می‌دهد. به طور همزمان شکل دانه‌ها، مرز بین دانه‌ها، انرژی پایین سطح و حضور فاز مرزی غیر فعال تسهیل لغزش در امتداد مرز، باعث افزایش خاصیت پلاستیک پوشش‌های نانوکامپوزیتی می‌شود....

بر اساس مدل ارائه شده توسط وپرک^{۲۶} و ریپرچ^{۲۷} پوشش نانو کامپوزیت حداقل شامل دو فاز، یک فاز نانو کریستال و یک فاز ماتریس است. در این طرح دانه‌های نانو کریستال باید در اندازه ۳ تا ۱۰ نانومتر باشد و توسط ۱ تا ۲ میلی‌متر از یک فاز آمورف جدا می‌شوند. (شکل ۲۸)



شکل ۲۸: مدل و عکس TME از ساختار نانو کامپوزیت

۲-۹ نتیجه گیری

فیلم‌ها و پوشش‌های نازک کامپوزیتی که دارای دانه‌بندی نانو کریستالی از نیتريد انتقال فلز یا کاربرد انتقال فلز در یک فاز آمورف جاسازی می‌شوند. تا به امروز چندین پوشش سخت بر پایه نانوکامپوزیت‌ها به طور موفقیت آمیزی برای برنامه‌های مهندسی انجام و تجاری سازی شده است. بسیاری از برنامه‌های کاربردی برای آینده از فیلم‌ها و پوشش‌ها وجود دارد. بهبود بیشتر پوشش‌های موجود و توسعه نانوکامپوزیت‌ها، تکنولوژی را به سوی افق‌های جدیدی سوق می‌دهد. تکنیک‌های متعددی مخصوصاً PVD و CVD در حال حاضر برای قرار دادن فیلم‌های نانوکامپوزیت در انواع مختلف در دسترس است. علی‌رغم تعداد زیادی تحقیق علمی در زمینه فیلم و پوشش‌های نازک نانوکامپوزیت با نتایج منتشر شده، هنوز کمبود و فقدان دانش مواد مختلف در این زمینه وجود دارد.

^{۲۶} Veprek

^{۲۷} Reiprech

منابع

[1]. H O. Pierson, “handbook of chemical vapor deposition (CVD) principles, technology, and applications”, 2th Ed, noyes publications Park Ridge, New Jersey, U.S.A, (2001).

[2]. K. L. Choy, “Chemical vapour deposition of coatings”, *Materials Science* 48 (2003) 57–170

[3]. Y. Xu; X. T. Yan, “Chemical Vapor Deposition, an Integrated Engineering Design for Advanced Materials” Springer, (2008).

[4]. C.A. Dorval Dion; J.R. Tavares, “Photo-Initiated Chemical Vapour Deposition as a Scalable Particle Functionalization Technology (A Practical Review)”. *Powder Technology*, 239 (2013) 484–49.

[5]. K. K. S. Lau; J. A. Caulfield; Karen K. Gleason, “Structure and Morphology of Fluorocarbon Films Grown by Hot Filament Chemical Vapor Deposition” *Chem. Mater.*, 12 (2000) 3032–3037.

[6]. J.Singh and D.E.Wolfe, Review article Nano and macro-structursed component fabrication by electron beam physical vapour deposition (EB-PVD)

[7]. K. Lukaszowicz, Review of Nanocomposite Thin Films and Coatings Deposited by PVD and CVD Technology

[8]. A. MOARREFZADEH, Simulation and Modeling of Physical Vapor Deposition (PVD) Process

[9]. Y.C.; Browne, T.; Heckerman, B. & Meletis, E.I. *Surface and Coatings Technology*, vol 204, (April 2010), pp. 2123-2129, ISSN 0257-8972.(2010).

[10]. K. Lukaszowicz, *Silesian University of Technology Poland* .341.(2011)

[11]. nptel.ac.in

[12]. edu.nano.ir