

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه الزهراء
دانشگاه الزهراء (س)

دانشکده علوم پایه

پایان نامه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد
رشته‌ی فیزیک نظری

عنوان

ساخت نانولایه‌های کربن شبه‌الماسی با
ناخالصی نیکل به روش RF-PECVD

استاد راهنما

دکتر عزیزاله شفیعی خانی

استاد مشاور

دکتر محمدعلی وساقی

دانشجو

نیلوفر تابنده ساروی

مهر ۱۳۸۸

تقدیم به همسر م به پاس همه‌ی
صبوری‌هایش

قدردانی و تشکر

در ابتدا لازم می‌دانم از راهنمایی‌های استاد ارجمندم، جناب آقای دکتر شفیع‌خانی، تشکر و قدردانی بسیار بنمایم. انجام این تحقیق بدون حمایت‌های دلسوزانه و ارزشمند ایشان میسر نبود.

از جناب آقای دکتر وساقی که به‌عنوان استاد مشاور مرا راهنمایی نمودند نیز، کمال تشکر را دارم. سرکار خانم دکتر قدس‌الهی و جناب آقای احمدی در پژوهش‌گاه دانش‌های بنیادی (IPM)، مساعدت‌های بسیاری برای پیشبرد این پروژه انجام داده‌اند که شایان تقدیر و تشکر است.

هم‌چنین، از سرکار خانم قاراپتیان که در مراحل انجام این پروژه از همکاری و هم‌فکری ایشان بهره‌مند شده‌ام، سپاس‌گزاری می‌کنم.

و در پایان تشکر قلبی و خالصانه‌ی خود را نسبت به پدر و مادر بزرگوارم ابراز می‌دارم. زیرا اگر به موفقیتی نائل شده‌ام، مرهون تلاش و تشویق آن‌ها به علم‌آموزی است.

چکیده

نانولایه‌های کربن شبه‌الماسی به دلیل داشتن خواص منحصر به فردی که به خواص الماس طبیعی نزدیک است، کاربردهای عملی فراوانی یافته‌اند. خواصی مانند سختی مکانیکی بالا، شفافیت اپتیکی و عدم خوردگی [۲].

این لایه‌ها به عنوان پوشش‌های محافظتی به طور گسترده در صنایع خودروسازی و پزشکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از خصوصیات مهم DLC، مقاومت الکتریکی بالای این لایه‌ها است. در برخی کاربردهای الکتریکی، لایه‌هایی با رسانندگی الکتریکی بالاتر مورد نیاز است. افزودن ناخالصی‌های فلزی در هنگام ساخت لایه، تا حد زیادی خاصیت الکتریکی را بهبود می‌بخشد.

در این تحقیق لایه‌های DLC به روش RF-PECVD ساخته شده‌اند. در طی مراحل لایه‌نشانی هدف نیکلی برای انجام فرایند کندوپاش درون محفظه‌ی خلأ به عنوان الکتروود بالایی به کار گرفته شد. در هنگام برخورد یون‌های پلاسما ییدروکربور با هدف، ذرات نیکل از سطح جدا شده و به همراه کربن و هیدروژن بر روی سطح زیرلایه انباشت شده‌اند.

با تغییر فشار اولیه‌ی گاز استیلن و زمان انباشت، نمونه‌های مختلفی ساخته شده‌اند. سایر عوامل مانند توان منبع RF، فاصله‌ی الکتروودها و جنس زیرلایه در همه‌ی نمونه‌ها ثابت نگه‌داشته شده بودند. پس از طی مراحل ساخت، برای مشخصه‌یابی آنالیزهای متفاوتی بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. آنالیزهای مورد استفاده X-ray mapping، WDX، SEM، AFM و XRD بودند.

برای بررسی اثر افزودن ناخالصی نیکل بر رسانش الکتریکی لایه‌ها، سنجش مقاومت در بازه‌ی گسترده‌ای از دما (200°C تا 400°C) بر روی نمونه‌ها انجام گرفت.

مد رسانش برای نمونه‌هایی با مقاومت الکتریکی بالا، رسانش از طریق تونل‌زنی بین جزایر فلزی تعیین شده است و لایه‌های به دست آمده با درصد بالای نیکل رسانش الکتریکی مطلوبی از خود نشان دادند که برآزش داده‌های تجربی با نظریه‌ی پرکولاسیون هم‌خوانی مناسبی داشت.

فهرست

چکیده	۵
۱ لایه‌های نازک، کربن، نیکل	
۱.۱ لایه‌های نازک	۱
۱.۱.۱ زیرلایه	۱
۲.۱.۱ نقص در لایه نازک	۳
۳.۱.۱ مکانیزم رشد لایه	۴
مُد‌های رشد	۵
۴.۱.۱ عوامل موثر بر رشد لایه‌های نازک	۶
پخش سطحی قبل از تعادل گرمایی	۷
پخش سطحی پس از تعادل گرمایی	۷
اثر تعداد ذرات گسیل شده از منبع در واحد زمان	۸
تأثیر سرعت ذرات فرودی	۹
اثر دمای زیرلایه	۹

۱۰	.....	کربن و انواع آن	۲.۱
۱۱	.....	الماس	۱.۲.۱
۱۲	.....	خواص اپتیکی	
۱۲	.....	خواص فیزیکی	
۱۲	.....	خواص شیمیایی	
۱۲	.....	خواص الکتریکی	
۱۳	.....	گرافیت	۲.۲.۱
۱۴	.....	نانو لایه‌های کربنی	۳.۲.۱
۱۶	.....	خواص لایه‌های کربنی	
۱۸	.....	نیکل	۳.۱
۱۹	.....	خواص شیمیایی نیکل	
۱۹	.....	خواص فیزیکی نیکل	
۱۹	.....	مشخصات ساختاری نیکل	

۲ نظریه‌های رسانش الکتریکی

۲۰	.....	مفاهیم اولیه	۱.۲
۲۱	.....	رسانایی الکتریکی در مواد توده‌ای	۲.۲
۲۵	.....	رسانش در لایه‌های نازک	۳.۲
۲۵	.....	مفاهیم اولیه	۱.۳.۲
۲۶	.....	رسانش در لایه‌های نازک پیوسته	۴.۲

۲۶	مدل کلاسیکی تامسون	۱.۴.۲
۲۷	مدل (Fuchs and Sondhimer) F.S.	۲.۴.۲
۲۹	مدل لایه‌ای	۳.۴.۲
۳۰	اثر ناهمواری سطح	۴.۴.۲
۳۲	مدل (Mayadas and Shatxkes) M.S.	۵.۴.۲
۳۳	پراکندگی ناشی از نوسانات شبکه (فونونیک)	۶.۴.۲
۳۵	پراکندگی الکترون‌ها توسط ناخالصی‌ها	۷.۴.۲
۳۶	پراکندگی ناشی از الکترون‌های دیگر	۸.۴.۲
۳۷	رسانایی در لایه‌های نازک ناپیوسته	۵.۲
۳۸	هدایت پرشی	۱.۵.۲
۳۹	پرکولاسیون	۲.۵.۲
۴۰	هدایت پرشی در نیم‌رساناها مبتنی بر پرکولاسیون	۳.۵.۲
۴۱	مکانیزم هدایت پرشی	۴.۵.۲
۴۲	رژیم‌های رسانش در نانوکامپوزیت‌های کربنی	۶.۲

۳ تکنیک خلاء و روش‌های لایه‌نشانی

۴۳	خلاء و پمپ‌های خلاء	۱.۳
۴۳	خلاء	۱.۱.۳
۴۴	پمپ‌های خلاء	۲.۱.۳
۴۵	پمپ روغنی گردشی	

۴۶	پمپ روغنی انتشاری
۴۷	۳.۱.۳ سنجش خلاء
۴۸	۲.۳ روش‌های لایه‌نشانی
۴۹	۱.۲.۳ لایه‌نشانی فیزیکی بخار
۵۰	۲.۲.۳ لایه‌نشانی به‌روش کندوپاش (Sputtering)
۵۲	کندوپاش با امواج رادیویی (RF)
۵۳	۳.۲.۳ لایه‌نشانی شیمیایی بخار
۵۴	مزایای استفاده از لایه‌نشانی شیمیایی بخار:
۵۵	معایب استفاده از لایه‌نشانی شیمیایی بخار:
۵۷	۳.۳ معرفی دستگاه RF-PECVD

۴ روش‌های آنالیز و آماده‌سازی نمونه‌ها

۶۲	۱.۴ XRD (پراش سنجی پرتوی ایکس)
۶۶	۲.۴ WDX (آنالیز تفکیک طول موج)
۶۷	۳.۴ X-ray mapping (نقشه‌ی نقطه‌ای پرتو ایکس)
۶۸	۴.۴ SEM (میکروسکوپ الکترونی روبشی)
۷۰	۱.۴.۴ آشکارسازهای الکترون
۷۱	۵.۴ XPS (طیف‌سنجی فوتوالکترون پرتوی ایکس)
۷۴	۶.۴ AFM (میکروسکوپ نیروی اتمی)
۷۶	مدهای تصویرسازی AFM

۷۷	آماده‌سازی و ساخت نمونه‌ها
۸۰	مقاومت‌سنجی در لایه‌های نازک
۸۳	بررسی رفتار مقاومت الکتریکی نمونه‌ها با تغییرات دمایی

۵ بحث و نتیجه‌گیری

۸۵	مقدمه
۸۷	بررسی نمودار انباشت
۸۹	بررسی آنالیز XRD
۹۱	بررسی آنالیز WDX و X-ray mapping
۹۳	بررسی آنالیز AFM
۹۶	بررسی آنالیز SEM
۹۸	بررسی مقاومت الکتریکی
۱۰۷	مراجع و منابع

فصل اول

لایه‌های نازک، کربن، نیکل

۱.۱ لایه‌های نازک

لایه‌های نازک به موادی گفته می‌شود که به صورت پوشش بر روی سطح ماده‌ی دیگری قرار می‌گیرند و خواص الکترونیکی، فیزیکی یا مکانیکی متفاوتی از ماده‌ی تشکیل‌دهنده‌ی لایه و سطح انباشت بروز می‌دهند [۱]. ضخامت این لایه‌ها نسبت به سطح آن‌ها بسیار کم است و ساختار فیزیکی ویژه‌ی آن‌ها مستقیماً به فرایند رشد بستگی دارد.

۱.۱.۱ زیرلایه

برای نگه‌داشتن لایه‌هایی چنین کم ضخامت، به تکیه‌گاهی نیاز داریم که این لایه‌ها بر روی آن قرار گیرند. این زیرلایه‌ها بر روی خواص مختلف لایه تاثیر می‌گذارند. بنابراین زیرلایه‌ی مناسب برای کاربردهای مختلف متفاوت خواهد بود و انتخاب درست زیرلایه برای دستیابی به خصوصیات موردنظر

از اهمیت بالایی برخوردار است [۳].

زیرلایه‌ی ایده‌آل، نگه‌دارنده‌ی لایه است و تنها چسبندگی سطحی کمی با آن دارد. پستی و بلندی‌های سطح زیرلایه، سبب ناهمگونی لایه خواهد شد. بنابراین میزان زبری سطح زیرلایه عامل مهمی در ساختار ریزابعاد لایه است. عامل دیگری که باید موردتوجه قرار گیرد، تمیزی سطح زیرلایه می‌باشد. زیرا هرگونه آلودگی در محیط خلأ پخش می‌شود و موجب بالا رفتن فشار محفظه‌ی خلأ می‌گردد. آلودگی سطح زیرلایه موجب کاهش قابلیت حرکت دانه‌های کوچکی می‌شود که در لایه‌های بزرگ‌تر تشکیل می‌شوند. بنابراین آهنک پیوستن دانه‌ها به یکدیگر کم‌تر شده و اندازه‌ی متوسط دانه‌ها کاهش می‌یابد. هرگونه آلودگی و ناخالصی در سطح زیرلایه باعث نقص در رشد و ایجاد ناهمگونی در لایه خواهد شد. ناخالصی‌ها نه تنها انرژی پیوندی لایه و زیرلایه را تغییر می‌دهند، بلکه گاهی سبب تشکیل هسته‌های ثانویه خواهند شد که در مکانیزم رشد به آن می‌پردازیم [۳].

روش‌های گوناگونی برای تمیزکردن سطح زیرلایه‌ها وجود دارد. ساده‌ترین روش، شستشو با آب خالص غیریونیده یا الکل است. زیرلایه‌ی موردنظر را در آب یا الکل غوطه‌ور می‌سازند و پس از بیرون آوردن، با دستمال استاندارد خشک می‌کنند. این اولین مرحله برای زدودن آلودگی‌های سطح زیرلایه است. معمولاً برای تمیز کردن آلودگی‌هایی که چسبندگی بیشتری دارند (مانند چربی‌ها)، از امواج مافوق صوت استفاده می‌شود. دستگاه محفظه‌ای از فولاد ضدزنگ دارد که با آب پر می‌شود. زیرلایه به همراه کمی مایع تمیزکننده در ظرفی قرار می‌گیرد. سپس ظرف را درون دستگاه التراسونیک می‌گذاریم. این دستگاه با ارتعاشات مکانیکی بر انرژی بستگی ذرات آلوده‌گی غلبه کرده و سطح را تمیز می‌کند. تکنیک‌های دیگری مانند تمیز کردن در خلأ، پاکسازی با حرارت و تمیز کردن سطوح با استفاده از تابش فرابنفش نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند که این روش‌ها به علت محدودیت‌هایی که در به‌کارگیری آن‌ها وجود دارد، تنها برای موارد خاصی مورد استفاده می‌شود [۲].

موارد کلی که باید در انتخاب زیرلایه مورد توجه قرار گیرد عبارت است از [۳]:

(۱) زیرلایه باید از هرگونه آلودگی و ناخالصی عاری باشد.

۲) دارای صرفه اقتصادی و در دسترس باشد.

۳) پایداری شیمیایی و گرمایی خوبی داشته باشد و از استحکام مکانیکی بالایی نیز برخوردار باشد.

۴) برای هرچه کم کردن تنش در لایه، زیرلایه‌ای با ضریب انبساط گرمایی نزدیک به لایه انتخاب شود.

۵) ساختار بلوری و ثابت شبکه لایه و زیرلایه با هم سازگار باشد.

۶) سطوح صاف و بدون خلل و فرج موجب تشکیل لایه‌هایی با خواص بهتر خواهند شد.

۲.۱.۱ نقص در لایه نازک

هرگونه انحراف از آرایش منظم اتم‌ها در بلور، نقص^۱ نامیده می‌شود. حتی سطح یک بلور با توجه به توقف سریع تناوب منظم شبکه، نقص محسوب می‌شود [۲].

دو نوع نقص غیرقابل اجتناب در بلورهای واقعی وجود دارد که عبارت‌اند از:

۱) فونون: ارتعاش اتم‌ها حول نقطه تعادل در شبکه، فونون نامیده می‌شود. فونون‌ها در حرکت الکترون‌ها درون بلور اختلال ایجاد می‌کنند. و نظم شبکه را برهم می‌زنند. با بالا رفتن دما فونون‌های شبکه نیز افزایش می‌یابند.

۲) ناخالصی‌های شیمیایی: هرگونه نقص شبکه‌ای و عدم استوکیومتری، در این رده قرار می‌گیرد که شامل موارد زیر می‌باشد:

(a) نواقص نقطه‌ای: جایگزینی اتم شبکه با اتم ناخالصی (Substitution)، نهی جا (Vacancy) و تغییر جایگاه یک اتم (Antisite).

(b) نواقص خطی: دررفتگی (Dislocation)

(c) نواقص سطحی: سطح بلور، مرز دانه‌ها (Grain Boundary)، عیب روی هم چینی

(Stacking Fault) و خط‌بندی رشد (Growth Striation)

^۱ Defect

(d) نواقص حجمی: وجود مواد خارجی در بلور (Inclusion)، رسوبات (Precipitate) و

خوشه‌های نقص نقطه‌ای (Cluster)

بسیاری از این نواقص بر روی خواص مختلف لایه تاثیرگذار هستند. برای مثال تهی جاها که یکی از انواع نقص‌های نقطه‌ای هستند در حضور میدان الکتریکی اعمال شده، رسانش الکتریکی را تغییر می‌دهند. هم‌چنین با افزودن ناخالصی‌ها به یک بلور می‌توان خواص اپتیکی و الکتریکی کاملاً متفاوتی از بلور اولیه ایجاد کرد.

با توجه به کاربردهای متفاوت بلورها، این نواقص تاثیرات مثبت یا منفی بر روی ویژگی‌های مطلوب خواهند داشت. از این رو کنترل مناسب آن‌ها در فرایند ساخت لایه بسیار حائز اهمیت است.

۳.۱.۱ مکانیزم رشد لایه

برای ایجاد لایه، میان اتم‌ها و مولکول‌های ماده‌ی موردنظر و زیرلایه پیوند برقرار می‌شود. پیوندهای اولیه نطفه نامیده می‌شوند. با گذشت زمان تعداد نطفه‌ها بیشتر شده و با به هم پیوستن نطفه‌ها جوانه ایجاد می‌شود. جوانه‌ها در کنار هم جمع شده و تشکیل خوشه می‌دهند که پس از بزرگ شدن، جوانه‌های پایداری را می‌سازند. این جوانه‌ها با توجه به عوامل متعددی شروع به رشد در دو یا سه بعد می‌کنند. با تشکیل جوانه‌های پایدار نرخ ایجاد جوانه‌های جدید کم می‌شود و اتم‌ها و مولکول‌هایی که به سطح می‌رسند بیشتر جذب جوانه‌های قبلی می‌شوند و سبب رشد آن‌ها خواهند شد. با بزرگ شدن این جوانه‌ها سطح زیرلایه پوشیده می‌شود و جوانه‌های مجاور به هم می‌پیوندند و جزایری را بر روی سطح ایجاد می‌کنند. با ادامه یافتن فرایند رشد، لایه‌ای پیوسته بر روی سطح زیرلایه ایجاد می‌شود [۶].

توان به دام اندازی ذرات توسط جزایر سطح، از عوامل موثر در نرخ انباشت لایه به‌شمار می‌رود. به‌طور کلی لایه‌ها سه نوع رشد مختلف دارند که در زیر بررسی می‌شوند.

مُد های رشد

(۱) رشد جزیره‌ای: در این نوع رشد، اتم‌ها یا مولکول‌های تشکیل دهنده‌ی لایه پیوند قوی‌تری با یکدیگر دارند تا با سطح زیرلایه. نیروی جاذبه‌ی میان ذرات سطح از نیروی ذرات با زیرلایه بیشتر است، بنابراین جزایر کوچکی بر روی زیرلایه تشکیل می‌شوند و جزایر به صورت متراکم رشد می‌کنند. به همین دلیل این مُد رشد، جزیره‌ای گفته می‌شود. این وضعیت در رشد بسیاری از فلزات بر روی زیرلایه‌های عایق دیده می‌شود.

(۲) رشد لایه‌به‌لایه: در این نوع رشد، اتم‌ها و مولکول‌های فرودی با زیرلایه پیوند قوی‌تری دارند. بنابراین اولین ذرات بر روی سطح زیرلایه، تک لایه‌ای را تشکیل می‌دهند و ذرات بعدی، لایه‌ای با پیوندی سست‌تر بر روی آن می‌سازند. لایه‌هایی که با این روش انباشته می‌شوند، سطحی هموار و چسبندگی مناسبی با زیرلایه دارند. این سازوکار بیشتر در رشد نیمه‌هادی‌ها بر زیرلایه‌ی نیمه‌هادی و رشد فلزات بر فلزات دیده می‌شود.

(۳) رشد مختلط لایه‌به‌لایه و جزیره‌ای: این مد از رشد لایه‌ها، تلفیقی از دو روش بالا است. بدین ترتیب که پس از تشکیل تک لایه‌ی اولیه و یا مقداری از آن، رشد لایه‌ی بعدی آغاز می‌شود. هر عاملی که سبب کاهش یکنواختی و تغییر در انرژی پیوندی مناسب برای رشد لایه‌به‌لایه شود، می‌تواند این نوع از رشد را ایجاد کند. در این مُد، ابتدا رشد به صورت لایه‌به‌لایه آغاز می‌شود و سپس هسته‌ها در سه بعد شروع به رشد می‌کنند. در لایه‌هایی که ساختار شبکه‌ای ناسازگاری با زیرلایه دارند، این مُد مشاهده می‌شود.

راه دیگری برای تعیین نوع رشد لایه‌ها، استفاده از رابطه‌ی زیر می‌باشد:

$$\gamma_B = \gamma^+ + \gamma_A \cos \phi$$

که در این جا، γ_B کشش سطحی زیرلایه و γ_A کشش سطحی لایه‌ی رشد داده شده و γ^+ کشش سطحی فصل مشترک لایه و زیرلایه است.

اگر $\gamma_B < \gamma_A + \gamma^+$ و یا به عبارت دیگر $\phi > 0$ ، رشد به صورت جزیره‌ای خواهد بود.

اگر $\gamma_B = \gamma_A + \gamma^+$ و یا $\phi = 0$ ، رشد لایه‌به‌لایه اتفاق می‌افتد [۴].

و در وضعیتی غیر از حالات بالا نوع سوم رشد اتفاق می‌افتد که حالتی میانی است. و در واقع هیچ‌کدام از نیروهای کشش سطحی به اندازه‌ی کافی قوی نیست تا مُد مخصوص به خود را پدید آورد.

۴.۱.۱ عوامل موثر بر رشد لایه‌های نازک

سه عامل مهمی که بر رشد لایه تاثیر می‌گذارد، عبارت است از:

(۱) اثر سایه‌افکنی^۲:

در بسیاری از روش‌های لایه‌نشانی، آهنگ انباشت برای تمامی سطح یکسان است و انتظار می‌رود که لایه‌ی به دست آمده سطحی یکنواخت داشته باشد. اما در مواردی که سطح زیر لایه دارای پستی بلندی‌هایی باشد، پدیده‌ای به نام سایه‌افکنی رخ می‌دهد. به این صورت که در مقیاس ریزابعاد، قله‌ها رشد سریع‌تری نسبت به دره‌ها دارند و پستی بلندی‌های زیرلایه با همان ساختار در سطح لایه نیز پدید می‌آید، منتها با شدت بیشتر. در روش‌هایی مانند کندوپاش (Sputtering) که ذرات در همه جهات به زیرلایه می‌رسند، این پدیده مشهودتر است. در حالت کلی انحنا‌ی سطح در تعداد اتم‌ها و یا مولکول‌هایی که به سطح می‌رسند، موثر است. زاویه‌ی فضایی درون حفره‌ها کوچک‌تر از زاویه‌ی فضایی قله‌های سطح می‌باشد. بنابراین سطح قله‌ها در معرض برخورد با تعداد بیشتری از ذرات قرار دارد. هم‌چنین حفره‌هایی که دهانه‌ی آن‌ها کوچک‌تر از قطر ذرات فرودی باشد، فضاهایی خالی به وجود خواهند آورد. این پدیده در دماهای پایین و به خصوص در هنگامی که زاویه انباشت مایل باشد، به خوبی قابل رویت است.

سایه‌افکنی به دلیل ایجاد لایه‌های ناهمگن، تغییرات زیادی در ویژگی‌های لایه‌ی مورد نظر پدید

^۲ Shadowing Effect

می آورد، از جمله در ساختار بلوری، خواص اپتیکی و هدایت الکتریکی لایه. برای اجتناب از بروز این اثر و داشتن لایه‌ای یکنواخت، استفاده از زیرلایه‌هایی کاملاً صاف پیشنهاد می‌شود [۲].

۲) پخش سطحی:

در بسیاری از موارد اتم‌ها یا مولکول‌هایی که به زیرلایه می‌رسند، مقداری انرژی با خود حمل می‌کنند و حتی ممکن است از زیرلایه مقداری انرژی گرمایی دریافت کنند. در این صورت ذرات بر روی سطح شروع به حرکت می‌کنند. این حرکت تا بازتبخیر ذره و یا پوشیده شدن با ذرات بعدی ادامه می‌یابد. این پدیده پخش سطحی خوانده می‌شود.

پخش سطحی قبل از تعادل گرمایی

ذراتی که به سطح می‌رسند در مدت کوتاهی (حدود چند نانوثانیه) انرژی خود را از دست می‌دهند و با سطح لایه به تعادل گرمایی می‌رسند. اما پیش از آن پخش سطحی اتفاق می‌افتد تا ذره انرژی خود را از دست بدهد. در هنگامی که اتم‌ها به طور عمود با سطح برخورد می‌کنند، احتمال پخش سطحی در همه‌ی جهت‌ها یکسان است. اما برای ذراتی که به طور مایل به سطح می‌رسند، پخش بیشتر در جهت تصویر باریکه فرودی بر روی سطح انجام می‌شود تا بقای اندازه حرکت مماسی برقرار شود.

پخش سطحی پس از تعادل گرمایی

ذره فرودی پس از تعادل گرمایی با سطح، هم‌چنان به حرکت ادامه می‌دهد. زیرا از هرسو با سایر اتم‌ها یا مولکول‌های سطح که در حال ارتعاش هستند، برخورد می‌کند. این ضربه‌های تصادفی، انرژی ذره را لحظه به لحظه تغییر می‌دهد و اگر ذره در زیرلایه‌های بالایی دفن نشود، از سطح فرار خواهد کرد.

مشاهدات تجربی نشان می‌دهند که ذرات در طی مراحل هسته‌بندی به سمت اتم‌هایی از نوع

خودشان تمایل بیشتری دارند. بنابراین پیوند فلز- فلز قوی‌تر از پیوندهایی از نوع فلز با شیشه یا سیلیکون است. باتوجه به این مطلب، جنس زیرلایه و خود ذرات در کاهش و افزایش پخش سطحی اهمیت دارند.

با بالا بردن دمای زیرلایه، پخش سطحی افزایش می‌یابد. حرکت ذرات بر روی سطح سبب یکنواخت شدن سطح لایه می‌شود و لایه‌ها منظم‌تر انباشته خواهند شد. این پدیده برخلاف اثر سایه‌افکنی که فضاهای خالی در سطح ایجاد می‌کند، سبب ایجاد لایه‌هایی چگال‌تر و یکنواخت‌تر می‌شود [۲].

۳) آهنگ انباشت:

سرعت رشد لایه بدون در نظر گرفتن بازتبخیر و دفع ذرات، آهنگ انباشت خوانده می‌شود. آهنگ انباشت به تعداد ذراتی که در واحد زمان به واحد سطح می‌رسند، بستگی دارد. عوامل بسیاری بر آهنگ انباشت اثر می‌گذارند که برخی از آن‌ها در این جا مورد بررسی قرار می‌گیرند:

اثر تعداد ذرات گسیل شده از منبع در واحد زمان

اگر سطح چشمه را مانند چاه پتانسیل در نظر بگیریم، با افزایش دما انرژی جنبشی ذرات بیشتر می‌شود. این عامل سبب می‌شود تا اتم‌ها راحت‌تر از چاه فرار کنند. بنابراین با افزایش دمای چشمه تعداد ذرات گسیل شده از چشمه افزایش می‌یابد و ذرات بیشتری به سطح می‌رسند آهنگ انباشت افزایش می‌یابد. اگر ذره انباشته شده توسط ذرات بالایی دفن نشود، ممکن است بازتبخیر رخ دهد. هرچه تعداد ذراتی که در واحد زمان به واحد سطح می‌رسند بیشتر باشد، ذرات پخش سطحی کم‌تری دارند و به دلیل پوشیده شدن توسط ذرات فرودی احتمال بازتبخیر نیز کاهش می‌یابد.

تأثیر سرعت ذرات فرودی

در روش‌هایی که انباشت در فشار پایین انجام می‌شود، فاصله‌ی آزاد میانگین به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد و احتمال می‌رود که اتم‌های فرودی بدون هیچ برخوردی به سطح لایه برسند. یعنی اتم‌ها با سرعتی که چشمه را ترک می‌کنند، به سطح می‌رسند. در این حالت ذرات باید کمینه‌ی انرژی که انرژی فرار (E_e) نامیده می‌شود را داشته باشند تا از چشمه خارج شوند. حداقل سرعت ذرات خروجی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E_e = \frac{1}{2}mv_e^2$$

m جرم ذره، E_e انرژی فرار و v_e سرعت فرار است.

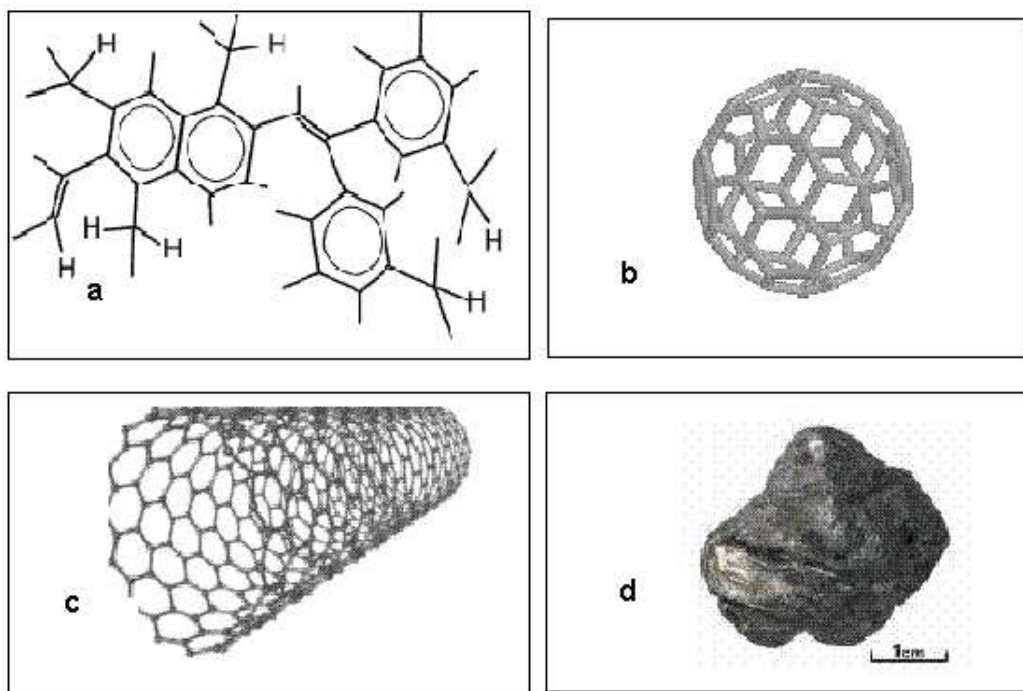
بنابراین تنها اتم‌هایی می‌توانند از چشمه خارج شوند که انرژی آن‌ها از انرژی فرار بیشتر باشد ($E \geq E_e$). با بررسی تجربی طیف انرژی ذرات خارج شونده از چشمه می‌بینیم که انرژی بیشتر آن‌ها در حد سرعت فرار است و با دمای چشمه تغییر محسوسی نمی‌کند. اگر ذرات در هنگام برخورد به لایه سرعت بالایی داشته باشند، امکان دفع بیشتر شده و روی نرخ انباشت اثر منفی می‌گذارد [۲].

اثر دمای زیرلایه

هرچه دمای زیرلایه بیشتر باشد، انرژی سطحی افزایش می‌یابد و ذرات فرودی انرژی بیشتری برای پدیده‌ی پخش سطحی پیدا می‌کنند. این عامل سبب می‌شود که ذرات جابه‌جایی بیشتری داشته باشند و فاز بلوری لایه تقویت شود.

۲.۱ کربن و انواع آن

کربن یکی از فراوان‌ترین عناصر سطح زمین و عامل مهم تشکیل‌دهنده‌ی مواد آلی است. این عنصر با عدد اتمی ۶ و وزن اتمی ۱۲/۰۱۱ در گروه چهارم جدول تناوبی عناصر قرار دارد. اتم کربن به دلیل ساختار پیوندی خاص و شعاع اتمی کوچک خود، ترکیبات بی‌شماری با سایر اتم‌های کربن و یا با اتم‌های عناصر دیگر می‌سازد. در نتیجه ترکیباتی به وجود می‌آورد که می‌توانند بسیار بی‌نظم و یا کاملاً کریستالی باشند [۷]. علت پیوندهای متفاوت کربن، ساختار الکترونی $1s^2 2s^2 2p^2$ آن است که چهار الکترون والانس دارد و می‌تواند هیبریداسیون‌های sp^3 و sp^2 ، sp داشته باشد.



شکل ۱-۱ الف: نانولایه‌ی کربنی - ب: فولرن - ج: نانولوله‌ی کربنی - د: گرافیت

صورت‌های مختلفی از کربن مانند الماس، گرافیت، فولرن‌ها، کربن بی‌ریخت و ... در طبیعت وجود دارند و ساختارهای جدیدی مانند نانولوله‌ها و لایه‌های نازک کربنی نیز امروزه مورد توجه قرار گرفته‌اند. یکی از مهم‌ترین دسته‌ی ترکیبات کربنی هیدروکربن‌ها هستند که با وجود پیشرفت‌های بسیار در زمینه‌ی تامین انرژی، هنوز منبع عمده‌ی سوخت به‌شمار می‌روند.