

فهرست

۱ **بالا به پائین**

۱ لیتوگرافی

۲ روشهای لیتوگرافی مستقیم (بدون ماسک)

۳ روشهای لیتوگرافی غیر مستقیم (مبتنی بر ماسک)

۳ فرآوری مکانیکی

۴ تغییر شکل دهی پلاستیکی شدید

۴ اختلاط شدید

۴ فشردن سازی پودر

۴ آسیابهای پرانرژی

۵ فرآوری حرارتی

۵ روش زینتر

۵ روش آنیلینگ (متبلورسازی مواد آمورف)

۵ ریسندگی

۶ ریسندگی الکتریکی

۶ ریسندگی مذاب

۶ **پایین به بالا**

۶ رسوب دهی فاز گاز

۷ رسوب دهی شیمیایی بخار (CVD)

۹ رسوب تبخیری

- فوتولیز و پیرولیز لیزری ۱۱
- سنتز بر پایه آئروسول ۱۱
- سنتز سیال فوق بحرانی ۱۲
- رسوبدهی از فاز مایع ۱۳
- الکترو رسوب دهی ۱۳
- مایسل معکوس ۱۴
- پلیمریزاسیون میکروامولسیون ۱۵
- سل ژل ۱۵
- الگوبرداری از نانو ساختارها ۱۶
- خودآرایی در محلول ۱۶
- قوس الکتریکی (پلاσμα) ۱۸
- کامپوزیت کردن نانو ساختارها ۱۸
- تقلید از طبیعت** ۱۸
- مطالعه نانو ساختارهای طبیعی ۱۸
- نانو ساختارهای مصنوعی الهام گرفته از طبیعت ۱۸
- استفاده از نانو ساختارهای طبیعی در نانو قطعات ۱۸
- نانو محاسبات** ۱۹
- روشهای نیمه تجربی ارییتال مولکولی ۱۹
- روش های همبسته ۲۰
- روش هاتری فک ۲۰
- مکانیک مولکولی ۲۰

۲۱.....تعیین سطوح انرژی پتانسیل

۲۱.....اندازه گیری طیفهای ارتعاشی

چکیده

برای ساخت انواع عناصر پایه رویکردهای بالا به پایین ، پایین به بالا، نانومحاسبات و تقلید از طبیعت روش‌های متنوعی را ارائه می‌دهند.

با استفاده از روشهای بالا به پایین از اجسام میکروسکوپی، اجسامی در ابعاد نانو بدست می‌آید. این روشها شامل انواع فرایندهای حرارتی، مکانیکی و لیتوگرافی می‌باشند. در روشهای پایین به بالا با انجام فرایندهای مختلف بر روی اتم‌ها و مولکولها نانوساختارها حاصل می‌شوند. روشهای شیمیایی و فیزیکی در فازهای گازی و مایع در رویکرد پایین به بالا از تنوع بالایی برخوردار است. در رویکرد نانومحاسبات انواع روشهای تئوری برای ساخت نانوساختارهای پایدار مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد و در رویکرد تقلید از طبیعت سعی شده است انواع روش‌هایی که باعث ایجاد نانوساختارهای صبیعی می‌گردد بررسی می‌شود.

بالا به پائین

در رویکرد بالا به پایین برای تولید محصول، یک ماده توده‌ای را شکل‌دهی و اصلاح می‌کنند. در حقیقت در این روش، یک ماده بزرگ را بر می‌داریم و با کاهش ابعاد و شکل‌دهی آن، به یک محصول با ابعاد نانو می‌رسیم. به عبارت دیگر، اگر اندازه یک ماده توده‌ای را به طور متناوب کاهش دهیم تا به یک ماده با ابعاد نانومتری برسیم، از رویکرد بالا به پایین استفاده کرده‌ایم. این کار اغلب و نه همیشه شامل حذف بعضی از مواد به شکل ضایعات است، مانند ماشین‌کاری یک بخش فلزی از یک موتور یا نانو ساختاری کردن فلزات به طریق تغییر شکل دهی^۱ (که شامل ضایعات نیست). در اغلب نوشتجات حدفاصل مقیاس کار رویکرد تولید پایین به بالا و بالا به پایین، نانو فناوری خوانده می‌شود.

لیتوگرافی

لیتوگرافی یک نوع چاپ صفحه‌ای است. در روش لیتوگرافی نوری، ماده حساس به نور (حائل نوری)^۲ در معرض نور قرار می‌گیرد و با استفاده از یک ماسک، الگوی مورد نظر روی سطح ماده ایجاد می‌شود. در این فرایند سطح ماده دچار تغییر فیزیکی می‌شود. این روش در ساخت سیستم‌های میکروالکترومکانیکی کاربرد دارد. در لیتوگرافی میکرو ماشین‌کاری ماده مقاوم نوری در معرض نور (با طول موج مشخص) قرار گرفته و باعث اختلاف شدید حلالیت در قسمت‌هایی که در معرض نور قرار گرفته‌اند، نسبت به قسمت‌هایی که به آنها نور تابانده نشده است، می‌گردد. در این فرایند دو حالت مقاومت مثبت و مقاومت منفی به وجود می‌آید. در مقاومت مثبت قطعه‌ای که در معرض اشعه نور قرار گرفته است خورده می‌شود و در حالت مقاومت منفی بر عکس می‌باشد، یعنی قطعه‌ای که در معرض نور قرار گرفته باقی می‌ماند و بقیه قسمت‌ها خورده می‌شوند. ترکیبات حساس به نور معمولاً از نوع مواد آلی هستند.

هر چند، روش‌های زیادی برای به وجود آوردن سطوح با ابعاد خیلی کوچک ابداع شده است، ولی اغلب از روش لیتوگرافی و بکارگیری ماسک، سطوح مذکور بوجود می‌آیند.

فرآیند لیتوگرافی برای تولید مدارات مجتمع فعلی کاربرد دارد. البته این فناوری به حدود نهایی خود نزدیک می‌شود و این یکی از دلایل عمده‌ای به شمار می‌رود که محرک تحقیق روی راهکارهای دیگر برای ساخت قطعات الکترونیکی شده است.

¹ Deformation
² Photoresist

روشهای لیتوگرافی مستقیم (بدون ماسک)

در لیتوگرافی مستقیم (بدون ماسک) عامل محرک به طور مستقیم به سطح می‌تابد و نیازی به ماسک نیست. دقت این روش به تمرکز و شعاع باریکه اشعه و یا ذره محرک وابسته است.

لیتوگرافی پروب پیمایشی

در روش‌های لیتوگرافی پروب پیمایشی از یک سوزن برای به وجود آوردن یک اثر روی سطح استفاده می‌شود، این فرآیند به دو صورت لیتوگرافی با قلم غوطه‌ور و لیتوگرافی با قلم معمولی صورت می‌گیرد.

در لیتوگرافی با قلم معمولی، از روش AFM استفاده می‌کنند. در این حالت با استفاده از نیروی مکانیکی روی سطح طراحی الگو صورت می‌گیرد.

در لیتوگرافی با قلم غوطه‌ور، موادی که بایستی توسط آنها الگوی مورد نظر طراحی شود، از طریق سوزن روی سطح انتقال می‌یابد و با هدایت حرکات سوزن، الگو تشکیل می‌گردد.

لیتوگرافی نرم

لیتوگرافی نرم مجموعه‌ای از روشهای مبتنی بر اشکال نانو ساختاری به عنوان قالب است. سه راهکار عمده آن عبارتند از:

- ۱- مهرزنی^۳: از فشار برای ایجاد نقش یک قالب روی یک سطح استفاده می‌شود.
- ۲- جوهرزنی^۴: قالب با یک "جوهر" پوشانده می‌شود و سپس با اعمال قالب بر یک سطح به آن منتقل می‌شود. به این روش چاپ میکرو تماسی^۵ نیز گفته می‌شود.
- ۳- موئینگی: قالب روی سطح قرار گرفته و یک پلیمر مایع در اثر پدیده موئینگی در آن جریان می‌یابد. بدین ترتیب الگوهای قالب به صورت خطوط برجسته‌ای بر روی سطح ایجاد می‌شود. این روش اغلب قالب‌گیری میکرو تزریقی در لوله‌های موئین (MIMIC)^۶ خوانده می‌شود.

مقیاس لیتوگرافی نرم به راحتی تا نانومقیاس پایین می‌آید. بسته به فناوری مورد استفاده، درجه وضوح را می‌توان تا زیر ۱۰ نانومتر پایین آورد. نانو ساختارهای مقیاس مولکولی پیشتر بدین وسیله در آزمایشگاه ساخته شده‌اند. این روشها همچنین نویدبخش قابلیتی در ساخت قطعات نوری است که شاید روزی در محاسبات نوری

³ Stamping

⁴ Inking

⁵ Microcontact Printing

⁶ MicroInjection Molding In Capillaries

استفاده شوند. با این حال به عنوان جایگزین لیتوگرافی مرسوم، مانع عمده‌ای برای خلق قطعات الکترونیکی وجود دارد که این روش برای تولید ساختارهای به دقت چیده شده و چندلایه مرسوم در میکروالکترونیک خیلی مناسب نیست، هرچند محققین برای غلبه بر این محدودیت در حال کار می‌باشند.

لیتوگرافی نرم قبلاً برای ساخت سیستم‌های میکروسیالاتی - مانند سیستم‌های آزمایشگاه روی تراشه - به کار رفته است و موانع اندکی در مقابل توسعه آن به سیستم‌های نانوسیالاتی قرار دارد. از این روش در آزمایشگاه برای ساخت اجزای نوری همچون توری‌های پراش^۷، راهنماهای موجی^۸ و لیزرها، و همچنین اشکال پیچیده ساختاری از جمله سیم‌پیچ‌های رسانای سه‌بعدی و ساختارهای بافته سبکی استفاده شده است.

عرصه ویژه‌ای که لیتوگرافی نرم موجب امیدواری زیادی شده است، خلق نانوساختارها با مواد نرم همچون الاستومرها می‌باشد. تلفیق این مواد با لیتوگرافی نرم قابلیت ویژه‌ای را در نانوسیالات موجب می‌شود.

اتصالات الکتریکی موجود در سیستم‌های الکتریکی، تشدیدکننده‌های مکانیکی و سیستم‌های فوق‌العاده کوچک نیز در آزمایشگاه بدین وسیله ساخته شده‌اند.

نکته‌ای که در بررسی پتانسیل تجاری لیتوگرافی نرم بسیار مهم است، این است که قالبها را می‌توان بارها استفاده کرد و لذا در تولید انبوه از نظر اقتصادی کاملاً به صرفه می‌باشند. قالب‌های اولیه را می‌توان با روشهای گران‌قیمتی همچون لیتوگرافی پرتو الکترونی با دقتی در حد چند نانومتر ساخت.

روشهای لیتوگرافی غیر مستقیم (مبتنی بر ماسک)

اساس لیتوگرافی غیرمستقیم استفاده از یک ماسک جهت به دست آوردن یک الگو روی یک سطح است. با قرار دادن یک ماسک در مسیر عامل محرک (امواج الکترومغناطیس، الکترون، یون و...) الگویی روی سطح حاصل می‌شود. در این فرایند ماسک برهمکنش موثری با عامل محرک ندارد.

فراوری مکانیکی

فراوری مکانیکی یک روش مرسوم و مثال واضحی از رویکرد بالا به پایین در سنتز مواد نانوساختار است که برخلاف روش پایین به بالا، مواد از خوشه‌های اتمی اولیه تشکیل نشده و تنها از طریق خردشدن و تغییر شکل پلاستیکی شدید تهیه می‌شوند. به دلیل سهولت و تجهیزات نسبتاً ارزان قیمت (در مقیاس آزمایشگاهی) و قابلیت سنتز اکثر مواد، این روش کاربرد فراوانی یافته است. در عین حال می‌توان این روش را به سادگی برای تولید در مقیاس صنعتی به کار گرفت. عمده محدودیت‌های این روش، آلودگی ناشی از محیط و اتمسفر آسیاب،

⁷ Diffraction Gratings

⁸ Wave Guide

و نیز متراکم شدن و تجمع ذرات در حین آسیاب است.

تغییر شکل دهی پلاستیکی شدید

تغییر شکل پلاستیکی شدید^۹ از روش‌های پیشگام برای تولید مواد نانوبلوری توده‌ای است. محدودیت این روش وجود مشکلات مربوط به کنترل آلودگی و اکسیداسیون بالای سطح مؤثر ذرات اولیه می‌باشد، اما این مزیت را دارد که با ترکیب ذرات مختلف می‌تواند نانو کامپوزیت‌ها را به وجود آورد.

روش‌های تغییر شکل پلاستیکی شدید تنها برای فلزات قابل کاربرد می‌باشند. در تمامی این روش‌ها بلورهای داخل فلزات تحت فشار زیاد و در معرض تنش برشی بالا قرار می‌گیرند و این کار موجب کاهش اندازه بلور فلزات تا ۲۰ نانومتر می‌شود. کاهش اندازه بلور تقریباً در هر نوع فلز باعث افزایش چشمگیر استحکام، و در بسیاری مواد، افزایش چکش‌خواری می‌شود. به خاطر اینکه چنین روش‌هایی می‌توانند در مقیاس بزرگ اجرا شوند، بسیار بیشتر از سایر روش‌ها برای تجاری‌سازی مورد توجه هستند.

اختلاط شدید

اختلاط شدید یکی از روش‌های بالا به پایین است که برای تهیه نانوامولسیون‌های ناپایدار کاربرد دارد. دو فاز آلی و آبی که در حالت عادی غیر قابل امتزاج هستند، با اختلاط (همزدن) شدید با یکدیگر مخلوط شده و نانوامولسیون را حاصل می‌آورند، اندازه نانو ساختارهای حاصله به سرعت اختلاط و دمای محیط بستگی دارد.

فشرده سازی پودر

در روش فشرده‌سازی پودر ابتدا ذرات نانومقیاس تولید شده و سپس توسط روش‌های استاتیکی یا دینامیکی به هم فشرده می‌شوند. روش فشرده‌سازی پودر نیز به دلیل وجود مشکلات ناشی از کنترل آلودگی و اکسیداسیون سطح مؤثر ذرات دارای محدودیت می‌باشد.

آسیاب‌های پرانرژی

در این فرآیند معمولاً از آسیاب‌های ماهواره‌ای با انرژی بالا استفاده می‌شود. نانوذرات براساس تنش‌های برشی وارده بر ذرات، تولید و انرژی دستگانه از طریق گلوله‌های آسیاب به ذرات وارد می‌شود. میزان انرژی به سرعت لغزش، اندازه و تعداد گلوله‌ها، نسبت وزنی گلوله به پودر، زمان آسیاب و اتمسفر آسیاب بستگی دارد. به طور مثال بیان شده که انجام آسیاب در محیط مایعات سرمازا، سبب افزایش تردی پودر می‌شود. از سوی دیگر به خاطر جلوگیری از اکسید شدن ذرات حساس به اکسیداسیون باید تولید برخی مواد به خصوص مواد غیراکسیدی

⁹ Sereve Plastic Deformation Processing

در اتمسفر خاصی صورت پذیرد. در صورتی که انرژی به میزان کافی وجود داشته باشد، می‌توان کامپوزیت همگنی از اجزای مختلف را در ابعاد نانومتری تهیه کرد. براساس انرژی آسیاب و ترمودینامیک واکنش‌های رخ داده مواد به صورت بلوری یا آمورف و تک فاز یا چند فاز سنتز می‌شوند. در این روش برای خریدایش از مواد دارای سختی بالا مانند Al_2O_3 و ZrO_2 به عنوان گلوله استفاده می‌شود.

فرآوری حرارتی

روش زینتر

وقتی ذرات ماکروسکوپی در حالت‌های پودری یا سوسپانسیون برهمکنش مولکولی داشته باشند، می‌توانند با یکدیگر پیوند برقرار کرده و یک شبکه، یا یک تکه جامد را تشکیل دهند. این ترکیبات دانسیته و استحکام برشی متفاوتی نسبت به مواد اولیه دارند. سرعت پیوند شدن وابسته به انرژی سطحی و حرکات مواد برخوردکننده در سطح اتمی (سرعت نفوذ) می‌باشد. افزایش سرعت نفوذ با حرارت دادن ماده در دمای حدود نصف نقطه ذوب انجام می‌شود. این فرایند، روش زینتر نامیده می‌شود و در اتمسفرهای مختلف یا مایعات گوناگون انجام می‌شود.

روش آنیلینگ (متبلورسازی مواد آمورف)

آنیلینگ یک فرایند گرمایی است که طی آن ساختار مواد در ابعاد میکرو دگرگون می‌شود و خواصی نظیر سختی و استحکام تغییر می‌کنند. این روش چندین مرحله دارد که عبارتند از: بازیابی، تبلور مجدد و رشد ذرات اولیه.

در مرحله اول نقایص بلوری و تنش‌های داخلی از بین می‌رود و ماده حالت نرم (Soft) به خود می‌گیرد. مرحله دوم تبلور مجدد است که هسته‌های اولیه جایگزین بلورهای تغییرشکل یافته می‌شود. مرحله سوم، مرحله رشد ذرات تشکیل شده است و چنانچه طولانی شود ساختار زبر و خشن به وجود می‌آید و خواص مکانیکی افت می‌کنند.

در سیستم‌های نیمه‌هادی، ویفرهای سیلیکونی تحت فرایند آنیلینگ قرار می‌گیرند که طی آن اتم‌هایی مانند بور، فسفر و آرسنیک در شبکه بلوری قرار می‌گیرند و تغییرات کاملاً موثری بر خواص الکتریکی نیمه‌رساناها می‌گذارند.

ریسندگی

روش ریسندهی به دو زیر شاخه ریسندهی مذاب و ریسندهی الکتریکی^{۱۰} تقسیم می‌شود. در روش ریسندهی مذاب از عامل مکانیکی و در روش ریسندهی الکتریکی از عوامل الکتریکی و مکانیکی استفاده می‌کنند.

ریسندهی الکتریکی

ریسندهی الکتریکی روشی برای تولید الیاف پلیمری با قطر نانومتری است. این روش سالها شناخته شده بود و برخی از مصارف محدود را در فیلترها داشت، اما اکنون توجه جدیدی را به خود جلب کرده است. در این فناوری مایعات باردار شده به صورت جریانهای کوچکی به درون یک میدان الکتریکی کشیده شده، و سپس به صورت الیاف پلیمریزه می‌شوند. مواد دیگری مانند نانوذرات یا حتی نانولوله‌ها را می‌توان در این الیاف جای داد.

ریسندهی مذاب

در روش ریسندهی مذاب، پلیمر به شکل مذاب با ویسکوزیته بالا درآمده و داخل محفظه فلزی که رشته‌ساز نامیده می‌شود قرار می‌گیرد سپس با اعمال نیرو به سمت سوراخ‌های ریز انتهایی محفظه هدایت می‌شود. سوراخ‌های مذکور به طور معمول دایره‌ای بوده ولی ممکن است اشکال متفاوتی نیز داشته باشند. پلیمر مذاب از این منافذ خارج شده، خشک می‌شود و بوسیله دستگاه چرخنده بصورت الیاف جمع می‌گردد.

الیافی که از این روش به وجود می‌آیند قطری در حدود چند صد نانومتر دارند.

پایین به بالا

در روشهای پایین به بالا محصولی از مواد ساده‌تر به وجود می‌آید، مانند ساخت یک موتور از قطعات آن. در حقیقت کاری که در اینجا انجام می‌شود، کنار هم قرار دادن اتم‌ها و مولکول‌ها (که ابعاد کوچکتر از مقیاس نانو دارند) برای ساخت یک محصول نانومتری است. تصور کنید که قادریم اتم‌ها و مولکول‌ها را به طور واقعی ببینیم و آنها را به طور دلخواه کنار هم قرار دهیم تا شکل مورد نظر حاصل شود. معمولاً روش‌های پایین به بالا ضایعاتی ندارند، هر چند الزاماً این مسأله صادق نیست. مثلاً ممکن است جزئی از یک سیستم خودآرا برای فرآیند خودآرایی به کمک یک "هم‌جزء" نیاز داشته باشد که در محصول نهایی وجود نداشته و لذا از سیستم حذف می‌شود.

رسوب‌دهی فاز گاز

رسوب‌دهی فاز گاز به فرآیندی اطلاق می‌گردد که طی آن مواد در حالت بخار از طریق تراکم و

¹⁰ Electrospinning

واکنش شیمیایی به حالت جامد بر می‌گردند. این فرآیند برای پوشش‌دهی قطعات مختلف و رسیدن به خواص نوری، الکتریکی، گرمایی، مکانیکی و مقاومت خوردگی ماده به کار می‌رود. این روش همچنین برای تشکیل فیلم‌ها و الیافی که برای فیلتر کردن مواد کامپوزیت مصرف می‌شوند، کاربرد دارد. فرآیندهای رسوب‌دهی گازی به طور معمول در محفظه‌ی خلاء به دست می‌آید.

رسوب‌دهی شیمیایی و فیزیکی بخار از مهم‌ترین روش‌های رسوب‌دهی فاز گاز هستند.

رسوب‌دهی شیمیایی بخار (CVD)

رسوب‌دهی شیمیایی بخار یک فرآیند شیمیایی است که برای رسوب فیلم‌های نازک از مواد گوناگون مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در یک فرآیند CVD یک لایه از ماده در معرض یک یا چند ماده تبخیر شده قرار می‌گیرد، و طی آن مواد اولیه با لایه مذکور واکنش داده (و/یا) تجزیه شده، محصول رسوبی مورد نظر را به وجود می‌آورند. البته محصولات جانبی نیز به وجود می‌آیند که به وسیله گاز خارج می‌شوند.

رسوب‌دهی شیمیایی بخار به طور وسیع در تولید نیمه‌هادی‌ها (به عنوان یک بخش از فرآیند تولید نانو ساختارهای نیمه‌هادی) و برای رسوب فیلم‌های گوناگون نظیر سیلیکون‌های پلی کریستال، آمورف، اپی تکسیال، سیلیکون، ژرمانیوم، تنگستن، سیلیکون نیتريد، سیلیکون اکسی نیتريد و تیتانیم نیتريد استفاده می‌شود. فرآیند CVD برای تولید الماس سنتزی نیز کاربرد دارد.

رسوب‌دهی شیمیایی در فشار اتمسفری (APCVD)

APCVD یک روش رسوبی است که در آن واکنش در فشار اتمسفری انجام می‌شود. فشار اتمسفری باعث می‌گردد سرعت رسوب فیلم افزایش یابد و به حدود ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر بر دقیقه می‌رسد. در این فرآیند، بدلیل تراکم سریع مولکول‌های گازی، هسته‌زایی هم‌وزن صورت می‌گیرد و فیلم‌های تهیه شده از این روش اثرپذیری کمی از خود نشان می‌دهند. همچنین بدلیل داشتن تغییرات قابل اغماض محصول، این روش کاربرد زیادی در صنعت دارد.

رسوب‌دهی شیمیایی بخار لایه اتمی (ALCVD)

در فرآیند رسوب‌دهی شیمیایی بخار لایه اتمی، دو ماده اولیه (به عنوان مثال $Al(CH_3)_3$ و آب) به طور متناوب داخل محفظه واکنش وارد می‌شوند. یکی از این مواد در غیاب ماده دوم روی سطح یک ویفر جذب شده، و دچار تغییر شیمیایی نمی‌شود. جذب این ماده تا اشباع شدن سطح ادامه می‌یابد. سپس ماده دوم به محیط اضافه شده و واکنش انجام می‌پذیرد. ضخامت فیلم با مقدار ماده ورودی به محفظه واکنش کنترل

می‌گردد. در این روش امکان کنترل دقیق ضخامت فیلم و یک شکل بودن آنها وجود دارد.

رسوب دهی شیمیایی بخار در فشار پایین (LPCVD)

این فرآیند در فشار پایین تر از فشار اتمسفری انجام می‌شود. در فشارهای پایین، واکنش‌های فاز گازی ناخواسته کاهش یافته، باعث بهبود یکنواختی فیلم روی ویفر می‌گردد. روش دیگری که در خلاء انجام شده و کاربرد محدودتری دارد، رسوب دهی شیمیایی بخار با خلاء خیلی بالا (UHVCVD) است.

رسوب دهی شیمیایی بخار آلی فلزی (MOCVD)

در این فرآیند از مواد اولیه آلی فلزی نظیر تانتالیوم اتوکسید و تترادی‌متیل آمینوتیتانیوم (TDMAT) برای تولید روکش‌هایی از جنس اکسید تیتانیوم (TiO_2) و برای تهیه نیتريد تیتانیم (TiN) استفاده می‌شود. وقتی این روش تحت خلاء خیلی بالا قرار گیرد، MOMBE نامیده می‌شود.

رسوب دهی شیمیایی بخار پلاسمایی میکروویو (MPCVD)

در این روش ماده اولیه در پلاسمایی که از برهمکنش امواج مایکروویو و مخلوط گازی (معمولاً مخلوط گازهای CH_4 و H_2) ایجاد می‌شود، قرار می‌گیرد. این برهمکنش فرایند هسته‌زایی هتروژن را القا می‌کند. در مرحله بعد هسته‌های مذکور به یکدیگر چسبیده و فیلم یکنواختی را تشکیل می‌دهند. جهت‌گیری هسته‌های اولیه وابسته به جریان DC اعمال شده و تاثیرات پلاσμα می‌باشد.

مرفولوژی روکش‌های ایجاد شده از این روش به چندین پارامتر نظیر فشار، ترکیب گاز، و بستر سیلیکون و... بستگی دارد.

رسوب دهی شیمیایی بخار پلاسمایی (PECVD)

در این فرآیند از پلاσμα برای افزایش سرعت واکنش شیمیایی استفاده می‌شود. روش PECVD باعث می‌گردد رسوب در دمای پایین تشکیل شود که در تهیه نیمه‌هادی‌ها بدلیل به‌وجود آوردن محصول مناسب، از ضرورت بالایی برخوردار است.

CVD حاصل از پلاσμα را در دماهای پایین تری از CVD حرارتی می‌توان انجام داد؛ مثلاً می‌توان نانولوله‌های کربنی را بر روی شیشه سودآهکی¹¹ که در دیگر روش‌ها بدلیل استفاده از دمای بالا ذوب می‌شوند،

¹¹ Soda Lime Glass

رشد داد. این راهکار مخصوصاً برای تولید وسایل نمایشگر امیدوارکننده است.

یکی از مثال‌های این روش استفاده از پلاسمای مونوکسید کربن و هیدروکربن‌های مختلف برای ساخت نانولوله‌ها بر روی کاتالیست می‌باشد.

رسوب‌دهی شیمیایی بخار گرمایی سریع (RTCVD)

در روش‌های RTCVD، از لامپ‌های گرمایی و یا روش‌های دیگر برای گرما دادن سریع ویفر استفاده می‌شود. گرما دادن ویفر باعث می‌گردد واکنش در سطح ویفر انجام شده و از مقدار آن در فاز گازی کاسته می‌شود، در این حالت نانوذرات معلق کمتری تولید می‌گردد.

رسوب‌دهی شیمیایی بخار پلاسمایی دور (RPCVD)

این روش مشابه روش PECVD است و تنها تفاوت آن در موقعیت ویفر نسبت به پلاسمای ورودی است. توضیح اینکه ویفر به طور مستقیم در ناحیه تخلیه پلاسمای قرار نمی‌گیرد. خارج کردن ویفر از ناحیه پلاسمای باعث می‌گردد فرآیند در دمای اتاق انجام شود.

رسوب‌دهی شیمیایی بخار با خلأ خیلی بالا (UHVCVD)

در روش UHVCVD انواع ساختارهای نانوبلوری می‌توانند ایجاد می‌شوند. این روش برای تولید ویفرهای چندلایه‌ای و فیلم‌های اپیتکسیال با کیفیت بالا نظیر ژرمانیوم سیلیکون نیز کاربرد دارد.

رسوب‌دهی فیزیکی بخار (PVD)

PVD روشی است که در آن از عوامل فیزیکی برای رسوب فیلم‌های نازک مواد گوناگون بر روی سطوح مختلف (نظیر ویفرهای نیمه هادی) استفاده می‌شود.

این روش برای ساخت قطعاتی که شامل اجزاء نیمه‌هادی هستند کاربرد دارد. PVD روش‌های مختلفی دارد که عبارتند از: کاتدپرانی (اسپاترینگ)، سوخت اکسیژن با سرعت بالا (HVOF)، رسوب‌دهی لیزر پالسی و رسوب تبخیری.

رسوب تبخیری

در این روش با استفاده از گرما ماده ذوب شده و فشار بخار آن به سطح مناسبی می‌رسد. این فرآیند در خلأ انجام می‌شود تا بخار حاصله با مولکول‌های گاز موجود محفظه واکنش ندهد و در فیلم ایجاد شده ناخالصی مشاهده نگردد. مواد اولیه بعد از تبخیر روی سطح سرد رسوب کرده و فیلم نازکی را بوجود می‌آورند. در این

فرایند فقط موادی که فشار بخار بالا دارند بدون آلودگی در فیلم حاصله رسوب می‌کنند.

روش کاتدپرانی (اسپاترینگ)

کاتدپرانی یک روش فیزیکی است که در آن اتم‌های یک هدف جامد با استفاده از بمباران یون‌های پراثری به صورت گاز در آمده، به بیرون پرتاب می‌شوند. به دلیل برخورد یون‌ها به ماده، این فرآیند می‌تواند به بازی بیلارد تشبیه شود که یون اولیه (Cue Ball) به خوشه بزرگی از اتم‌های فشرده به هم (توپ‌های بیلارد) برخورد می‌کند. اولین برخورد باعث هل دادن اتم‌ها به داخل خوشه اتمی می‌گردد و برخوردهای متعاقب باعث می‌شود که اتم‌های سطح از یکدیگر دور شوند. به نسبت تعداد اتم‌های دور شده از سطح به یون اولیه بازده کاتدپرانی گفته می‌شود که مقدار آن در فرآیند اسپاترینگ مهم است. عوامل دیگر که بر بازده اسپاترینگ تأثیر می‌گذارند، عبارتند از انرژی یون اولیه، جرم یون و اتم‌های هدف و انرژی اولیه اتم‌ها در نمونه.

یونهایی که برای فرآیند اسپاترینگ استفاده می‌شوند به وسیله پلاسما حاصل می‌شوند. برای رسیدن به شرایط بهینه اسپاترینگ روش‌های گوناگونی برای اصلاح خواص پلاسما، خصوصاً دانسیته آن، استفاده می‌شوند که شامل استفاده از جریان متناوب فرکانس رادیویی (RF)، میدان‌های مغناطیسی و ولتاژ پایه می‌باشند. در کاتدپرانی رسوبی، اتم‌های کنده شده به حالت گازی در آمده، و در این حالت تعادل ترمودینامیکی ندارند. در نتیجه تمایل دارند در سطوح موجود در داخل محفظه رسوب نمایند. این فرآیند به طور وسیع در صنایع نیمه‌هادی برای رسوب فیلم‌های نازک از مواد گوناگونی نظیر GaAs روی سیلیکون و یا دیگر ویفرها کاربرد دارد. این فرآیند که در دمای خیلی پایین انجام می‌شود برای تهیه ترانزیستورهای فیلم نازک نیز ایده‌آل است. این ترانزیستورها در دیودهای PIN استفاده می‌شوند.

رسوبدهی لیزر پالسی

رسوبدهی لیزر پالسی نیز یک روش رسوبدهی فیلم نازک است که در آن از باریکه لیزر برای تبخیر مواد و رسوب دوباره آنها به صورت فیلم‌های نازک استفاده می‌شود. غالباً خلاء بالایی در این فرایند لازم است، پالس‌های لیزر متمرکز شده به طور مستقیم مواد را از حالت جامد به پلاسما تبدیل می‌کنند. پلاسمای حاصله با انبساط حرارتی از سطح دور می‌شوند که این عمل باعث سرد شدن پلاسما و تبدیل آن به گاز می‌گردد. خلاء بالا باعث می‌گردد تا وقتی که ماده به سطح سرد نرسیده است حالت گازی خود را حفظ کند و با رسیدن به سطح سرد فیلم نازکی را تشکیل می‌دهد.

روش سوخت اکسیژن با سرعت بالا (HVOF)

همچون روش‌های دیگر، این فرایند برای ایجاد یک پوشش و لایه سرامیکی بر روی مواد جهت

مقاوم‌سازی آنها در برابر خوردگی به کار می‌رود.

در این فرآیند برای تهیه سوخت، مخلوط گاز و اکسیژن با یکدیگر مخلوط شده، گاز حاصله از طریق یک نازل خارج شده و به سرعتی در حدود 1500 m/s می‌رسد. پودر در جریان گاز تزریق می‌شود و به سرعتی در حدود 800 m/s می‌رسد وقتی باریکه پودر به ماده می‌رسد، روی آن پوششی را تشکیل می‌دهد که خلل و خرج خیلی کمی دارد.

فوتولیز و پیرولیز لیزری

با تابش لیزر به ترکیبات آلی فلزی، فلز این ترکیبات احیا می‌شود. پس از تابش لیزر، غلظت فلز در ترکیب بلافاصله بالا رفته و به حالت اشباع می‌رسد. این روش برای تولید ذرات ریز و خوشه‌های فلزی، سرامیکی و غیره به کار می‌رود. نشان داده شده است که می‌توان با فوتولیز $\text{Fe}(\text{CO})_5$ و با استفاده از یک لیزر اکسایمری خوشه‌های آهن ۱ تا ۳۰ اتمی تولید کرد.

سنتز بر پایه آئروسول

فرایندهای بر پایه آئروسول، روش‌هایی رایج برای تولید صنعتی نانوذرات می‌باشند. آئروسول‌ها ذرات جامد و مایع در فاز گازی هستند که ابعاد آنها تا ۱۰۰ میکرومتر می‌رسد. قبل از اینکه اساس علمی و مهندسی آئروسول‌ها فهمیده شود، این ترکیبات در صنعت کاربرد داشتند. برای مثال، ذرات کربنی که در رنگدانه‌ها و تایرهای ماشین استفاده می‌شود، با سوختن هیدروکربن به دست می‌آید. رنگدانه تیتانیوم که در پلاستیک‌ها و رنگ‌ها کاربرد دارد از اکسیداسیون تتراکلرید تیتانیوم حاصل می‌شود، همچنین فوم سیلیکا و تیتانیوم از تتراکسیدهای مربوطه با روش پیرولیز شعله‌ای به دست می‌آید. فیبرهای نوری نیز با روش مشابهی ساخته می‌شوند. به طور مرسوم، اسپری برای خشک کردن و یا رسوب پوشش‌ها استفاده می‌شود. اسپری ترکیبات شیمیایی بر روی سطح گرم یا داخل اتمسفر گرم باعث پیرولیز ترکیب شیمیایی و تشکیل نانوذرات می‌شود.

فرآیند اسپری (برای ایجاد آئروسول) در دمای اتاق جهت تولید نانوذرات نیمه هادی و فلزات دیگر انجام شده است. نانوذرات CdS نیز با روش سنتز بر پایه آئروسول بدست آمده است. در این فرآیند قطرات میکرونی نمک Cd در معرض اتمسفر هیدروژن سولفید قرار می‌گیرند.

تراکم شیمیایی بخار (CVC)

در این روش بخار ماده اولیه در حین عبور از میان راکتور دارای دیواره‌های گرم تجزیه شده، و هسته‌های نانوذرات را در فاز گازی به وجود می‌آورد. نانوذرات حاصله به وسیله جریان گاز انتقال یافته و روی میله سرد (Cold finger) جمع می‌گردند، اندازه نانوذرات به دمای محفظه، ترکیب ماده اولیه، فشار و زمان اقامت ماده

اولیه بستگی دارد.

برخلاف راهکارهای CVD، در این روش نانوذرات بدون استفاده از هیچ زیرلایه ای، تشکیل می‌شوند. به عنوان مثال تنها با مخلوط کردن هیدروکربن‌ها و فلز کاتالیست در محفظه واکنش نانولوله‌ها ساخته می‌شوند. این روش به عنوان راهی مناسب جهت تولید انبوه پیشنهاد شده است.

سنتز سیال فوق بحرانی

سیالات فوق بحرانی ۱۲ (SCF) یا گازهای فشرده بعنوان یک محیط مناسب برای کریستالیزاسیون و تولید نانوپودرها پیشنهاد شده‌اند. سیالات فوق بحرانی دارای خواص شبه گازی و شبه مایع می‌باشند که علاوه بر ارزان بودن، اثر آلوده‌کنندگی نیز ندارند و موجب کنترل دقیق فرآیند کریستالیزاسیون شده و توانایی تولید ذرات بسیار ریز با مورفولوژی و توزیع اندازه ذرات مناسب را فراهم می‌آورند. فرآیندهای مختلف تولید نانوپودرها بر پایه سیال فوق بحرانی شامل انبساط سریع سیالات فوق بحرانی (RESS)، آنتی حلال فوق بحرانی (SAS)، ذرات حاصل از محلول اشباع گازی (PGSS) و کاهش فشار محلول آلی مایع منبسط شده (DELOS) می‌باشند.

انبساط سریع سیالات فوق بحرانی (RESS) یک روش کریستالیزاسیون است که از خواص یک سیال فوق بحرانی مانند CO₂ بعنوان یک حلال برای تسهیل تولید نانوپودر استفاده می‌کند. فرآیند RESS در دو مرحله صورت می‌گیرد: انحلال پذیری و تشکیل ذره. نیروی محرکه فرآیند از طریق کاهش سریع فشار محلول فوق بحرانی توسط نازل تأمین می‌شود و منجر به هسته‌زایی سریع و تولید ذرات ریز می‌شود.

فرآیند RESS دارای مزایای متعددی است. هرچند این فرآیند در فشارهای بالا اتفاق می‌افتد اما دمای مورد نیاز نسبتاً پایین است، در نتیجه هزینه‌های انرژی پایین می‌باشد. مزیت دیگر این فرآیند عدم وجود خطرات محیطی است. البته بزرگترین مزیت این فرآیند قابلیت ساخت ذرات بسیار کوچک در مقیاس میکرو و نانو با توزیع اندازه ذرات مناسب و عاری از حلال است. با وجود این مزایا، این روش دارای برخی از معایب نیز می‌باشد. از معایب اصلی این فرآیند می‌توان به نسبت بالای گاز/ماده بواسطه حلالیت پایین ماده، نیاز به فشار بالا و مشکل جدایش ذرات زیرمیکرون از حجم بزرگی از گاز در مقیاس صنعتی اشاره کرد.

یکی دیگر از روش‌های تولید نانوپودرها مبتنی بر سیال فوق بحرانی، فرآیند آنتی حلال فوق بحرانی (SAS)^{۱۳} است که از سیستم‌های دوتایی حلال / آنتی حلال برای تولید میکروپودرها و نانوپودرها استفاده می‌کند. در این روش، سیال فوق بحرانی (بطور مثال CO₂) به عنوان یک آنتی حلال عمل می‌کند و باعث متبلور

¹² Supercritical fluid

¹³ Supercritical anti-solvent

شدن جسم حل شونده می‌شود. نیروی محرکه اصلی برای این فرآیند تشکیل قطره است که از طریق برهم کنش حلال - آنتی حلال بوجود می‌آید.

فرآیند PGSS برای ساخت نانوذرات با توانایی کنترل توزیع اندازه ذرات بکار برده می‌شود. نیروی محرکه فرآیند PGSS یک افت دمای ناگهانی محلول در دمای زیر نقطه ذوب حلال است. در نتیجه این عمل، محلول از فشار کاری به شرایط اتمسفری تغییر وضعیت می‌دهد و در نتیجه می‌توان اثر ژول - تامسون را مشاهده کرد. سرمایش سریع محلول موجب تبلور جسم حل شده می‌شود و هسته‌زایی هموزن برای تشکیل ذرات بوجود می‌آید.

مزیت مهم فرآیند PGSS نیاز آن به فشار پایین‌تر در مقایسه با RESS، مصرف پایین‌تر گاز بخاطر نسبت‌های کمتر مایع/گاز و توانایی تشکیل نانوپودرها بدون نیاز به حلال می‌باشد که هزینه‌های عملیاتی را در دو حالت کاهش می‌دهد. اولاً اینکه نیاز به حلال‌های شیمیایی گران، کاهش می‌یابد. ثانیاً به دلیل عدم بکارگیری حلال‌ها، محصول از خلوص بالایی برخوردار است و نیاز به حذف باقی‌مانده حلال نمی‌باشد.

روش کاهش فشار یک محلول آلی مایع منبسط شده، فرآیندی است که از یک سیال فوق بحرانی بعنوان کمک حلال برای تشکیل نانوپودرها استفاده می‌کند. فرآیند DELOS برای حل شونده‌های آلی در حلال‌های آلی و مخصوصاً برای تولید پلیمرها، رنگ‌ها و ذرات دارویی مفید است. زیرا در روش‌های متداول کاهش اندازه ذره به دلیل محدودیت فیزیکی و شیمیایی غیرممکن می‌باشد. نیروی محرکه برای فرآیند DELOS، افت دمای بزرگ و سریع می‌باشد.

رسوبدهی از فاز مایع

رسوبدهی فاز مایع به هر فرآیندی که طی آن مواد در حالت مایع یا محلول از طریق تراکم یا واکنش به حالت جامد تبدیل می‌شوند، اطلاق می‌گردد. از این فرآیند برای تشکیل پوشش و رسیدن به خواص مختلف رسانایی، گرمایی، نوری، مقاومت در برابر خوردگی و همچنین خواص مکانیکی به کار می‌رود.

الکترو رسوب دهی

فرآیند الکترو رسوب دهی (Electrodeposition) که Electroplating نیز نامیده می‌شود محدود به مواد رسانا می‌باشد.

دو روش برای رسوبدهی وجود دارد که عبارتند از:

- 1) Electroplating
- 2) Electroless Plating

در روش اول، ماده در یک محلول مایع (الکترولیت) قرار می‌گیرد. وقتی که اختلاف پتانسیل الکتریکی بین الکتروود نمونه و الکتروود شاهد (معمولاً پلاتین) برقرار گردد، یک واکنش اکسید-احیاء اتفاق می‌افتد که باعث تشکیل یک لایه از ماده روی نمونه و ایجاد گاز بر روی الکتروود شاهد می‌شود.

در روش دوم، محلول شیمیایی پیچیده‌ای نیاز است. در این روش رسوب همزمان روی سطحی که پتانسیل الکتروشیمیایی مناسبی با محلول دارد، تشکیل می‌شود. این روش از آن جهت مناسب است که نیاز به پتانسیل الکتریکی خارجی ندارد. متأسفانه در این روش کنترل ضخامت فیلم و هم شکل بودن آن مشکل است.

فرآیند الکتروسوب‌دهی برای ساخت فیلم‌های فلزی نظیر مس، طلا، نیکل و... کاربرد دارد.

مایسل معکوس

اساس این روش بسیار ساده است. دو ترکیب شیمیایی برای ایجاد محصول با یکدیگر واکنش می‌دهند. چنانچه دو ترکیب در مقادیر زیاد با یکدیگر مخلوط شوند، ذراتی با اندازه بزرگ به وجود می‌آورند. برای تشکیل نانوذرات، انجام چنین واکنش‌هایی می‌بایست در ابعاد خیلی کوچکتر انجام شود. در این فرآیند از دو فاز آبی و آلی استفاده می‌کنند، که با یکدیگر مخلوط نمی‌شود ولی چنانچه با سرعت همزده شوند، قطرات یک فاز به صورت سوسپانسیون در دیگری حل می‌شوند. اندازه این قطرات با افزایش سورفکتانت یا شوینده تا حد خیلی زیادی ریز می‌شود. مولکول‌های سورفکتانت روی سطح یک قطره آب جمع شده و آن را پایدار می‌کنند. چنین قطره‌ای مایسل نامیده می‌شود. از آنجایی که قطره حاصله خیلی کوچک است به عنوان یک محیط واکنش ایده‌آل برای تشکیل نانوذره می‌باشد. مقادیر کمی از واکنش دهنده می‌تواند به داخل این قطره نفوذ کند و وقتی با واکنشگر دوم واکنش می‌دهد، ذره خیلی کوچکی حاصل می‌آید. در این فرآیند از دو ماده شیمیایی که یکی در فاز آلی و دیگر در فاز آبی حل می‌شود، استفاده می‌کنند. امولسیون مورد نیاز از طریق مخلوط نمودن حجم کمی از فاز آبی در حجم بالایی از فاز آلی بدست می‌آید. اندازه قطرات آب وابسته به نسبت آب / سورفکتانت است. سورفکتانت بین قطره آب و فاز آلی قرار می‌گیرد. فرایند بدین صورت است که ماده شیمیایی که در آب حل می‌شود به محلول اضافه شده و همزده می‌شود، از آنجائیکه این ترکیب در فاز آلی حل نمی‌شود، به صورت یکنواخت در فاز آب حل می‌گردد. سپس ترکیب شیمیایی دوم که در فاز آلی حل می‌شود به محلول اضافه می‌گردد. مقادیر خیلی کمی از آن وارد فاز آبی شده و با ترکیب قابل حل در آب واکنش می‌دهد و ذرات کوچک را حاصل می‌آورد.

فرایند مایسل معکوس برای تهیه نانو ساختارهایی نظیر $BaTiO_3$, ZrO_2 , CdS , $CdSe$, $CdTe$,

PbS , $PbSe$, TiO_2 استفاده می‌شود. نانوذراتی که از روش واکنش‌های رسوبی بدست می‌آیند از این روش

نیز حاصل می‌شوند.

پلیمریزاسیون میکروامولسیون

میکروامولسیونها فازهای متعادلی شامل مایعات غیر قابل استخراج نظیر روغن و آب می‌باشند که به وسیله لایه‌های نازک حاصل از سورفکتانت پایدار می‌شوند. ساختار میکروامولسیون‌ها به عنوان میکروراکتورهای پلیمریزاسیون عمل می‌کنند. با انجام پلیمریزاسیون مونومرها نانوذراتی در حدود ۱۰ نانومتر بدست می‌آیند. در این فرایند پلیمریزاسیون سریع بوده و پلیمرهای مونودیسپرس با وزن مولکولی بالا حاصل می‌شوند. تئوری فرآیند با استفاده از روش آنالیزی SANS مورد بررسی قرار می‌گیرد.

سل ژل

فرآیندهای سل ژل اولین بار در اواخر قرن نوزدهم کشف شد و از اوایل دهه ۴۰ به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفتند. پس از آن برای ساخت ژل‌ها در دماهای پایین و تبدیل آنها به شیشه فرآیندهایی توسعه یافتند. فرآیندهای سل ژل روالی همه‌کاره برای ساخت مواد سرامیکی و شیشه‌ای از محلول‌ها یا کلوئیدها (که مثل سوسپانسیون‌ها، ذرات در مایع نامحلول‌اند، اما ته‌نشین هم نمی‌شوند) می‌باشد. به طور کلی فرآیند سل ژل عبارتست از انتقال سیستمی از یک فاز "سل" مایع به یک فاز "ژل" جامد. با کمک فرآیند سل ژل می‌توان مواد سرامیکی یا شیشه‌ای را در گستره‌ای از اشکال ساخت: پودرهای فوق ریز یا کروی، روکش‌های فیلم نازک، الیاف سرامیکی، غشاهای معدنی میکروحفزه‌ای، سرامیک‌ها و شیشه‌های یکپارچه^{۱۴}، و مواد آئروژل به شدت متخلخل.

مواد آغازین برای تهیه سل معمولاً نمک‌های فلزات معدنی یا ترکیبات آلی فلزی مثل آلکوکسیدهای فلزی می‌باشند. در یک فرآیند سل ژل نوعی، ماده پیش‌ساز در معرض یک سری از واکنش‌های هیدرولیز و پلیمریزاسیون قرار می‌گیرد تا یک سوسپانسیون کلوئیدی یا سل را تشکیل دهد. فرآوری بیشتر سل امکان ساخت اشکال مختلفی از مواد سرامیکی را فراهم می‌کند. فیلم‌های نازک را می‌توان با انجام روکش‌دهی چرخشی^{۱۵} یا روکش‌دهی غوطه‌وری^{۱۶} روی یک زیرلایه تولید کرد. هنگامی که سل در یک قالب ریخته شود، ژلی مرطوب شکل می‌گیرد. با خشک کردن و فرآورش حرارتی، این ژل به ذرات شیشه‌ای یا سرامیکی متراکم تبدیل می‌شود. اگر در شرایط فوق بحرانی مایع موجود در یک ژل مرطوب خارج شود، ماده‌ای به سرعت متخلخل و با دانسیته فوق‌العاده اندک موسوم به آئروژل^{۱۷} بدست می‌آید. با تنظیم کردن ویسکوزیته سل در یک دامنه مطلوب می‌توان از سل الیافی سرامیکی بدست آورد. پودرهای سرامیکی فوق ریز و یکنواخت را نیز می‌توان با رسوب‌دهی،

¹⁴ Monolithic

¹⁵ Spin Coating

¹⁶ Dip Coating

¹⁷ Aerogel

پیرولیز پاششی^{۱۸} یا روش‌های امولسیون تولید کرد.

فرآوری نانوذرات به صورت سل ژل قابلیت ایجاد قطعات ارزان قیمت را دارا می‌باشد. نوعاً مخلوطی از ذرات سیلیکای نانومتری و افزودنی‌ها در قالب جای داده می‌شود. سپس لازم است ژل مرطوب با کنترل دقیقی - برای پرهیز از ترک برداشتن - خشک شود. پس از آن می‌توان ماده حاصل را تحت فرآوری بیشتر به شیشه‌ای شفاف تبدیل کرد.

با استفاده از نانوذرات حاصل از مواد مبتنی بر نمک و سرامیک‌هایی همچون Al_2O_3 و $Ni-YLaO_3$ تعدادی زیرلایه کاتالیستی ساخته شده‌اند.

از فرآیندهای سل ژل می‌توان برای کنترل دقیق آغشته‌سازی^{۱۹} نانوذرات تیتانیوم یا ژرمانیوم در فیلم‌های سل ژل دی‌اکسید سیلیکون استفاده کرد، تا بتوان ضریب شکست ماده حاصل را به کنترل درآورد. الیاف را نیز می‌توان از محلول‌های مواد پیش‌ساز بیرون کشید یا رسید یا آنها را با فیلم‌های نازک روکش دهی کرد.

الگوبرداری از نانو ساختارها

الگوبرداری از نانو ساختارها روشی است که طی آن عناصر پایه نسل دوم بدست می‌آید، در این روش از فرایندهای روکش دهی، پرسازی و تجزیه الگو برای تهیه نانومواد بهره می‌گیرند. البته برای بدست آوردن یک نانو ساختار ممکن است این فرایندها بطور متوالی انجام شوند. به عنوان مثال می‌توان به ساخت نانوپوسته‌ها اشاره کرد که طی آن نانوذرات پوشش داده می‌شوند سپس خود حل شده و یا تجزیه می‌شوند و تنها لایه بیرونی باقی می‌ماند.

خودآرایی در محلول

خودآرایی^{۲۰} یک روش تولید پایین به بالاست، و بدلیل اینکه محصولات حاصل از خودآرایی صرفه اقتصادی بالقوه‌ای دارند، بسیار جالب توجه است. البته این مسأله آنقدر هم ساده نیست. خودآرایی چیز جدیدی نیست. خودآرایی با قدرت بالایی سیستم‌های زیستی را می‌سازد و حتی می‌توان واکنشهای شیمیایی صنعتی قدیمی را نیز به آن نسبت داد.

بیان تا حدی جدیدتر خودآرایی که همه توجهات را به خود جلب کرده عبارتست از: توانایی کنترل آن برای ساخت ساختارهایی همچون لایه‌ها (مثلاً برای روکش دهی سطوح تخت یا نانوذرات)، نانو کپسول‌ها،

¹⁸ Spray Pyrolysis

¹⁹ Doping

²⁰ Self-Assembly

نانوسیم‌ها و حتی اجزای ساده الکترونیک مولکولی. درخت‌سان‌ها²¹ مثالی کلاسیک از خودآرایی نسبتاً پیچیده است؛ هر چند بسیاری آن را فقط نوعی شیمی پلیمری می‌دانند.

در طبیعت، خودآرایی برای ساخت سیستم‌های بسیار پیچیده‌ای به کار رود.

ایجاد درخت‌سان‌ها و لایه‌های چندگانه از تک‌لایه‌های خودآرا به مقداری طرح‌ریزی و طراحی مبتنی بر خودآرایی تسلسلی نیاز دارد. ممکن است در نهایت روزی ساخت ساختارهای پیچیده‌ای همچون پردازنده‌های کامپیوتری با استفاده از خودآرایی صرف عملی شود. انتظار می‌رود طراحی این فرآیندهای تسلسلی - برای تفویض بر آن موانع - شامل چندین مرحله باشد. نتایج بالقوه خودآرایی فوق‌العاده است و نویدبخش تولید راحت مقادیر فراوانی از ساختارهای پیچیده با ترتیبی از مراحل شبیه به تولید انبوه مواد شیمیایی، در جایی مثل صنعت داروسازی است.

تک‌لایه‌های خودآرا (SAMs)²² هنگامی تولید می‌شوند، که ماده‌ای به طور خود به خود لایه‌ای به ضخامت یک مولکول روی یک سطح شکل دهد. با افزایش لایه‌ها می‌توان طبقاتی از لایه‌های دارای ضخامت یک مولکول ایجاد کرد. تحقیق در این زمینه از سال ۱۹۸۳ آغاز شد و هر ساله مقالات منتشره در این باب فزونی می‌گیرد. تحقیق در زمینه SAMها با تحقیق در زمینه میکروسکوپی تونل‌زنی پیمایشگر - که در اوایل دهه ۹۰ اختراع شد - مقارن شد.

هنگامی که ماده‌ای (مثل یک سطح فلزی یا متخلخل) در تماس با محلولی از مولکولهای آلی قرار گیرد که به طور خود به خود، روی زیرلایه به ردیف درآیند، SAMها تولید می‌شوند. ماده روکش شده خود می‌تواند زیرلایه‌ای برای لایه دیگری از یک ترکیب متفاوت باشد.

با وجودی که چندین راهکار متفاوت برای خلق فیلم‌های فلزی و سرامیکی ایجاد شده است، اما نمی‌توان به طور کلی از آنها برای خلق فیلم‌های آلی استفاده کرد، چون معمولاً شامل شرایط حادی می‌شود که مولکولهای آلی در آن تخریب می‌شوند. با این وجود در حال حاضر می‌توان SAMها را در شرایط بسیار ملایم ساخت. استفاده از مواد آلی نیز حوزه جدیدی از گزینه‌ها را فراهم می‌کند (این مواد موجب کنترل بهتر انتقال بار در مصارف الکترونیکی، کنترل بهتر چسبندگی و زیست‌سازگاری افزون‌تر می‌شوند). لازم بذکر است که، SAMها به طور کلی ساختار نسبتاً ایده‌آلی دارند، هر چند در ابتدا این گونه نیستند، اما دستخوش یک فرآیند بازآرایی شده و نهایتاً بسیار منظم می‌شوند. فناوری SAMها را می‌توان در زیست‌حسگرهایی چون تراشه‌های DNA بکار برد، این حسگرها از آرایه‌هایی از تک‌مارپیچ تثبیت‌شده DNA تشکیل می‌شوند. برای خلق فیلم‌هایی با ساختار و ترکیب ایده‌آل جهت الصاق پروب‌های DNA، هنوز کارهای زیادی را باید انجام داد.

²¹ Dendrimers

²² Self Assembled Monolayers

SAMها در چاپ میکروتماسی نیز کاربرد گسترده‌ای دارند.

قوس الکتریکی (پلاσμα)

این روش یکی از قدیمی‌ترین روشهای ساخت است، که ابتدا برای تولید باکی‌بال‌ها بکار می‌رفت. جرقه‌ای که بین دو الکترود گرافیتی ایجاد می‌شود، کربن یک الکترود را کنده و به صورت دوده روی دیگری مترکم می‌سازد. راندمان کار در ابتدا بد بود، ولی بعداً بهبود یافت، فشار محفظه تبخیر و جریان مهم‌ترین عوامل مؤثر در راندمان می‌باشند. نانولوله‌های کربنی حاصل از این روش معمولاً ساختاری چند دیواره دارند، اما با سوراخ کردن میله‌های گرافیتی و پرنمودن آنها با پودر گرافیت و کاتالیزورهای مختلف می‌توان به نانولوله‌های تک دیواره دست یافت. این روش برای تولید انبوه نانولوله‌ها جهت استفاده در مواد کامپوزیتی مناسب است.

کامپوزیت کردن نانوساختارها

فرایند کامپوزیت کردن، مخلوط نمودن یک یا چند فاز در فاز زمینه است. فاز زمینه بطور معمول پلیمری، فلزی و یا سرامیکی می‌باشد. نانو کامپوزیت‌های نانوساختار دارای خواص مکانیکی، حرارتی و الکتریکی کاملاً متفاوتی نسبت به ساختارهای رایج می‌باشند. همچنین این نانوساختارها عناصر نسل دوم به حساب می‌آیند.

تقلید از طبیعت

در این رویکرد از نانوساختارهای طبیعی برای ایجاد مواد نانوساختار جدید و یا بررسی آنها و به وجود آوردن روشی که با آن بتوان نانوساختارهای مشابه را به وجود آورد، استفاده می‌شود.

مطالعه نانوساختارهای طبیعی

با مطالعه نانوساختارهای طبیعی می‌توان به روشهای ساخت و همچنین خواص آنها که کاربردشان را مشخص می‌کند، پی برد. با عامل دار کردن و اصلاح نانوساختارهای طبیعی می‌توان خواص ایجادشده را مورد بررسی قرار داد.

نانو ساختارهای مصنوعی الهام گرفته از طبیعت

تهیه ساختارهای مصنوعی الهام گرفته از طبیعت، دارای مراحل جداسازی و خالص سازی نبوده و همین امر باعث می‌گردد که این ترکیبات نسبت به نانوساختارهای طبیعی مشابه کارایی بالاتری داشته باشند. البته رسیدن به روشی مناسب برای تولید نانوساختارهای مصنوعی با بازدهی بالا مهم‌ترین مسئله به حساب می‌آید.

استفاده از نانو ساختارهای طبیعی در نانو قطعات

پیشرفت‌های علوم زیستی و نانوفناوری به زودی به ما امکان خواهد داد، ساختارهایی همچون پمپ، شیر، رابط و غیره را از سیستم طبیعی قرض گرفته و آنها را در قطعات کارکردی مصنوعی همچون حسگرها، مدار الکترونیکی و غیره جای دهیم.

نانومحاسبات

در رویکرد نانومحاسبات به صورت تئوری انواع نانوساختارها و کارایی آنها مشخص می‌گردد انتخاب هر کدام از روش‌ها وابسته به شرایط و نوع نانوساختار مورد بررسی است.

روشهای نیمه تجربی اربیتال مولکولی

روشهای نیمه تجربی اربیتال مولکولی توصیفی تقریبی از الکترون‌های والانس را دارد و شرایط ذیل را شامل می‌شود.

- ۱- مبتنی بر حل فرم ساده شده معادله شرودینگر است.
 - ۲- مبتنی بر تقریبات انتگرالی با استفاده از عبارات تجربی مبتنی بر پارامترهای متنوع است.
 - ۳- توصیفات شبه کمی از ساختار الکترونی، توزیع الکترونی، ساختار مولکولی، خواص و انرژی‌های مرتبط به آن دارد.
 - ۴- از روش ساختار الکترونی "ab initio" ارزان‌تر است ولی دقیق‌تر نیست.
- همچنین مقادورات تئوری اوربیتال مولکولی "ab initio" عبارتند از:
- توزیع الکترونی را با استفاده از حل کامل معادله شرودینگر، با دقت بهتری نسبت به روش‌های شبه تجربی پیش‌بینی می‌کند.

- دارای قابلیت ارتقاء قانونمند جهت رسیدن به دقت بالا در خواص شیمیائی است.
 - نیاز به پارامتری کردن یا کالیبراسیون با توجه به آزمایش نمی‌باشد.
 - قابلیت توصیف ساختار، خواص، انرژی، واکنش پذیری مواد را داراست.
 - گران و هزینه‌بر است.
 - روش "Ab initio" مبتنی بر "معادله شرودینگر" است:
- این معادله فقط برای اتم هیدروژن به صورت دقیق حل شده است. این روش عموماً متکی بر دو صورت است: روشهای همبسته و روش هاتری فک

روش های همبسته

روش‌های همبسته برهم کنش تک تک الکترون‌ها را با یکدیگر مورد ارزیابی قرار می‌دهد و به همین ترتیب تعمیم می‌یابد.

روش هاتری فک

روش هاتری فک اثر هر الکترون را بر دیگر الکترون‌ها لحاظ می‌کند. این روش با استفاده از سه تقریب معادله شرودینگر را برای "چندذره‌ای"ها قابل حل می‌کند. در تقریب هاتری فک اثر الکترون‌ها به صورت یک میدان تمام الکترون‌ها را به عنوان یک گروه در برمی‌گیرد و نه به صورت مستقل.

مکانیک مولکولی

- این روش مبتنی بر مدل توصیفی توپ و فنر است و ویژگی‌های آن عبارتند از:
- معرف بهتری برای تعادل هندسی نسبت به مدل‌های پلاستیک است.
 - قادر است تا روابط همبستگی با انرژی کرنشی را لحاظ کند.
 - محاسبات آن کم هزینه است.
 - پارامترهای تجربی فراوانی وجود دارد که می‌بایستی به دقت آزمایش و کالیبره شود.
 - این مدل به تعادل هندسی محدود شده است.
 - برهم کنش‌های الکترونی و ساختار الکترونی را لحاظ نمی‌کند.
 - اطلاعاتی مبنی بر «خواص» و «واکنش پذیری» نمی‌دهد.

- قادر به لحاظ کردن و درک برهم کنش‌های ایجاد و شکست پیوندها نمی‌باشد.

تعیین سطوح انرژی پتانسیل

اساس سطوح انرژی پتانسیل، شیمی محاسباتی است و خصوصیات این روش عبارتند از:

- ساختار، انرژی، خواص، واکنش پذیری، طیف و دینامیک مولکول‌ها به سهولت بر حسب سطوح انرژی پتانسیل درک می‌شود.
- به جز چند مورد ساده، سطوح انرژی پتانسیل از "آزمایش" بدست نمی‌آید.
- زمینه "شیمی محاسباتی" دامنه وسیعی از روش‌ها را جهت کاوش سطوح انرژی پتانسیل، ایجاد کرده است.
- چالش‌های "شیمی محاسباتی" در راه توسعه روش‌های با دقت بالا و کیفیت مؤثر به منظور کاوش "سطوح انرژی پتانسیل" در جهت علایق شیمی‌دانان است.
- انرژی‌های واکنش از انرژی‌های "کمینه" یا "بیشینه" به ازاء واکنش پذیرها و محصولات تعریف می‌شود.

اندازه گیری طیفهای ارتعاشی

- شکل یک ذره حول یک نقطه کمینه، تعیین کننده طیف ارتعاشی است و دارای شرایط ذیل می‌باشد.
- هر حالت الکترونی یک مولکول دارای یک سطح انرژی پتانسیل جداگانه است و جداسازی بین این سطوح منجر به طیف نهائی خواهد شد.
- خواص مولکول نظیر "گشتاور دو قطبی"، "قطبش پذیری" و "NMR"، بستگی به پاسخ تابع انرژی به میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی دارد.