تصنيف المواد النانوية وفقا لعدد الأبعاد النانوية للمادة:

1. المواد النانوية احادية الأبعاد :

هي المواد ذات البعد النانوي الواحد الذي يتراوح ما بين (100- 1) nm ، ومن امثلتها الأغشية الرقيقة Thin Filmsالتي تستخدم في طلاء الأسطح لحمايتها من الصدأ والتآكل ، وفي تغليف المنتجات الغذائية بهدف وقايتها من التلوث والتلف . والأسلاك النانوية Nano wires التي تستخدم في الدوائر الالكترونية والألياف النانوية التي تستخدم في عمل مرشحات الماء.

2. المواد النانوية ثنائية الأبعاد :

وهي المواد النانوية التي تمتلك بعدين يتراوح ما بين (100-1) nm ، ومن امثلتها أنابيب الكربون النانوية

3. المواد النانوية ثلاثية الأبعاد:

وهي المواد التي تمتلك ثلاثة أبعاد نانوية يتراوح ما بين (100-1) nm ، مثل صدفة النانو وكرات البوكي Bucky Balls .

تركيب كرة البوكي تتكون كرة البوكي من 60 ذرة من ذرات الكربون ويرمز لها بالرمز C60 ، ولها مجموعة من الخصائص المميزة والتي تعتمد على تركيبها . ونلاحظ ان النموذج الجزيئي لكرات البوكي يبدو ككرة قدم مجوفة ، وبسبب شكل الكرة المجوف يختبر العلماء الآن فاعلية استخدام كرة البوكي كحامل للأدوية في الجسم ، فالتركيب المجوف يمكنه أن يتناسب مع جزيء من دواء معين داخله بينما الجزء الخارجي لكرات البوكي مقاوم للتفاعل مع جزيئات أخرى داخل.

المواد المتناهية في الصغر وطرق تحضيرها (Nanomaterials Synthesis and Processing)

(٢-١) مقدمة

المواد المتناهية في الصغر (النانوية) هي مواد ذات خصائص شكلية على حجم النانومتر، ولها خصائص نابعة من أبعادها النانومترية(بعدها النانومتري أقل من ١٠٠nm). وتنقسم المواد النانوية عمومًا إلى قسمين هما: الفوليرينات (انظر:الشكل رقم ٢-١)، والجسيمات النانوية غير العضوية (انظر:الشكل رقم ٢-٢). ويهتم علم المواد المتناهية في الصغر بدراسة المواد في السلم الذري أو الجزيئي.

وقد تطور علم تقنية النانو، والمواد النانوية المرتبطة به بسرعة كبيرة؛ وذلك نظرًا لاهتمام الباحثين في مجال تقنية النانو بهذه المواد النانوية. وقد أنتجت آليات وتجهيزات تسمح للباحثين باكتشاف أسرار المادة على المستوى النانومتري. ومما عزّز الاهتمام بالمواد النانوية تطبيقاتها المتعددة التي تغطي جلّ المجالات العلمية، مثل: تقنيات الإعلام والاتصال، والصحة، والبيئة، والطاقة، والنسيج، والكيمياء، ومواد التجميل والعطور، والسيارات، والفضاء وعلم الطيران، والزجاج والمواد المصنوعة منه، والخزف ومواد البناء، والمطاط، والمواد البلاستيكية (انظر: الفصل الرابع).

وسنناقش في البنود التالية تصنيفات تلك المواد، وبعض طرق تحضيرها، والمجاهر المستخدمة في رؤية تلك المواد المتناهية في الصغر التي يصعب رؤيتها بالعين المجردة؛ وذلك لأهميتها في التطبيقات الحديثة لتقنية النانو.

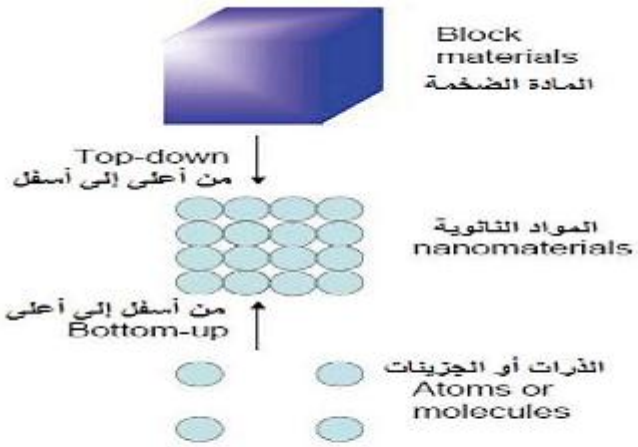
وتتراوح أبعاد المواد النانوية ما بين عشرة إلى مئة نانومتر (1nm =10-3μ=10-9m). ولكي نتخيل أبعاد هذه المواد دعنا نقارنها بأبعاد أجسام أخرى، فمثلا: بعد الذرة يتراوح ما بين 0.1 nm إلى 0.4nm ، في حين يقدر سمك جزيء الحامض النووي (DNA) بحوالي 2nm. أمّا طول هذا الجزيء فيصل إلى 10 أمتار. كما يتراوح طول فيروس ما بين 10 nm إلى 100 nm . في حين أنّ سمك شعرة الإنسان تتراوح ما بين 50000 nm إلى 100000 nm .

وتكمن أهمية المواد المتناهية في الصغر في خصائصها الكمية المتميزة؛ وذلك نظرًا لصغر حجمها، وكبر سطحها، كما أنّ نسبة مساحة سطح المادة المتناهية في الصغر على كتلتها أكبر من النسبة نفسها في السلم العادي؛ مما يؤدي إلى ارتفاع التفاعل الكيميائي، ومنه إلى التأثير في الخصائص الكهربائية والميكانيكية للمواد المتناهية في الصغر. ومن جهة أخرى يصبح المفعول الكمي أكثر أهمية في مواد النانو، حيث يؤثر في خواص المادة الضوئية، والكهربائية، والمغناطيسية، ويظهر هذا جليًّا في النقط الكمية، والليزر الكمي المجهّز بالتجهيزات الإلكتروضوئية(٥).

(٢-٤) طرق تحضير المواد المتناهية في الصغر (Nanomaterials Synthesis)

إنّ للخواص الفيزيائية والكيميائية للمادة الخام المستخدمة في تحضير المواد النانوية دورًا مهمًّا، وذلك خلافاً لما يحدث عند تحضير وتصنيع المواد المحسوسة (الحجمية). فقد اكتشف العلماء أنّ بعض المركبات عندما تصنع بأحجام نانومترية فإنها تكتسب خواص فريدة، لا تتوافر لها عندما تكون في الحجم المحسوس، وعلى الرّغم من تطابق التكوين الكيميائي في الحالتين فإنّ المادة النانومترية المتناهية في الصغر تكتسب صفات وخواص كهربية وضوئية ومغناطيسية استثنائية بسبب الترتيب الجديد الذي تأخذه الذرات، فالبورسلين مثلا يعدّ مادة مهمة، ولكنها هشة، وسبب هشاشتها يرجع إلى الفراغ الذي بين جزيئاتها (المكوّنة من الرمل)، وهو كبير نسبيًّا؛ مما يقلل تماسكها. كما يمكن أخذ البورسلين الموجود في الصحون المكسورة مثلاً، وتفكيكه إلى مكوناته الذرية الصغرى، ثم إعادة ترتيب هذه المكونات؛ لنحصل على بورسلين أقوى من الحديد، بحيث يمكن استعماله في البناء، أو في صناعة سيارات خفيفة الوزن، ولا تحتاج إلى وقود كثير. وهناك مثال آخر مفاده أنّ البترول يتشابه في تركيبه مع مواد عضوية كثيرة؛ لذا فإنّ تقنية النانو تمكننا من صناعة مكونات بترولية من أي نفايات، أو مخلفات عضوية بعد تفكيكها إلى مكوناتها الذرية، ثم إعادة تجميعها؛ لنحصل على بترول

وهناك طرق كثيرة؛ لتصنيع المواد النانوية، وقد قسّمت إلى قسمين رئيسين(انظر:الشكل رقم٢-٥): أحدهما من القمة إلى أسفل (Top-down) ، حيث تكسر المادة الأصلية (الكبيرة) شيئاً فشيئاً حتى الوصول إلى الحجم النانوي. وتستخدم عدة طرق؛ لتحقيق ذلك منها: الحفر الضوئي، والقطع ، والطحن، والتفتيت. واستخدمت هذه التقنيات في الحصول على مركبات إلكترونية مجهرية: كشرائح الحاسب، وغيرها. أمّا الطريقة الثانية فتبدأ من أسفل إلى أعلى(Bottom –up) ، بعكس الطريقة الأولى ، حيث تبنى المادة النانوية انطلاقاً من ذرات وجزيئات ترتب؛ للوصول إلى الشكل والحجم النانوي المطلوب. وتدخل هذه الطريقة في الغالب ضمن طرق كيميائية، وتتميز بصغر حجم المواد المنتجة، وقلة الفاقد، والحصول على روابط قوية للمادة النانوية المنتجة.



شكل رقم(٢-٥) رسم توضيحي؛ لوصف طرق تحضير المواد النانوية (٢٤).

أ- التحضير بالطرق الفيزيائية (Physical methods)

الطرق الفيزيائية كثيرة منها:

١-التحضير انطلاقاً من الحالة البخارية للمادة التي يحصل عليها بتسخينها، أو بقذفها بحزمة إلكترونات، أو حلها حراريًّا بأشعة الليزر.

وفي أغلب الأحيان يبرد البخار بصدمه بغاز محايد، فيصبح أكثر إشباعًا، فيوضع بعد ذلك بسرعة على سطح بارد؛ لتجنب البناء البلوري، أو التحام الأكوام.

٢- تحضّر المساحيق المتناهية في الصغر باستعمال المويجات على مساحيق من أبعاد ميليمترية. ومن مميزات هذه التقنية أنها ليست ملوثة.

٣- تحضّر أنابيب الكربون المتناهية في الصغر عن طريق استئصالها بالليزر، وبتفريغ البلازما، أو التفكيك بحافز.

٤-أمّا الطبقات الرقيقة بسمك النانومتر فيمكن الحصول عليها عن طريق (PVD)، أو (Epitaxie)

ب- التحضير بالطرق الكيميائية (Chemical methods)

ومن أهم طرق التحضير الكيميائية:

١- طريقة ترسيب الأبخرة الكيميائية (Chemical Vapor Deposition(CVD)

يدخل بخار المادة التي يراد تحضيرها في مفاعل مصنع خصيصًا، حيث تمتز جزيئات المادة على سطح أساس بدرجة حرارة ملائمة. والجزيئات الممتزة إمّا تتفكك، أو تتفاعل مع غازات أخرى، أو البخار؛ لتكوين شريط صلب على الأساس. تستعمل هذه الطريقة في تحضير بعض المواد المتناهية في الصغر، مثل: كميمات أشباه النواقل، والخزف، وأنابيب الكربون المتناهية في الصغر (٢٤).

٢-طريقة التفاعلات في وسط سائل (Interaction in solution medium method)

من أكثر السوائل استعمالاً الماء، أو السوائل العضوية. وترسّب الجزيئات المتناهية في الصغر بتغيير شروط التوازن الكيميائي. ويمكن أن نذكر من بين هذه التفاعلات ما يلي:

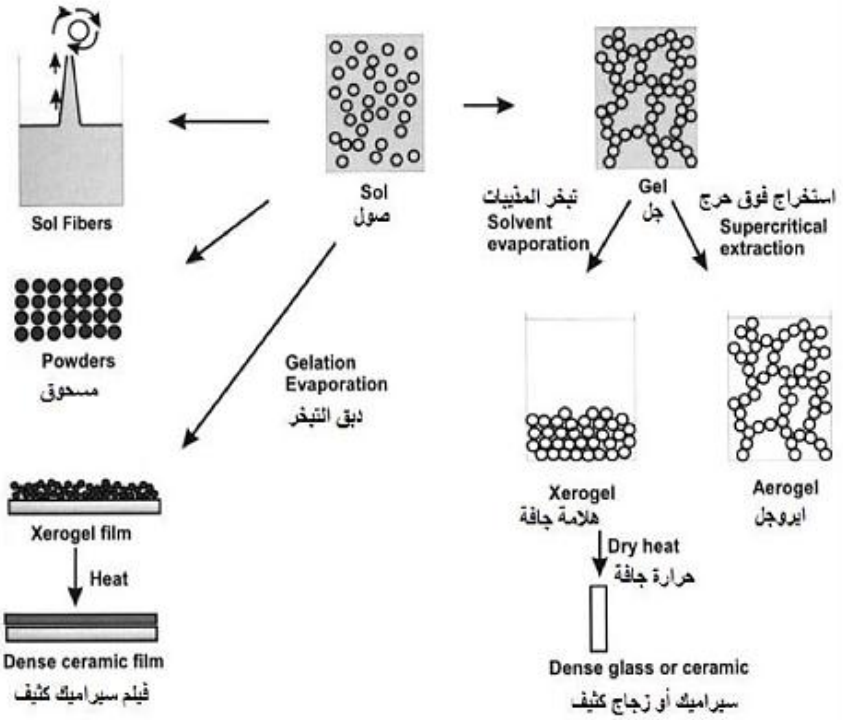
-الترسيب الكيميائي المزدوج: وهو الأكثر استعمالاً صناعيًّا بتكلفة منخفضة.

-التحليل بالماء: وهو الذي يسمح بالحصول على جزيئات دقيقة كروية أكثر نقاء، وتجانس كيميائيًّا، مع القدرة على التحكم في أبعاد الجزيئات(٢٤).

٣- طريقة الصول-جل (Sol-gel Method)

وهذه الطريقة تمر بطورين (انظر:الشكل رقم ٢-٦) هما: طور السائل (sol) ، ثم بعد فترة من الزمن تتبخر المادة، فتتحول إلى طور الجل(gel)؛ ولذلك سميت هذه الطريقة طريقة الصول – جل، وهذه الطريقة تستخدم في صنع قضبان ضوئية يمكن أن تكون وسطاً ليزريًّا. وقد صنعت قضبان ليزرية من مواد نانوية، ولكن الجزيئات غير مستقرة، وجاري البحث الآن في جعلها مستقرة (هذا الكلام يخص السيلكون نانو(. كما تسمح هذه التقنيات بإنتاج مواد متناهية في الصغر، وذلك انطلاقاً من محاليل غروية، والارتكاز على تفاعلات الشناظة غير العضوية. ومميزات هذه الطريقة تكمن في إمكانية التحكم في تجانس وهيكلة المادة في السلم النانومتري في المراحل الأولى للتحضير، وتوزيع الجزيئات. كما أنها تحضّر في درجة حرارة منخفضة بالمقارنة مع التقنيات الأخرى. وتسمح هذه التقنية أيضًا بتحضير قطع ضخمة، أو سطحية على ألواح ، أو ألياف. كما تستعمل في صنع ألياف متعددة العناصر.

والمواد الناتجة عن هده الطريقة تغطي معظم مجالات المواد الوظيفية، مثل: الضوء، والمغناطيس، والإلكترونيك، والناقلية العليا في درجات الحرارة المرتفعة، والمحفزات، والطاقة، والملتقطات... إلخ(٢٥).



شكل رقم(٢-٦) رسم توضيحي؛ لوصف طريقة الصول-جل (٥)

ج – التحضير بالطرق الميكانيكية (Mechanical methods)

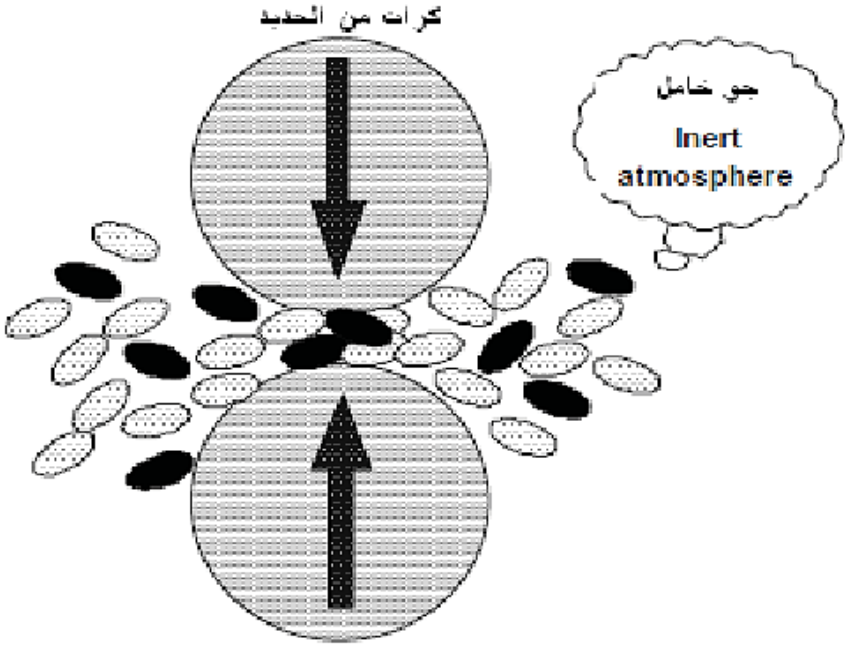
أهم طرق التحضير الميكانيكية هي:

١-طريقة الطحن (Ball milling method)

وهذه الطريقة تنتج مواد نانوية على شكل مسحوق (بودر)، حيث توضع المادة تحت طاقة عالية جدًّا، ثم تطحن عن طريق كرات مصنوعة من الفولاذ تتحرك إمّا على نحو كوكبي، أو اهتزازي، أو رأسي (انظر:الشكل رقم ٢-٧). ويمكن صنع مسحوق يتراوح حجمه ما بين ٣ إلى ٢٥ نانو متر(٥).

٢- طريقة التركيب الميكانيكي (Mechanical structure)

وتعتمد هذه الطريقة على سحق مادة مكونة من جزيئات ميكرومترية (من ١ إلى ٣٠μm) لعدة مخالط؛ لمزجها. الميزة الأساسة لهذه الطريقة أنها تسمح بالحصول على رواسب نانومترية، أو أجسام متناهية في الصغر موزعة على نحو متجانس داخل المادة. كما تسمح بإنتاج مواد ضخمة من عدة كيلوغرامات، أو حتى أطنان(٥).



شكل رقم(٢-٧) رسم توضيحي؛ لوصف طرق تحضير المواد النانوية بالطحن (٥).

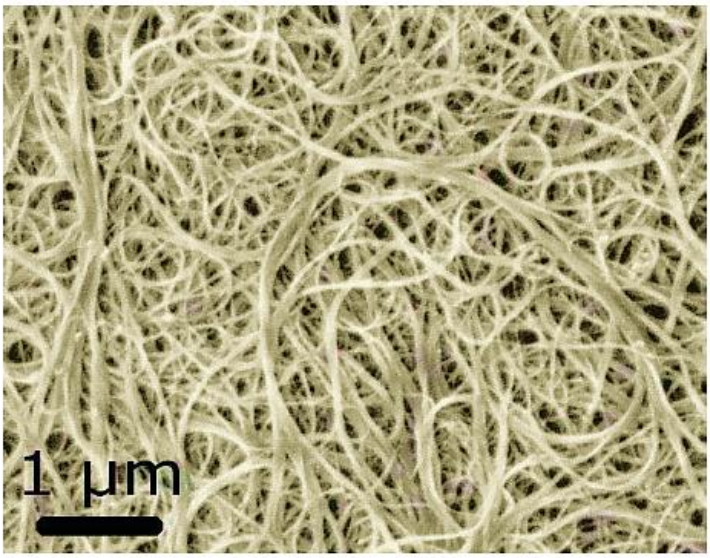
(٢-٧) المجاهر المستخدمة في رؤية المواد النانوية (Microscopes)

شكل رقم(٢-١٨) المجاهر الإلكترونية (٩٢).

(٢-٧-١) المجهر الإلكتروني النفاذ (Transmission Electron Microscope -TEM)

يمثل هذا المجهر تقنية ميكروسكوبية (انظر:الشكل رقم ٢-١٩) يستخدم فيها شعاع من الإلكترونات؛ لفحص العينات، واختبارها. وتتكوّن الصورة بواسطة الإلكترونات النافذة خلال العينة، والتي تكبّر وتركز بواسطة عدسة شيئية، ثمّ تعرض على شاشة تصوير، وتكون هذه الشاشة في أغلب المجاهر النفّاذة على هيئة شاشة تفلور مع شاشة مراقبة، أو تعرض الصورة على فيلم تصوير، أو يكشف عن الصورة بواسطة كاشف حسّاس، مثل: كاميرا (CCD).

والشكل رقم (٢-٢٠) يوضح صورة أخذت بواسطة المجهر الإلكتروني النفاذ عالي الدقة، وهي خاصة بالتركيب الداخلي لجزء من أداة حفر. ويلحظ في هذه الصورة أنّ التركيب الداخلي يتألف من عدة حبيبات نانوية الحجم، ولا تتعدي أقطارها ٥ نانوميترات. ويوضح هذا الشكل أيضًا وجود معظم ذرات المادة على الحدود الخارجية للحبيبات؛ مما كان السبب الرئيس في تمتعها بخواص ميكانيكية متميزة، لا توجد في نظيرتها من المواد المؤلفة من حبيبات كبيرة(٢٤).



شكل رقم(٢-٢٠))صورة مأخوذة بواسطة المجهر الإلكتروني النفّاذ (TEM) (٩٢).

(٢-٧-٢)المجهر الإلكتروني الماسح (Scanning Electron Microscope - SEM)

يعدّ المجهر الإلكتروني الماسح(انظر:الشكلين رقم ٢- ٢١ ، و٢-٢٢) أحد المجاهر الإلكترونية الذي يصوّر فيه سطح العينة عن طريق مسحها بواسطة أشعة من الإلكترونات عالية الطاقة، بحيث تتعامل الإلكترونات مع الذرات المكوّنة سطح العينة؛ فتنتج عنها إشارات تتضمّن معلومات عن طبوغرافية السطح، وتركيبه، وخصائص أخرى، مثل: التوصيلية الكهربية. وتحتوي أنواع الإشارات الناتجة عن إلكترونات ثانوية، وأخرى متشتتة إلى الخلف، وأشعة أكس المميزة، والضوء (التفلور المهبطي). وتنشأ هذه الإشارات من شعاع الإلكترونات الذي يصطدم بالعينة، ويتعامل معها عند سطحها.

ويلحظ في نمط الكشف الرئيس، أي: التصوير بالإلكترونات الثانوية، أنّ المجهر الماسح يستطيع إنتاج صور ذات تحليل عالٍ جدًّا لسطح العينة، وإظهار تفاصيل دقيقة له، قد تصل إلى حجم يتراوح ما بين ١- ٥ نانومترات. وتظهر الطريقة التي تتكوّن بها هذه الصور، أنّ الصور المجهرية للماسح تكون ثلاثية الأبعاد، فتساعد على فهم التركيب السطحي للعينة.

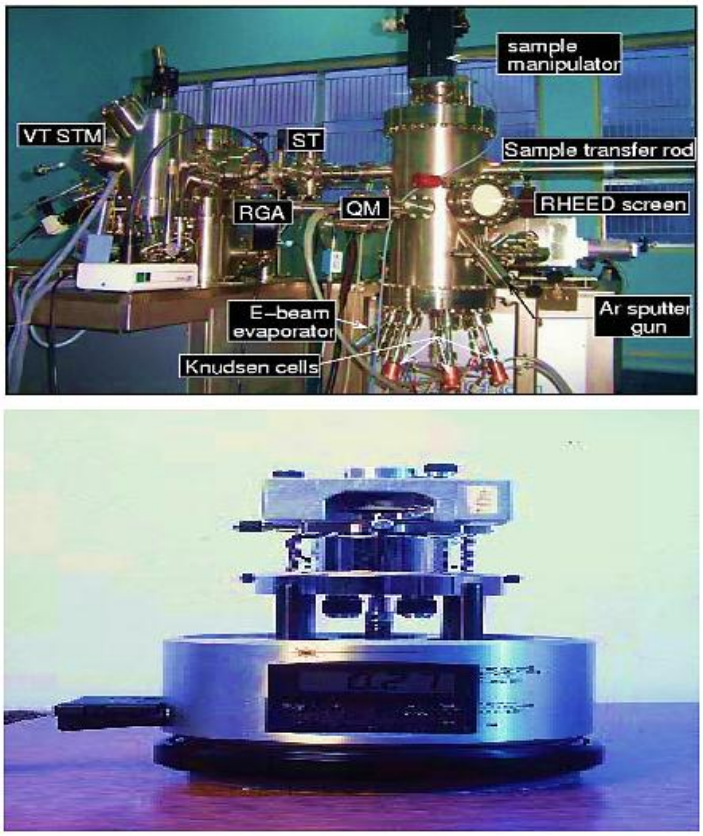
شكل رقم(٢-٢١) صورة للمجهر الإلكتروني الماسح (SEM) (٢٤).

(٢-٧-٣)المجهر النفقي الماسح (Scanning Tunneling Microscope-STM)

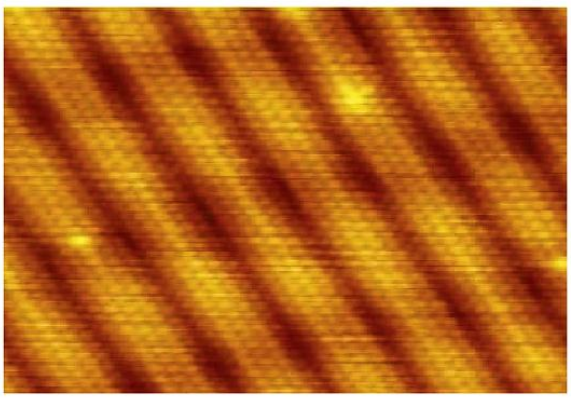
في عام ١٩٨١م اخترع العالمان جيرد بينج وهنريك ردهر المجهر النفقي الماسح (انظر:الشكل رقم ٢-٢٣)، الذي يصوّر الأجسام بحجم النانو، ومنذ ذلك التاريخ ازدادت الاهتمامات البحثية المتعلقة بتصنيع ودراسة التركيبات النانوية للمواد. فعندما نتحدث عن الميكروسكوب فإنّ أول ما نفكر فيه هو جهاز الميكروسكوب الذي نعرفه في مختبرات المدارس، والذي يكوّن صورة ضوئية عن العينة المراد النظر إليها وهي مكبرة. ومع تقدم العلم وتطوره أصبح بالإمكان أن نحصل على تكبير يفوق أي توقع. وفي بدايات القرن العشرين، وتزامنًا مع اكتشاف الفيزياء الحديثة، والخاصية المزدوجة للإشعاع الكهرومغناطيسي، والجسيمات المادية ، ونظرية ميكانيكا الكم التي تدرس الأجسام على المستوى الذري الدقيق، أصبح بالإمكان تصميم ميكروسكوب يكبّر العينة بدرجة عالية جدًّا قد تصل إلى مئات الآلاف من المرات، وهي تعتمد على استخدام موجة الإلكترون. وقد تحدثنا عن الميكروسكوب الإلكتروني الماسح (SEM)، والميكروسكوب الإلكتروني النفاذ (TEM) .

ثمّ توالت الاكتشافات حتى ظهر لنا في عام ١٩٨١م ميكروسكوب جديد من حيث فكرة عمله، وإمكاناته، وقدراته، واستخداماته المتنوعة، ويعرف هذا الميكروسكوب باسم الميكروسكوب النفقي الماسح. ويعدّ جهاز الميكروسكوب النفقي الماسح من الأجهزة الأساسة في علم تقنية النانو، حيث

ساعد في دراسة المواد على المستوى الذري، وفي بناء التراكيب النانوية وفحصها. وتعتمد فكرة عمله على مبدأ النفق الكمي (quantum tunneling) ، فعندما يقترب طرف المجسّ الموصل للكهرباء من السطح المراد فحصه يطبق فرق جهد بين السطح وطرف المجس، بحيث يسمح بمرور الإلكترونات عبر نفق بينهما يعرف باسم التيار النفقي .(tunneling current) ويعتمد التيار النفقي على موضع المجسّ للسطح، كما يعتمد على فرق الجهد المطبق، والكثافة الإلكترونية الموضعية للعينة.



شكل رقم(٢-٢٣) المجهر النفقي الماسح (STM) (٢٤).



شكل(٢-٢٦) صورة لسطح من الذهب مأخوذة بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح (STM) توضح كيفية التفاف الذرات الفردية مكونة السطح (٩٢).

(٢-٧-٤)مجهر القوة الذرية (Atomic Force Microscopy-AFM)

يعدّ مجهر القوة الذرية، أو مجهر القوة الماسح(انظر:الشكلين رقم ٢-٢٧ ، و٢-٢٨) أحد مجاهر المجسّ المسحية ذات التحليل العالي جدًّا، ولها قدرة تحليل تصل إلى أجزاء من النانومتر. ويمكن بواسطته الحصول على صور طبوغرافية ثلاثية الأبعاد للعينة المدروسة.

شكل رقم(٢-٢٧) مجهر القوة الذرية (AFM)(٣٢).

كما يعدّ من الأدوات الرئيسة في تصوير وقياس وتحريك المادة عند مستويات النانو. ويحتوي مجهر القوة الذرية على ذراع طولها في حدود الميكرو، وفي نهايتها يوجد رأس حاد منحني (مجسّ) ذو نصف قطر انحناء في حدود نانومتر، ويصنّع هذا الرأس عادة من مادة السليكون، أو نترات السليكون، ويستخدم في مسح سطح العينة المدروسة. وعندما يقترب الرأس الحاد؛ ليتلامس مع سطح العينة تنشأ قوى بين الرأس والسطح؛ فيؤدي ذلك إلى إحداث انحراف في ذراع المجهر طبقاً لقانون هوك. وتقاس هذه القوة عن طريق انعكاس شعاع ليزر على سطح الذراع عند انحرافها، ومن ثم يسقط هذا الشعاع على شبكة من الكاشفات الثنائية الضوئية؛ لتكوين صورة دقيقة للسطح(٣٢). وعند تحريك الرأس الحاد للمجهر على السطح، وبارتفاع ثابت، فقد يؤدي ذلك إلى تصادم الرأس بالسطح المتعرج للعينة؛ مما يتسبب في إحداث تلف للرأس؛ ولذلك تعمل تغذية راجعة – في أغلب الحالات– في الجهاز، بحيث تضبط المسافة بين الرأس وسطح العينة، وتحافظ على وجود قوة ثابتة بين الرأس والعينة. وتثبت العينة عادة على قضيب كهروضغطي ماسح؛ مما يمكّن العينة من الحركة إلى أعلى

ويمتاز مجهر القوة الذرية بدقة عالية في قياس ارتفاع يصل إلى نصف إنجستروم، حيث تعتمد دقته على مدى دقة الإبرة، ولكنه قد يفشل في دراسة الأسطح ذات الخشونة الظاهرة، والتي تزيد خشونتها عن ١٠ ميكرونات. وبعكس المجهر الإلكتروني الماسح، أو النفّاذ، فإنّ مجهر القوة الذرية لا يعطي معلومات عن نوع الفلزات، أو تركيزها في العينة. ولكنه في المقابل يمكن بواسطته التمييز بين المواد عن طريق خصائصها الفيزيائية، مثل: الالتصاق، والاحتكاك، والخصائص الكهربية الساكنة، والمغناطيسية، والتوصيلية.

كما لا يحتاج مجهر القوة الذرية إلى خطوات معينة؛ لتجهيز العينات المدروسة وتحضيرها، وإنما توضع مباشرة تحت إبرة المجسّ. وتتفاوت طبيعة المواد المدروسة، حيث تتضمّن الفلزات، والمركبات، والمواد البلاستيكية، والبيولوجية.

بالاضافة الى ما تم ذكره اعلاه هناك تقنيات اخرى تستخدم للكشف ودراسة التراكيب النانوية ومنها :

1. **حيود الأشعة السينية** :(XRD) تستخدم هذه الطريقة لتحديد التركيب البلوري وتركيب المواد النانوية من خلال تحليل طريقة تبعثر الأشعة السينية.

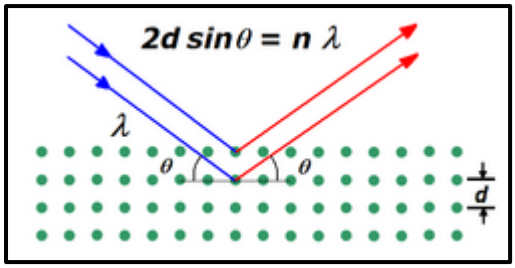
تقنيات حيود الأشعة السينية هي عائلة من التقنيات التحليلية التي تعطي معلومات حول البنية البلورية، والتركيب الكيميائي، والخواص الفيزيائية للمواد والطبقات الرقيقة للمواد البلورية. تعتمد هذه التقنيات على مراقبة تبعثر شدة حزمة من الأشعة السينية الساقطة على العينة كتابع لزاوية السقوط والتبعثر، والاستقطاب، وطول الموجة أو القدرة.

مبدأ العمل لهذه التقنية : الأشعة السينية هي أشعة كهرومغناطيسية ذات طاقات فوتونية في مجال 100 eV إلى 100 إلكترون فولت. وفي تطبيقات الحيود، تستخدم فقط الأشعة السينية ذات الأطوال الموجية القصيرة (الأشعة السينية القاسية) في مجال بضعة أنكستروم إلى 0.1 أنكستروم (1 إلكترون فولت إلى 120 إلكترون فولت). ولأن طول موجة الأشعة السينية يقارن مع حجم الذرات، فإنها نظريا مناسبة لكي تسبر الترتيب البنيوي للذرات والجزئيات في طيف واسع من المواد. فالأشعة السينية القوية يمكنها اختراق المواد عميقا وتزويدنا بمعلومات عن بنية المادة.

تتفاعل الأشعة السينية بالدرجة الأولى مع الإلكترونات في الذرة. فعندما تصطدم الفوتونات في الأشعة السينية بالإلكترونات، تحيد بعض فوتونات الحزمة الساقطة عن اتجاهها الأصلي. إذا لم يتغير طول موجة الأشعة السينية الساقطة (أي أن فوتونات الأشعة السينية لم تفقد أي طاقة) تسمى العملية بالتبعثر المرن أو تبعثر طومسون حيث يتحول زخم الحركة فقط في عملية التبعثر. وهذه هي الأشعة السينية التي نقيسها في تجارب الحيود والتي تقدم لنا معلومات عن توزع الإلكترونات في المواد. ومن جهة أخرى، في عملية التبعثر غير المرن

أو تبعثر كومبتون تنقل الأشعة السينية بعض طاقتها إلى الإلكترونات فيكون للأشعة السينية المحادة طول موجة مختلف عن طول موجة الأشعة السينية الساقطة.

تداخل الأمواج المحادة من الذرات المختلفة مع بعضها البعض ويتعدل توزع الشدة الناتجة بهذا التآثر. فإذا كانت الذرات مرتبة بانتظام كما في البلورات، فإن الأمواج المحادة ستتكون من تداخل أعظمي (ذُرى) بنفس تناسق توزع الذرات. إن قياس نموذج الحيود يتيح لنا استنتاج توزع الذرات في المادة. الذرى في صورة الحيود تتعلق مباشرة بالمسافات الذرية. ليكن لدينا شعاع من الأشعة السينية يتفاعل مع الذرات المرتبة بانتظام كما يظهر في الشكل ثنائي الأبعاد المجاور. الذرات الممثلة بنقط خضراء تشكل عدة مستويات في البلورة (الخطوط السوداء في الشكل اليميني). يعرف شرط حدوث الحيود من أجل مجموعة من المستويات الشبكية المتباعدة بمسافة d بقانون براغ:



$$n\lambda = 2d \sin\theta$$

λ هي طول موجة الأشعة السينية، θ زاوية التبعثر، n عدد صحيح يمثل مرتبة ذروة الحيود. وقانون براغ هو من أهم القوانين المستخدمة في فهم معطيات حيود الأشعة السينية.

2. التحليل الطيفي للأشعة تحت الحمراء باستخدام تحويل فورييه (FTIR) : تستخدم هذه التقنية ضوء الأشعة تحت الحمراء لتحديد التركيب الكيميائي للمواد النانوية من خلال تحليل الطريقة التي تمتص بها وتعكس ضوء الأشعة تحت الحمراء.

يتم جمع طيف الأشعة تحت الحمراء للعينة عن طريق تمرير شعاع ضوء الأشعة تحت الحمراء عبر العينة. يكشف فحص الضوء المرسل عن مقدار الطاقة الممتصة عند كل طول موجي. يمكن القيام بذلك باستخدام أداة تحويل فورييه لقياس جميع الأطوال الموجية في وقت واحد. من هذا ، يمكن إنشاء طيف نفاذية أو امتصاص يشير إلى أطوال موجات الأشعة تحت الحمراء التي تمتص العينة. يكشف تحليل خصائص الامتصاص هذه عن تفاصيل حول التركيب الجزيئي للعينة.

3. تحليل المساحة السطحية باستخدام تقنية Brunauer-Emmett-Teller Method (BET) :

وهي تقنية فيزيائية و التي تعتمد على امتزاز ولفظ غاز خامل على سطح المادة الكيميائية من اجل قياس المساحة السطحية لهذه المادة وتعتبر هذه التقنية مهمة جداً لدراسة حالة السطح للمركبات النانوية ومركبات اخرى و تستخدم في تطبيقات مختلفة كالتحفيز، تُستخدم هذه النظرية (BET) لقياس مساحة سطح المواد الصلبة أو المسامية. فهو يوفر معلومات مهمة عن بنيتها الفيزيائية حيث تؤثر مساحة سطح المادة على كيفية تفاعل تلك المادة الصلبة مع بيئتها. غالبًا ما ترتبط العديد من الخصائص مثل معدلات الذوبان والنشاط التحفيزي واحتباس الرطوبة ومدة الصلاحية بمساحة سطح المادة. يعد تحليل مساحة السطح أمرًا بالغ الأهمية

لتصميم وتصنيع المواد الصلبة، وهو أحد أكثر الطرق المستخدمة على نطاق واسع في توصيف المواد.

لتحديد مساحة السطح، يتم تبريد العينة الصلبة، تحت فراغ، إلى درجة الحرارة المبردة (باستخدام النيتروجين السائل). تتم اضافة غاز النيتروجين (كمادة ممتزة نموذجية) إلى العينة الصلبة (الممتزة) بزيادات مسيطر عليها. بعد كل جرعة من غاز النيتروجين، يسمح للضغط النسبي (P/P0) بالتوازن، ويتم تحديد وزن (W) للنيتروجين الممتز. تصف معادلة BET بدقة مخططًا خطيًا قدره $1/((P_0/P)-1)$ مقابل P/P0 والذي بالنسبة لمعظم المواد الصلبة، باستخدام النيتروجين كمادة ممتزة، يقتصر على منطقة محدودة من متساوي الحرارة الامتزاز، عادة مدى P/P0 من 0.05 إلى 0.35. من هذه العلاقة والرسم البياني يتم تحديد وزن النيتروجين (Wm) الذي يشكل طبقة أحادية من التغطية السطحية. يمكن حساب المساحة السطحية الإجمالية للعينة من ميل وتقاطع مخطط BET باستخدام معادلة BET ومساحة المقطع العرضي الجزيئي المعروفة لجزيء النيتروجين.

$$1/(W((P_0/P-1)) = 1/(W_mC) + ((C-1)/(W_mC))(P/P_0)$$