الفصل الخامس

أدوات تكنولوجيا النانو

الفصل الخامس – أدوات تكنولوجيا "النانو"

المقدمة

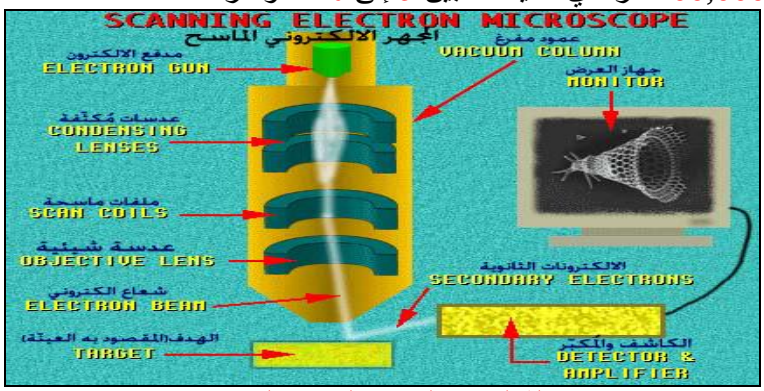
على الرغم من أن العلماء الأوائل إستطاعوا إكتشاف البكتيريا بفضل الميكروسكوب الضوئي المزوَد بعدسات مسنفرة، إلا أن العلماء في وقتنا الراهن إستطاعوا إكتشاف العديد من الأشياء بالغة الصغر أو تمكنوا من رؤية آفاق في الكون كانت مجرد خيال مثل النجوم والكواكب ، فالتقدم التكنولوجي الهائل مكنَهم من دراسة وتحليل العديد من التراكيب الكيميائية ورؤية أجسام بالغة الضآلة والصغر كمواد وتراكيب "النانو" وذلك عن طريق إستخدام أدوات بالغة التعقيد وفائقة الكفاءة. والميكروسكوبات الضوئية العادية لا يمكن الإعتماد عليها لرؤية الجزئيات وذلك لإنها لا تملك الكفاءة والقوة اللازمة حيث أن قدرتها التكبيرية لا تزيد عن 1000 مره تقريباً من الحجم الحقيقي. ويبلغ طول أصغر الأجسام التي ممكن أن تراها العين بشكل منفصل بواسطة الضوء الأبيض حوالي 200 نانومتر. لذلك **يستخدم الباحثون الإلكترونات** لإكتشاف أسرار الجزيئات والمركبات ومواد "النانو" ولا يستخدمون الضوء.

يستخدم العلماء العديد من الميكروسكوبات الإلكترونية لدراسة الأحجام فائقة الصغر عند مستوى "النانو" وذلك حسب نوع العينة والمعلومة المراد التوصل إليها ويستمد الميكروسكوب الإلكتروني طاقته من الإلكترونات لتكبير العينات ما بين 10 مرات و1,000,000 مرة ومن هذه الميكروسكوبات ما يلي:

1. الميكروسكوب الإلكتروني الماسح (Scanning Electron Microscope-SEM)
2. الميكروسكوب الإلكتروني النافذ(Transmission Electron Microscope-TEM)
3. الميكروسكوب الإلكتروني التحليلي (Analytical Electron Microscope-AEM)
4. ميكروسكوب المسبار الماسح (Scanning Probe Microscope – SPM)
5. ميكروسكوب المسح النفقي (Scanning Tunueling Microscope-STM)
6. ميكروسكوب التصوير الذري (Atomic Force Microscope-AFM)

1. الميكروسكوب الإلكتروني الماسح[80] Scanning Electron Microscope-SEM:

- يمكن تعريفه بأنه جهاز علمي يستخدم إشعاع من الإلكترونات عالية الطاقة يتم تركيزه بواسطة مجال كهرومغناطيسي علي سطح العينة لفحصها ودراسة خواصها، وبما أن الإلكترونات ذات طاقة أعلى من الضوء فإنه يمكن تحريكها بتأثير المجالات الكهرومغناطيسية.
- يكَون الميكروسكوب الماسح صورة ثلاثية الأبعاد تظهر كما لو كانت تحت الميكروسكوب المجسم أو الميكروسكوب التشريحي المستخدم في البيولوجيا.
- تبدو الصورة قطاعاً قطاعاً في شكل شبكي
- يوفر هذا النوع من الميكروسكوبات صورة تتميز بدرجة دقة وضوح عالية ويمكن القول بأنها تتمتع بقدرة على تكبير الأشياء من 10 مرات إلى 100,000 مرة أي ما يعادل بين 5 إلى 10 نانومتر



الشكل (29) المجهر الإلكتروني الماسح

التركيب البنائي للميكروسكوب[81]

1. قاذفات الإلكترونات (Electron Gun)
2. المصعد (الأنود) (Anode)
3. العدسة المغناطيسية (Magnatic Lens)
4. ملفات المسح (Scanning Coils)
5. كاشف الإلكترونات (Electron Detector)
6. غرفة العينة (Spciment Champer)

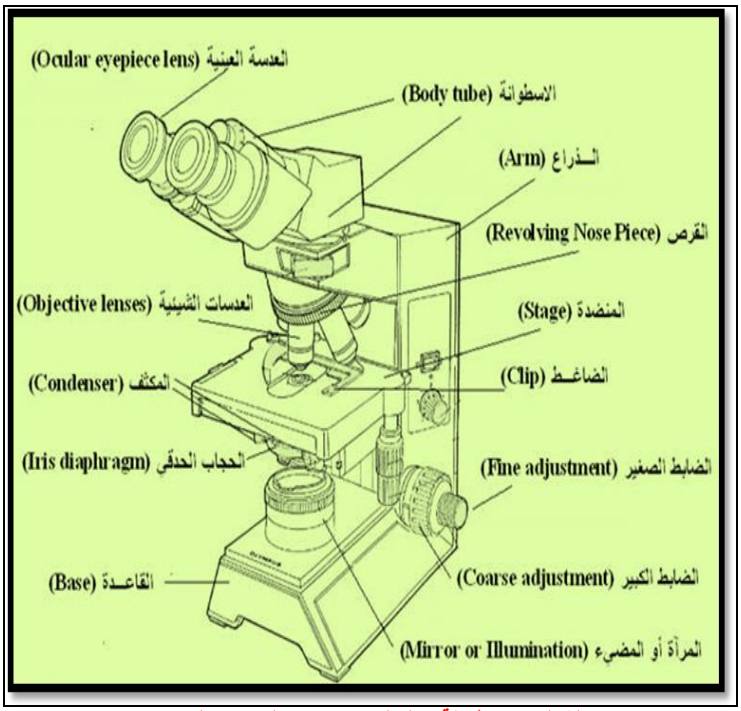
---

[80] ليندا ويليامز، د.واد آدمز ، تكنولوجيا النانو ترجمة الدكتور خالد العامري، مكتبة الأسرة ، 2008 ص.80.
[81] سعد يوسف أبو عزيز، المجهر الإلكتروني في تطبيقات النانو، مجلة النانو ، العدد الثالث، 2009، تصدر عن معهد الملك عبدالله لتقنية النانو، جامعة الملك سعود

- ✓ تعتمد قدرة التمييز (resolving power) في الميكروسكوب الضوئي على الطول الموجي وعلى حيود الضوء عند فتحة العدسة، ففتحة العدسة الكبيرة تتمتع بقدرة تمييز أكبر من الصغيرة.
- ✓ إن الصور الأبيض والأسود التي تظهر على شاشة الكمبيوتر عبارة عن قراءة للإلكترونات التي تنبعث من العينة نفسها بحيث تبدو المناطق التي تعكس الكثير من الإلكترونات باللون الأبيض الزاهي، في حين أن المناطق الأخرى تبدو داكنة.
- ✓ لا بد من وضع العينة تحت عمود تفريغ داخل الميكروسكوب بالشكل الملائم خشية أن تنكمش أو يتبدل شكلها ، ولا بد أن تجفف عينات الإختبار البيولوجية وتغلف كي لا تتقلص وتتجعد.
- ✓ يجب أن يكون الميكروسكوب موصول بالكهرباء حيث أن الميكروسكوب الإلكتروني الماسح يستعين بالإلكترونات لعرض العينات.

طريقة عملة

1. عند وضع العينة على الشريحة لا بد وأن تغطى بطبقة رفيعة للغاية من مادة فلزية بواسطة التغليف بالرش، وهو الذي يمدها بالقدرة اللازمة على التوصيل.



الشكل (30) طريقة عمل الميكرسكوب الإلكتروني الماسح

2. بعد طرد الهواء خارج الميكروسكوب، يرسل مصدر إلكتروني حزمة من الإلكترونات هائلة الطاقة عبر سلسلة من العدسات المغناطيسية التي تسلط الإلكترونات على بقعة صغيرة للغاية.
3. ينبعث شعاع الإلكترونات من المهبط (Cathode) أو قاذفات الإلكترونات (Electron Gun) بفعل الحرارة الناتجة عن تسخين الفتيلة بتطبيق جهد كهربائي بين طرفيها.
4. يتم تحميل الشعاع بتسليطه من خلال المصعد في مسار رأسي داخل المجهر المفرغ تماما من الهواء الى غرفة العينة ويتم تركيز الشعاع بواسطة عدسات مغناطيسية (Magnetic Lenses)
5. قبل أن يصطدم الشعاع الإلكتروني بسطح العينة يمر من خلال ملفات المسح التي تقوم بتحريك الشعاع على سطح العينة.
6. يمر الشعاع في عدسة شيئية لتركيز الشعاع على الجزء المطلوب فحصه وعندما يصطدم الشعاع الإلكتروني بسطح العينة ينبعث منها بعض الإلكترونات الثانوية (Secondary Electrons)
7. تقوم مجموعة من ملفات المسح بتحريك الحزمة المسلطة ذهاباً وإياباً عبر عينة الإختبار صفا بعد صف، وما أن تصطدم حزمة الإلكترونات بكل منطقة على العينة، نجد أن الإلكترونات الأخرى الموجودة في ذرات العينة والطبقة الخارجية تنطلق من السطح .
8. ترتد بعض الإلكترونات الساقطة على سطح العينة وتسمى الإلكترونات المرتدة (Back scattered Electrons).
9. تقوم الكواشف بتجميع الإلكترونات وتكبيرها وإرسالها إلى شاشة إظهار العينة على شكل صورة فيديو رقمية.
10. النظام الإلكتروني الماسح يستخدم في الحصول على معلومات عن طبيعة العينة وذلك بتحليل الإلكترونات الثانوية المنبعثة من العينة والإلكترونات المرتدة الناتجة عن إرتطام الشعاع الماسح بسطح العينة.

كيفية تجهيز العينة:

- بما أن الميكروسكوب يعتمد في عملة على إستخدام الأنابيب المفرغة من الهواء لتمرير الشعاع الإلكتروني الماسح لسطح العينة فيجب عمل تجهيزات خاصة للعينة كما يلي:

- تجفيف العينة من الماء لمنع تبخر الماء داخل عمود الجهاز المفرغ من الهواء.
- إذا كانت العنية معدنية فإنها لا تحتاج إلى تجهيزات خاصة لأن المعادن من الموصلات.
- إذا كانت العينة غير معدنية فيجب تحويلها إلى معدن وذلك بتغطية سطح العينة بطبقة رقيقة من مادة موصلة وهذا يتم باستخدام جهاز يسمى (Sputter Coater) أي جهاز التغطية بالرش.

- يستخدم هذا الجهاز مجالاً كهربائيا مع غاز الأرجون، فتوضع العينة في غرفة صغيرة مفرغة تماماً من الهواء ويقوم المجال الكهربائي مع غاز الآرجون بتحرير إلكترون من كل ذرة من ذرات غاز الآرجون فتصبح الذرات موجبة الشحنة فتنجذب إلى رقائق الذهب السالبة الشحنة وتتفاعل ذرات الأرجون المتأينة مع ذرات الذهب وتستقر على سطح العينة لتكسوة بغلاف رقيق من الذهب وبذلك تكون العينة صالحة للفحص والإختبار.

مزايا الميكروسكوب الإلكتروني الماسح وإستخداماته في تطبيقات "النانو"

1. يتميز الميكروسكوب الإلكتروني الماسح بدقة الوضوح العالية مقارنة بالمجهر الضوئي أذ يعتمد في الحصول على المعلومات على توظيف عدة إشارات منها " الإلكترونات الثانوية والإلكترونات المرتدة والأشعة السينية والفوتونات الضوئية"
2. درجة التكبير لهذا الميكروسكوب تتراوح ما بين خمس مرات إلى 500000 مره مما يساعد بدرجة عالية على فحص وإختبار العينة
3. يستطيع هذا الميكروسكوب فحص مواد ومعدات "النانو" إذ أن دقة التباين عالية ويمكنه إظهار صورة واضحة جداً على شاشته بدقة 0،6 نانو متر، وهذا بدوره يساعد العلماء والمهندسين على التشخيص الدقيق في حالة وجود تغير في طبيعة التركيب البنائي الداخلي او الإصابة بأعطال ناشئة عن الجهود العالية أو الحرارة
4. بالإمكان إستخدام المجهر الإلكتروني في فحص ودراسة خصائص مواد "النانو" وأيضاً في مراقبة الجودة في خطوط إنتاج أجهزة نانوية .

2. الميكرسكوب الإلكتروني النافذ[82] Transmission Elctron Microscope- TEM

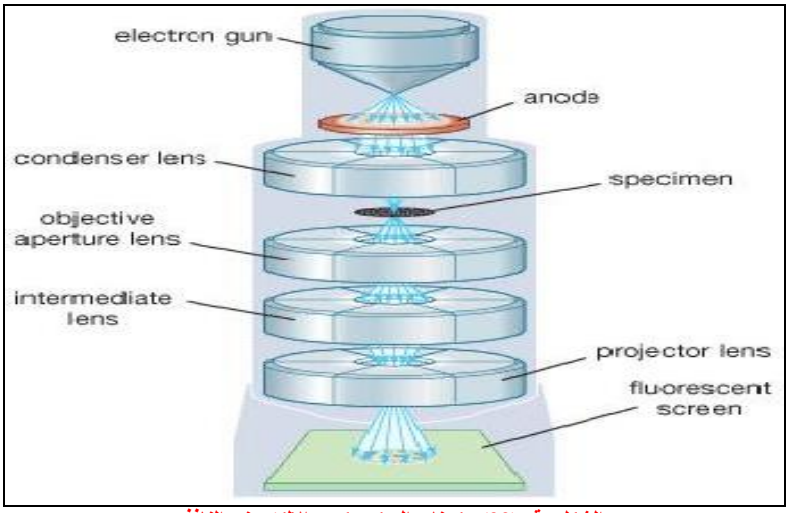
- يستطيع هذا الميكروسكوب إختراق العينة بحيث تنفذ حزمة عريضة من الإلكترونات عبر شريحة من العينة مكونة صورة لها.
- هذه الإلكترونات تحيد بفعل المغناطيسية عند إستخدام الميكروسكوب النافذ لتكوين الصور، مثلما يحيد الضوء في عدسة الميكروسكوب العادي.
- بهذه الطريقة يمكن تسليط الإلكترونات حتى تظهر صورة واضحة على الشاشة.
- يشبه الميكروسكوب النافذ الميكروسكوب الضوئي العادي حيث أن المناطق السميكة بالعينة تمتص حزمة الاشعة أو تفرقها ومخلفة مناطق داكنة، في حين أن المناطق الرقيقة تبدو فاتحة اللون

[82] ليندا ويليامز، د.واد آدمز ، تكنولوجيا النانو ترجمة الدكتور خالد العامري، مكتبة الأسرة ، 2008 ص.82.

- بما أن معظم العينات البيولوجية تتألف من الكربون والنيتروجين والأكسجين والهيدروجين فالفرق في كثافة بنية العينة فيها لا يكون كافياً لتحديد اللون الداكن من الفاتح تحت الميكروسكوب النافذ.
- لتبدو العينة داكنة في الصور يقوم علماء البيولوجيا في بعض الأحيان برشها كيميائيا بذرات فلز لتضيف سماكة إلى ذرات أو جزيئات معينة بالعينة
- يتمتع هذا الميكرسكوب بقدرة تكبيرية تفوق الميكرسكوب المركب بحوالي 1000 مرة وتفوق العين المجردة بحوالي 500000 مرة
- تتراوح درجة دقة الوضوح بهذا الميكروسكوب بين 0.1 إلى 0.2 نانومتر تقريبا وهي المسافة العادية التي تفصل بين ذرتين في الأجسام الصلبة.

الشكل (31) الميكرسكوب الإلكتروني النافذ
www.stanford.edu/group/snl/tem.htm

- تعتمد الميكروسكوبات الإلكترونية على حزمة أو شعاع إلكتروني عالي الطاقة لرؤية العينات الدقيقة (عند مستوى "النانو") وتحديد خصائصها الجوهرية مثل:
  1. الحجم والشكل
  2. القوام ومدى التعقيد (شكل العينة)
  3. التكوين (عدد العناصر والمركبات)
  4. **الخصائص(نقطة الإنصهار والصلابة والقوة والقدرة على التوصيل والتفاعل)**



الشكل رقم (32) مكونات الميكرسكوب الإلكتروني النافذ

www.britannica.com/EBchecked/media

3. الميكروسكوب الإلكتروني التحليلي -Analytical Electron Microscope AEM

- يطلق إسم الميكروسكوب الإلكتروني التحليلي على الميكروسكوب النافذ الذي يحتوي على أدوات تحليلية مثل الأشعة السينية والمطياف الإلكتروني (Electron spectrometer)
- يقوم هذا النوع من الميكروسكوبات بقياس الصور وتكوينها باستخدام الأشعة السينية والتي تنشأ عندما يتكون عدد كبير من الإلكترونات على الذرات
- يستطيع هذا الميكروسكوب تحديد حجم الطاقة التي تفقدها الإلكترونات عندما تخترق المواد
- لهذا الميكروسكوب القدرة على التمييز بين ذرات الكربون والنيتروجين أو بين ذرات الحديد والنيكل الأمر الذي يتيح للعلماء تصوير تركيب المادة بالتفصيل
- قدرة الميكروسكوب التحليلي الفائقة تمد العلماء بإمكانيات تصوير ذات دقة وضوح عالية تصل إلى 0.1 نانومتر.

الشكل (33) الميكرسكوب الإلكتروني التحليلي

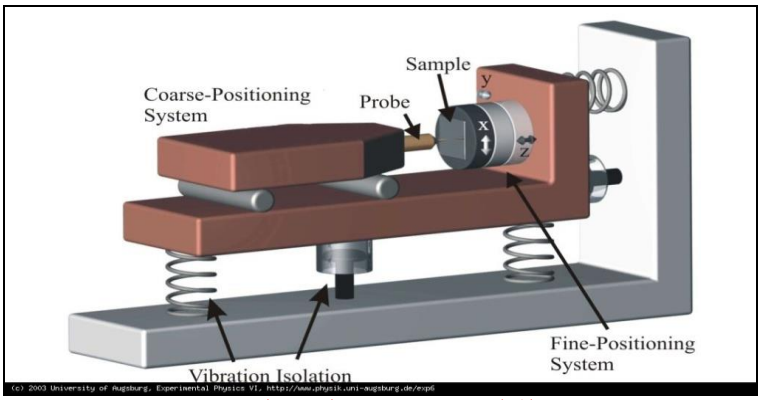
ncem.lbl.gov/frames/aem.

- يستطيع هذا الميكروسكوب توضيح التركيب الذري لإحدى المواد وروابطها الجزيئية وقدرتها على توصيل الكهرباء.
- بإستخدام الميكروسكوب الالكتروني التحليلي يستطيع الباحثون الحصول على معلومات تفصيلية عن التركيب الجزئي لمواد "النانو" وخصائصها الجوهرية وأداء الأشياء المصنوعة منها، كما يتيح هذا الميكروسكوب للعلماء دراسة المواد المعقدة وفحصها بشكل تفصيلي واستغلالها في تطبيقات التكنولوجيا.
- من المجالات التي يستخدم فيها التصوير بالميكروسكوب الإلكتروني التحليلي الأبحاث الطبية البيولوجية والطبقات الذكية (وهي طبقات تستجيب للمؤثرات الخارجية كالضغط ودرجة الحرارة) وأيضا الأبحاث المتعلقة بخلايا الوقود وتراكيب "النانو" المغناطيسية والبلورات الكمية شبة الموصلة. بحيث تتطلب هذه التطبيقات معلومات تفصيلية عن تركيب الذرة وعن الأسطح البينية والقيود والأخطاء المحتملة.

4. ميكروسكوبات المسبار الماسح (Scanning Probe Microscopes – SPM):

- يعتبر من الأدوات العلمية التي يستخدمها العلماء لدراسة خصائص سطح المادة بداية من المستوى الذري وحتى مستوى "النانو".
- هذا الميكروسكوب له طرف مسباري يعرف باسم الابرة (stylus) وتكون إما مثبتة أو موضوعة عند نهاية شعاع صغير يقوم بتتبع التغيرات التي تطرأ على سطح العينة وتسجيلها، وذلك عند تحريك هذا السطح بنمط شبكي.
- تمسح الأبرة سطح العينة فتسجل الإرتفاع والتغيرات الكهربية التي تطرأ على السطح أو غيرها.
- يعمل هذا النوع من الميكروسكوبات مثل الفونوغراف القديم الذي كان يقوم بتشغيل الأسطوانات بواسطة طرف الأبرة.

- تقاس حركة الصعود والنزول للإبرة بواسطة شعاع ليزر والذي يعكس قمة الشعاع.
- يقاس إهتزاز الأبرة بالمكشاف البصري الذي يلتقط صورة للسطح.
- يمكن قياس فارق الجهد بين العينة والإبرة وأيضاً مقدار التيار المتدفق بينهما.
- تتحرك العينة في وضعية التصوير المسح بواسطة البلورات الكهروضغطية (Piezoelectric Crystals).

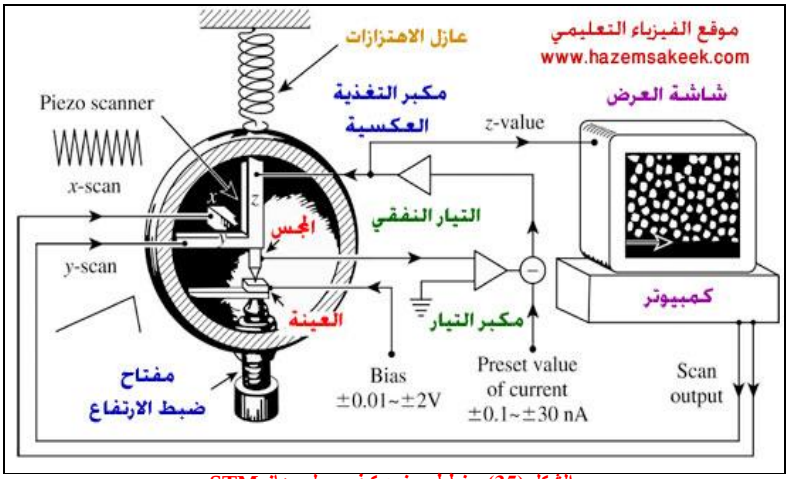


الشكل (34) ميكروسكوب المسبار الماسح
www.physik.uni-augsburg.de

5. ميكرسكوب المسح النفقي (Scanning Tunneling Microscope)[83]

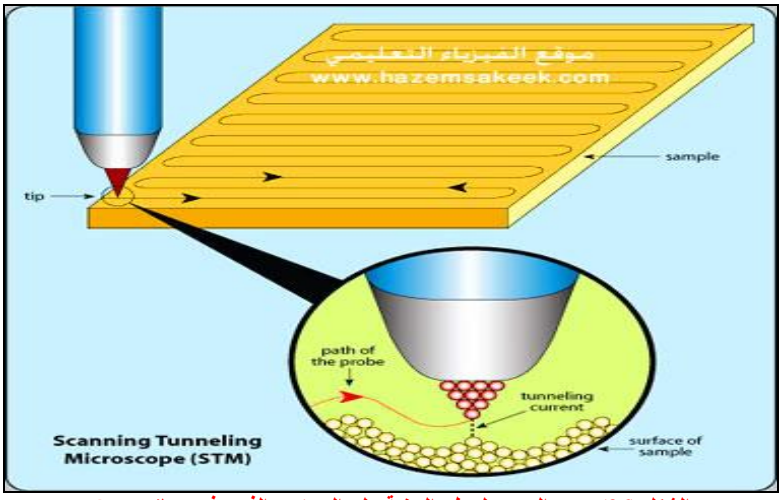
- هو أول ميكروسكوب مسبار ماسح أخترعه كل من "جيردبينيك" و "هايريش رورار" سنة 1981م في أحد مختبرات شركة IBM بمدينة زيورخ السويسرية واللذان حصلا على جائزة نوبل سنة 1986 لإختراعه
- لهذا الميكروسكوب إبرة مسبار ثابتة لقياس الخصائص الكهربية لسطح المواد
- يمكن لهذا الميكروسكوب مسح أنواع مختلفة من الصور حسب نوع إبرة المسبار المستخدمة
- تعتبر أسهل طريقة للمسح هي تصوير تركيب السطح مع ابقاء الإبرة على مسافة ثابتة بعيدة عن العنية مثل قطر ذري واحد أو 0.2 نانومتر، كما ترفع الإبرة أو تخفض للحفاظ على تدفق التيار بقيمة ثابتة معينة والذي يضمن ثبات المسافة بين الإبرة وسطح العينة.
- عادة يتولد الجهد بين إبرة المسبار وسطح العينة الموصل للكهرباء فيؤدي ذلك إلى تدفق الإلكترونات عبر الفجوة (النفق)

[83] ليندا ويليامز، د.واد آدمز ، تكنولوجيا النانو ترجمة الدكتور خالد العامري، مكتبة الأسرة ، 2008 ص.84



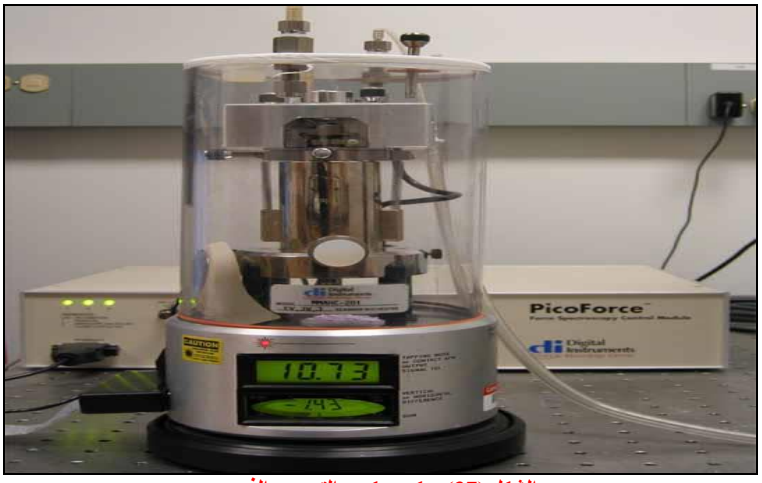
الشكل (35) مخطط يوضح كيف يعمل جهاز STM

- حين تتحرك الإبرة صعودا أو هبوطا بالنسبة للسطح للحفاظ على تدفق التيار النفقي بإنتظام، فإنها تقوم كذلك برسم وتسجيل طوبوغرافيا العينة (سطحها)
- يعتمد مقدار التيار المتدفق على المسافة بين المسبار والسطح
- لا بد أن تكون العينة موصلة للكهرباء كي يمكن المحافظة على تدفق التيار
- إن العينات العازلة التي لا توصل التيار الكهربائي (مثل المطاط) لا يمكن تصويرها بواسطة ميكروسكوبات المسح النفقي ما لم تغطى أولاً بطبقة فلزية أو بأي طبقة أخرى موصلة للحرارة.
- تتميز الأبرة بحدتها، كما أن عرض طرفها لا يزيد عن ذرة واحدة. وهذا يعني أن ميكرسكوب المسح النفقي يسهل على العلماء رؤية كل ذرة على حدة وتحديد مواقعها بدقة وضوح عالية.
- يمكن إستخدامه لإلتقاط صور الأسطح الموصلة بدرجة دقة وضوح تصل إلى نحو 0.2 نانومتر.
- إنها تتسبب في حدوث التفاعلات الكيميائية وتكوين الأيونات عن طريق سحب الإلكترونات المفردة من الذرات ثم إعادتها للكهرباء ثانية.



الشكل (36) مسح المجس لسطح العينية على المستوى الذري في جهاز STM

6. ميكروسكوب التصوير الذرى(Atomic Force Microscope- AFM)



الشكل (37) ميكروسكوب التصوير الذري

- يستعين هذا الميكروسكوب بالليزر الذي يعكس الجانب الخلفي من إبرة المسبار وذلك لإيجاد موقع الأبرة الموضوعة على حزمة مرنة[84].
- تتسبب المواضع المنخفضة والمرتفعة الموجودة على سطح عينة الإختبار في رفع إبرة المسبار ثم هبوطها ثانية مع حركة سير الإبرة فوق السطح.
- يعمل ميكروسكوب التصوير الذري بأوضاع مختلفة، مثل وضع الإحتكاك والذي تتنافر الذرات مع بعضها البعض عند الإحتكاك القريب، ومثل وضع

[84] لا يمكن رؤية ذلك بالعين المجردة

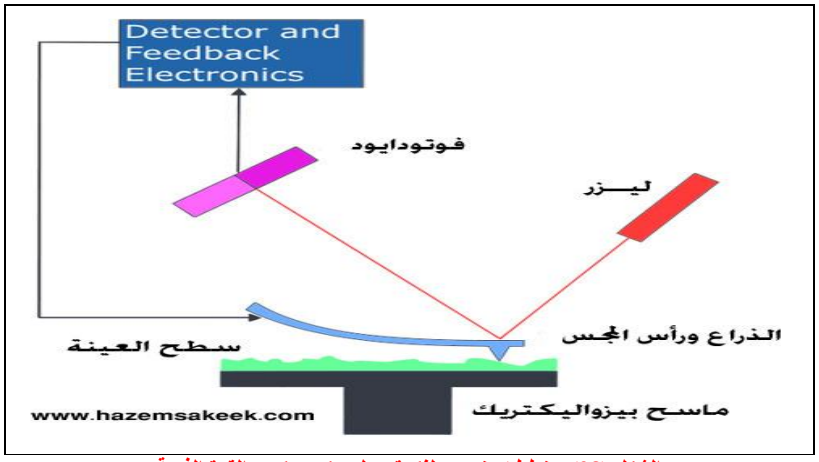
عدم الإحتكاك، حيث يرفع المسبار فوق السطح بمسافة ضئيلة وتقاس قوى الجذب الضعيفة بين الذرات غير المحتكة ببعضها.

- ميكروسكوب القوة الذرية AFM - Atomic Force Microscope أو ميكروسكوب القوة الماسحة SFM - Scanning Force Microscopy هو ميكروسكوب ذو قدرة تحليلية عالية وهو أحد أنواع ميكروسكوبات المجسات الماسحة ، هذا الميكروسكوب له قدرة تحليل تصل إلى أجزاء من النانومتر حيث أنه يفوق إلى حد تكبير الميكروسكوبات الضوئية بأكثر من 1000 مرة. ويعتبر هذا الميكروسكوب متطوراً عن الميكروسكوب النفقي الماسح STM.[85]
- إن ميكروسكوب التصوير الذري له مقياسان لتحديد دقة الوضوح، أولهما مستوى المقياس والثاني الإتجاة العمودي على السطح.
- كلما كانت إبرة المسبار حادة (تصنع عادة من السليكون أو نترات السيكلون)، زادت دقة الوضوح، إذ إنها تستطيع النفاذ إلى أدق الفراغات.
- تعتبر إبرة أنبوب "النانو" الكربوني الحادة هي أحدث إبرة لميكروسكوبات التصوير الذري ، وتستطيع أن ترسم خطوط العينة بدقة متناهية
- تتحقق دقة الوضوح الرأسية في ميكروسكوب التصوير الذري بمقارنة الذبذبات النسبية للمسبار فوق السطح.
- من مصادر الذبذابات الخارجية : الأصوات والذبذبات الأرضية أو ذبذابات المباني والذبذبات الحرارية، ويشترط لتحقيق أفضل دقة وضوح رأسية توقف اهتزاز المسبار. لهذا السبب توضع العديد من المسابير على منضدة مقاومة للذبذبات أو تعلق بملفات مطاطية تقلل الاهتزاز الزائد.
- اخترع ميكروسكوب القوة الذرية (AFM) العالمين Quate و Gerber في العام 1986م
- وتوفر أول جهاز للاستخدام في المختبرات العلمية في العام 1986م. ويعتبر هذا الميكروسكوب الاكثر شهرة كأداة تكبير وقياس وتحريك على المستوى النانوي.
- وحديثاً تمكن علماء فيزيائيون في جامعة اوساكا في اليابان من استخدام ميكروسكوب القوة الذرية AFM في التعرف على هوية التركيب الكيميائي وتحديد نوع كل ذرة ومكان تواجدها على المخطط ثلاثي الابعاد لتضاريس سطح المادة على المستوى الذري. وقد اكتشف هؤلاء العلماء ان التفاعلات تشكل بصمة ذرية لتمييز الذرات بإستخدام ميكروسكوب AFM.

[85] ليندا ويليامز، د.واد آدمز ، تكنولوجيا النانو ترجمة الدكتور خالد العامري، مكتبة الأسرة ، 2008 ص.86

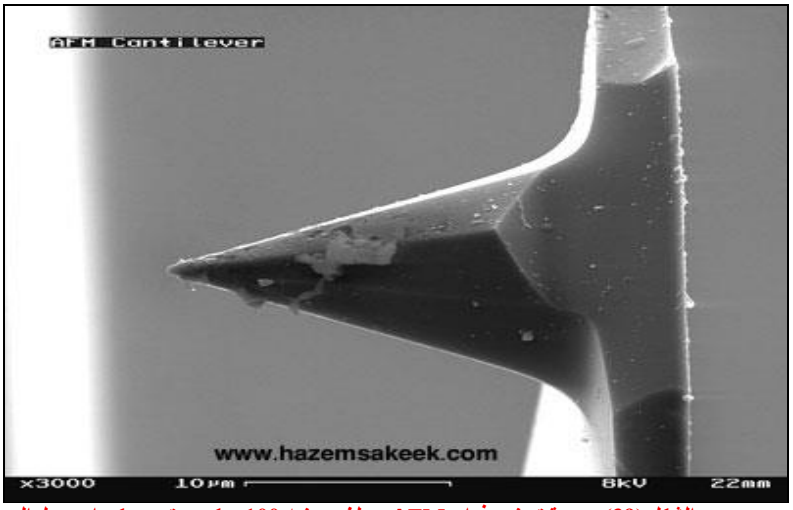
المبدأ الاساسي

- يتكون ميكروسكوب القوة الذرية AFM من ذراع cantilever في نهايته مجس probe مكون من رأس حاد يعرف بالـ tip يستخدم لمسح سطح العينة. تكون الذراع مصنوعة من مادة السليكون أو نيتريد السيليكون بنصف قطر في حدود بضع نانومترات. عندما يقترب رأس المجس من سطح العينة تتولد قوة بين رأس المجس وسطح العينة تؤدي هذه القوة إلى إنحراف في الذراع بناء على قوة هوك. وقد تكون القوة المتبادلة قوة ميكانيكية أو قوة فاندرفال أو قوة شعرية أو قوة كهروستاتيكية أو قوة مغناطيسية أو قوة رابطة كيميائية أو قوة كزيمار أو غيرها من أنواع القوة وهذا حسب نوع السطح الذي يتم دراسته. كما يمكن دراسة العديد من أنواع هذه القوة بإستخدام مجسات خاصة وعندها يسمى الميكروسكوب بإسمها مثل ميكروسكوب القوة المغناطيسية Magnetic Force Microscope –MFM أو ميكروسكوب المسح الحراري Scanning Thermal Microscope أو غيره. وفي كل هذه الميكروسكوبات تحدث القوة المتبادلة بإختلاف أنوعاها إنحراف في ذراع ميكروسكوب القوة الذرية يقاس هذا الإنحراف بواسطة إنحراف شعاع ليزر عن مرآة مثبتة على ذراع الميكروسكوب. وشعاع الليزر المنعكس يرصد على مصفوفة خطية من الفوتودايود. Photodiodes.
- وهناك طرق أخرى لقياس الإنحراف مثل مقياس التداخل الضوئي Optical Iner-ferometry ، أو بإستخدام بيزوالكترك أو مجس سعة كهربية. وحسب طريقة قياس الإنحراف يتم تصميم ذراع الميكروسكوب فمثلاً لو كانت طريقة القياس تعتمد على الكهرباء الإنضغاطية (بيزوالكتروك) فإن الذراع تصنع من مواد بيزوالكتروك. ولكن تعتبر طريقة قياس الإنحراف بشعاع الليزر الطريقة الأدق والأكثر استخداماً.



الشكل (38) مخطط توضيحي لفكرة عمل ميكروسكوب القوة الذرية

- إذا تم مسح المجس عند إرتفاع معين من سطح العينة فقد يكون هناك خطورة على المجس بأن يصطدم بالسطح، ولتجنب حدوث هذا يتم إستخدام تغذية عكسية للتحكم في المسافة بين المجس وسطح العينة لتحافظ على القوة المبتادلة بينهما ثابتة. ويتم تثبيت العينة على قاعدة من مادة بيزوالكترك تحرك العينة في الاتجاه z للحفاظ على قيمة ثابتة للقوة المتبادلة بين المجس وسطح العينة وكذلك تحريك العينة في البعدين x و y. وهناك أنواع أخرى من ميكروسكوبات القوة الذرية تستخدم 3 بلورات بيزوالكتريك كل بلورة مسؤولة عن إتجاه من إتجاهات الحركة الثلاثة. وفي التصاميم الحديثة يتم تثبيت الذراع على ماسح بيزوالكتريك أفقي في حين يتم تحريك العينة فقط في الاتجاهين x و y. وفي النهاية نحصل على خريطة لمساحة تمثل طبوغرافيا سطح العينة.



الشكل (39) صورة توضح ذراع AFM ويبلغ عرضه 100 ميكروميتر ويمكن ان يصل الى 20ميكروميتر او اقل.

- يمكن تشغيل ميكروسكوب القوة الذرية AFM بعدة أنماط تشغيل وهذا حسب الإستخدام المطلوب ونوع الفحص المراد. وبصفة عامة يمكن تقسيم أنماط التشغيل بنوعين هما نمط التشغيل الاستاتيكي أو نمط الإتصال والنوع الثاني هو نمط التشغيل الديناميكي أو نمط عدم الإتصال.

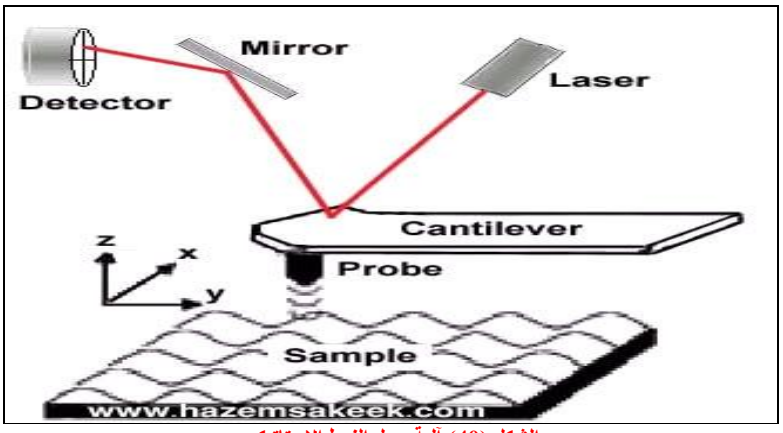
أنماط التشغيل وأخذ الصور Modes Imaging

ذكرنا أن هناك نمطين أساسيين من أنماط تشغيل جهاز AFM وهما:

1. النمط الإستاتيكي والذي يتم فيه سحب الذراع عبر سطح العينة ويتم مباشرة قياس تضاريس السطح من خلال الإنحرافات في الذراع.

2. النمط الديناميكي يتذبذب بالقرب من السطح عند تردد رنيني frequency resonance. ويتم قياس التردد والسعة والطور والتردد الرنيني من خلال القوة المتبادلة بين المجس وسطح العينة. هذه التغيرات في التردد بالنسبة للتردد المرجعي يعطي معلومات عن خصائص العينة.

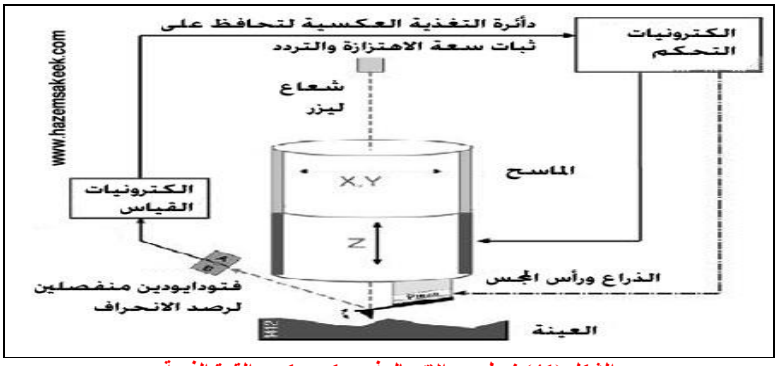
1- النمط الإستاتيكي أو نمط الإتصال Contact Mode



الشكل (40) آلية عمل النمط الإستاتيكي

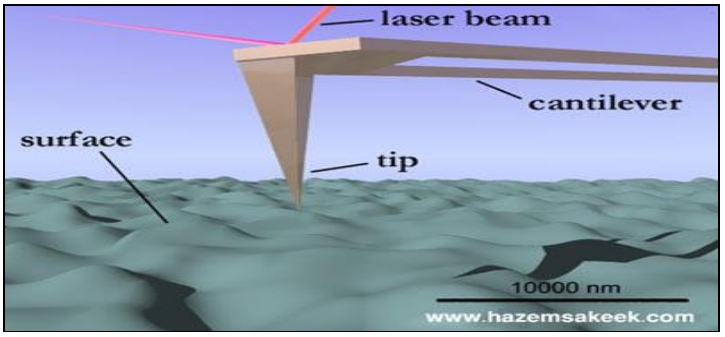
في هذا النمط يستخدم الإنحراف في رأس المجس كإشارة للتغذية العكسية ولإن قياس الإشارة في هذا النمط يتعرض للضجيج يتم إستخدام ذراع أقل صلابة لتكبير مقدار إشارة الإنحراف. ويقرب المجس من سطح العينة بحيث يحدث قوة تنافر تنتج عن الإلكترونات على سطح العينة وإلكترونات المجس. ويتم الحفاظ على ثبات مقدار القوة التنافرية هذه أثناء المسح من خلال المحافظة على بقاء الإنحراف ثابتاً.

2 - النمط الديناميكي أو نمط عدم الإتصال Non Mode Contact-



الشكل (41) نمط عدم الاتصال في ميكروسكوب القوة الذرية

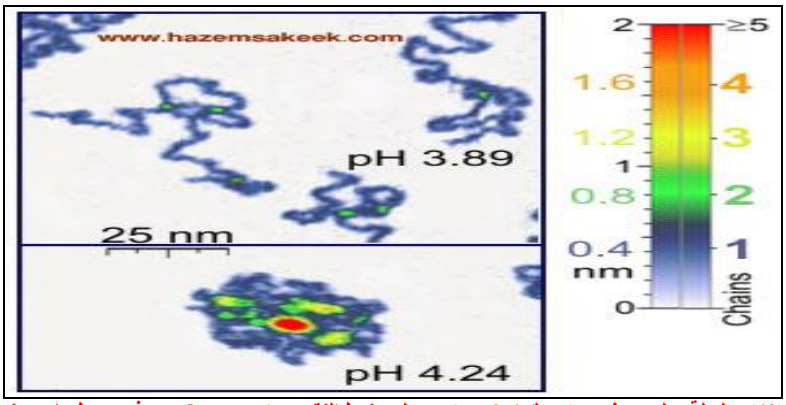
- في هذا النمط لا يكون المجس متصلاً مع سطح العينة. بل يكون الذراع متذبذب عند تردد أكبر بقليل من تردد الرنين حيث تكون سعة الذبذبة في حدود بضع نانومتر (أقل من 10 نانومتر). وتكون القوة المتبادلة بين المجس وسطح العينة هي قوة **فاندرفال**[86] Waals van der وهي تكون مسيطرة عند تلك المسافة أي في حدود 1 الى 10 نانومتر فوق سطح العينة، وهذه القوة تعمل على تقليل تردد الرنين للذراع. هذا الإنخفاض في تردد الرنين يستخدم في نظام التغذية العكسية الذي يقوم بالحفاظ على جعل سعة الإهتزازة ثابتاً من خلال إعادة ضبط المسافة بين المجس والسطح. وبقياس المسافة بين المجس والسطح أثناء المسح في الإتجاهين x,y يتم رسم الصورة لطبوغرافية سطح العينة بإستخدام برامج معدة لذلك.



- في هذا النمط لا يتعرض رأس المجس لأي ضرر لإنه لا يحتك مع سطح العينة مثلما يحدث مع النمط السابق. وهذا يجعل من نمط التشغيل الديناميكي مفضل أكثر وخصوصاً في حالة التعامل مع العينات الليّنة. ولكن في حالة العينات الصلّبة فإن الصور التي تؤخذ بكلا النمطين تكونا متماثلتين. ولكن إذا وجدت طبقة نانوية من مادة سائلة على سطح العينة فإن النمطين سوف يعطيا صوراً مختلفة بعض الشيء. لإن المجس في النمط المتصل يخترق طبقة السائل ليعطي صورة للسطح الأسفل منها، في حين أن النمط غير المتصل سوف يتذبذب فوق السطح ويعطي صورة لكلاً من السائل والسطح معاً.

[86] قوى فاندر فال هى التأثير المتبادل بين جزيئات الغازات (التجاذب) وهى تختلف عن التفاعل الكيميائى حيث ان تأثيرها بين الجزيئات ولكن التفاعل الكيميائى يكون بين ذرات الجزيئات لتكوين الجزيئات نفسها

3. نمط النقر Mode Tapping

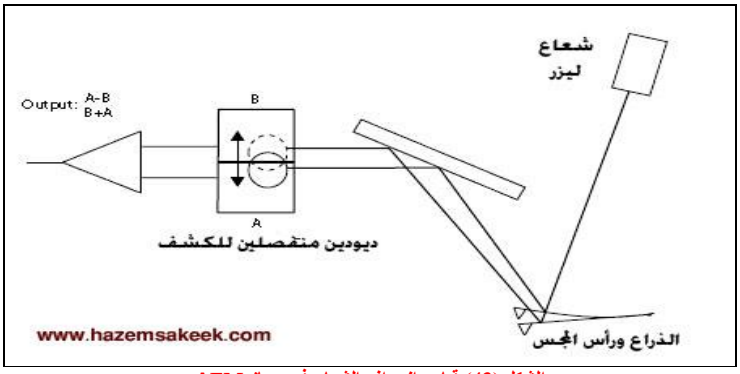


الشكل (42) سلسلة بوليمر مفرد، (بسمك nm0.4)، سجلت بنمط النقر mode Tapping في وسط مائي عند قيم pH مختلفة

- في أغلب الأحيان تتكوَن طبقة مائية فوق سطح العينة. ولأننا نجعل رأس المجس قريب جداً من العينة للحصول على إشارة لمقياس القوة المتبادلة فإنه من المحتمل أن يلتصق رأس المجس في العينة ولمنع هذا من الحدوث تم تطوير النمط الغير متصل بنمط النقر mode tapping وذلك للتغلب على هذه المشكلة.
- في نمط النقر تتذبذب الذراع للأعلى والأسفل بالقرب من تردد الرنين وتكون سعة الذبذبة أكبر من 10 نانو متر حيث تتراوح بين 100 و200 نانومتر. ونظراً للقوة المتبادلة التي تؤثر على الذراع عند إقترابها من سطح العينة فان قوة فاندرفال أو قوة ثنائيات القطب المتفاعلة أو القوى الكهروستاتيكية تتسبب في تغيير في سعة الذبذبة وتقل كلما أقترب رأس المجس من سطح العينة. ويتم التحكم بإرتفاع الذراع بواسطة بيزوالكترك تعمل على ضبط إرتفاع الذراع أثناء مسح العينة. ويعتبر نمط التشغيل هذا نمط متطور عن نمط عدم الإتصال.

عرض يوضح فكرة عمل ميكروسكوب القوة الذرية بالأنماط المختلفة

1. قياس إنحراف ذراع ميكروسكوب القوة الذرية



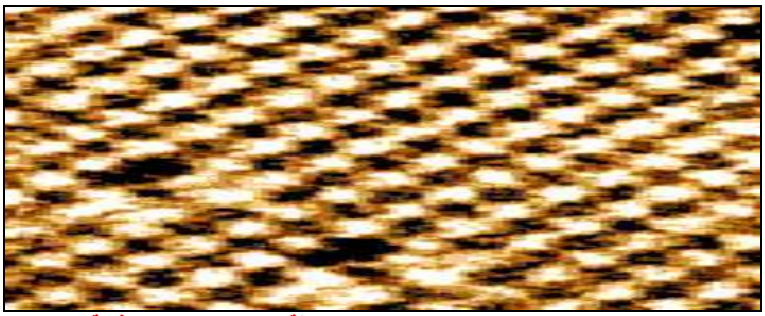
الشكل (43) قياس انحراف الشعاع في جهاز AFM

- ينعكس شعاع ليزر دايود على الجانب الخلفي للذراع ويتم التحكم فيه من خلال كاشف حساس للموضع (PSD) Position Sensitive Detector يتكون من فوتوديودين موضوعين بالقرب من بعضهما البعض والمخرج من كل فوتودايود موصل في مكبر Amplifier Differential. الإزاحة الزاوية للذراع تجعل أحد الديودين يلتقط إشارة أكبر من الديود الاخر. وهذا يعطي إشارة تتناسب مع إنحراف الذراع. وتصل حساسية الجهاز إلى كشف إنحراف أقل من 10 نانومتر. ويمكن تكبير التغير في زاوية الشعاع بزيادة طول مسار شعاع الليزر بضع سنتيمترات.

2. مطياف القوة Force Spectroscopy

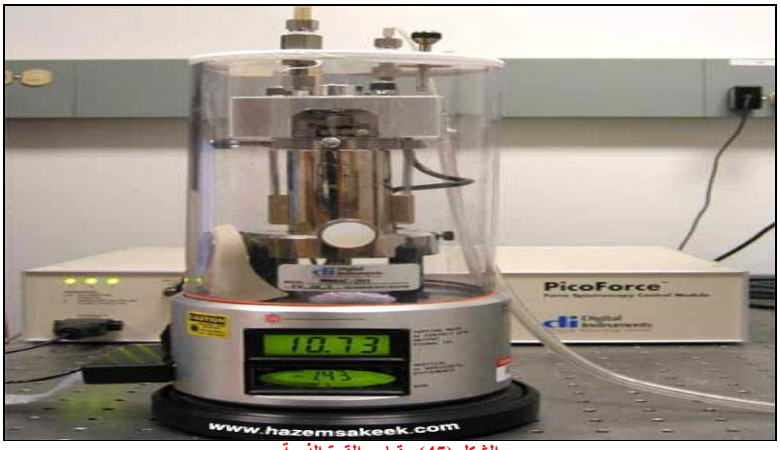
- بالإضافة إلى إستخدام ميكروسكوب القوة الذرية في الحصول على صور على المستوى الذري، يستخدم الميكروسكوب في تحليل القوة، فعلاقة قياسات القوة بين رأس المجس وسطح العينة كدالة في المسافة بينهم نحصل على نتائج تعرف بإسم منحنى القوة والمسافة curve force-distance. في هذه الطريقة يتم مد رأس المجس وسحبه عن سطح العينة اثناء مراقبة انحراف الذراع كدالة في إزاحة البيزوالكتريك. هذه الوظيفة أستخدمت في قياسات على المستوى النانوي مثل الروابط الذرية وقوى فاندرفال وقوى كايسمر وقوى التحلل في السوائل والجزيئات المفردة وقوى التمدد والتمزق. وهذه القوة صغيرة جداً في حدود البيكونيوتن piconewton ولا يمكن قياسها بأي جهاز آخر والآن أصبح قياسها بجهاز AFM عالي وبدقة تحليلية تصل الى 0.1 نانومتر. يمكن الحصول على قياسات مطياف القوة في كلا نمطي التشغيل الإستاتيكي والديناميكي.

3. التعرف على الذرات وتميزها



الشكل (44) صورة بلورة كلوريد صوديوم بواسطة ميكروسكوب القوة الذرية

- يستخدم مقياس القوة الذرية AFM للحصول على صور للذرات ولتحريكها أيضا على أسطح المواد. فالذرة على رأس المجس تتحسس الذرات ذرة ذرة على سطح العينة وتشكل قوة كيميائية مع كل ذرة. ولإن هذه التفاعلات تغير بشكل دقيق تردد إهتزاز رأس المجس، فإنها يمكن أن تقاس وترسم. وعلى هذا الأساس تم التميز بين ذرات السليكون والرصاص على سطح سبيكة، من خلال مقارنة البصمات الذرية وتكبيرها. حيث تم ملاحظة أن رأس المجس يتفاعل مع ذرات السليكون بقوة في حين يتفاعل مع ذرات الرصاص بقوة أقل. ولهذا فإن الذرات المختلفة يمكن أن تتميز في صورة مصفوفة أثناء مرور رأس المجس على سطح العينة.



الشكل (45) مقياس القوة الذرية

مزايا ميكروسكوب القوة الذرية

- ميكروسكوب القوة الذرية AFM له عدة مزايا عن الميكروسكوب الإلكتروني الماسح SEM. كما أنه ليس مثل الميكروسكوب الإلكتروني الماسح الذي يوفر صور ثنائية الأبعاد
- ميكروسكوب القوة الذرية يعطي صور ثلاثية الأبعاد للسطح،
- العينات لا تتطلب معالجة خاصة مثلما يحدث في الميكروسكوب الإلكتروني كتغطيتها بالكربون أو الذهب وهذا يفسد العينة
- الميكروسكوب يعمل في الظروف العادية في حين أن الميكروسكوب الإلكتروني يتطلب أن يعمل في الفراغ. وهذا جعل ميكروسكوب القوة الذرية جهازاً لدراسة الخلية الحية.
- ميكروسكوب القوة الذرية يمتلك قدرة تحليلية عالية تفوق قدرة SEM وSTM.

الشكل (46) اول ميكروسكوب قوة ذرية

عيوب ميكروسكوب القوة الذرية

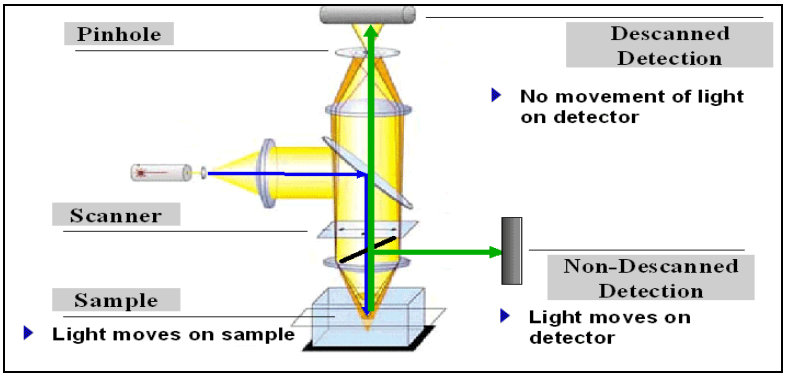
- من عيوب جهاز AFM بالمقارنة مع جهاز SEM هو حجم الصورة. فجهاز SEM قادر على مساحة تصل إلى بضع مليمترات وبعمق يصل إلى بضع مليمترات إلا أن جهاز AFM يعمل على مساحة (150X150) مايكرومتر وبعمق 10-20 ميكروميتر. ولكن هذا العيب تم التعامل معه من خلال تطوير أجهزة AFM بواسطة شركة IBM تعمل بمجسين متوازيين.
- كما إن إستخدام رأس مجس tip غير مناسب قد يعطي بعض العيوب في الصورة الناتجة.
- بالإضافة إلى أن AFM يعمل ببطء بالمقارنة معSEM الذي يعطي صورة حية للعينة فإن AFM يتطلب أن يعمل لبضعة دقائق حتى يعطي صورة. وهذا التأخير يؤدي إلى إنزياح حراري في الصورة مما يجعل ميكروسكوب القوة الذرية غير مناسب للقياسات الدقيقة للمسافات الطوبوغرافية على

الصورة. ويتم تطوير أجهزة AFM للتغلب على هذه المشكلة بأجهزة تعرف بإسم AFM video والتي تعمل بسرعة فاقت سرعة SEM.

- تتأثرصور AFM بالتخلف hysteresis في المواد البيزوالكتريك والتداخل في الإشارات الملتقطة لكل من x,y أثناء المسح ولكن هذا تم التغلب عليه بإستخدام برمجيات متطورة وفلاتر خاصة أو بإستخدام ماسحات متعامدة منفصلة.
- ماسح البيزوالكتريك Piezoelectric هو عبارة عن ماسح من مادة بيزوالكتريك وهي مواد تنضغط وتتمدد بتطبيق فرق جهد كهربي وهذه الخاصية تستخدم في تحريك رأس المجس على العينة بدقة عالية

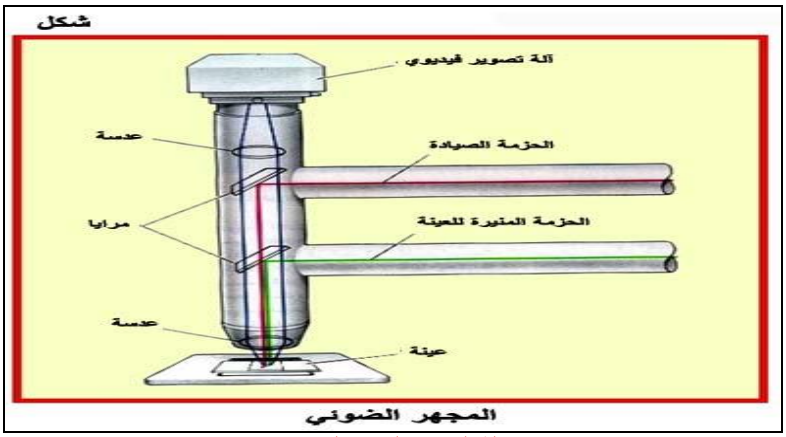
7. ميكروسكوب المسح بالليزر متعدد البؤره (Laser Scanning Confocal Microscope-LSM)[87]

- يستخدم هذا الميكروسكوب أشعة ليزر فوق بنفسجية ومرايا تصوير لمسح العينة، وثمة فتحة صغيرة تقلل المساحة التي يمكن رؤيتها من العينة وتقصرها على شريحة واحدة مركزة.
- يتولى الكمبيوتر مهمة جمع العديد من هذه الشرائح المفردة معاً لإعادة بنائها في شكل صورة ثلاثية الأبعاد على الشاشة.
- لا بد من إستخدام مصدر ضوء شديد مثل الليزر وذلك نظراً لإن فتحة الميكروسكوب تعيق مرور كمية كبيرة من الضوء، حتى نتمكن من تسليط ما يكفي من الضوء على عينة الإختبار.



الشكل (47) ميكروسكوب المسح بالليزر
research.stowers-institute.org

[87] ليندا ويليامز، د.واد آدمز ، تكنولوجيا النانو ترجمة الدكتور خالد العامري، مكتبة الأسرة ، 2008 ص.86



الشكل (48) المجهر الضوئي
www.ray-automation.com.

- يستخدم العلماء العديد من أوضاع التصوير متحد البؤرة لدراسة مختلف عينات الإختبار، وتعتمد هذه الطرق جميعاً على قدرة الميكروسكوب على تكوين صور ذات دقة وضوح عالية تسمى المقاطع البصرية (optical sections) في شكل متسلسل من خلال مقاطع سميكة أو عينات إختبار كاملة.
- تصل درجة دقة الوضوح في حالة الميكروسكوب متحد البؤرة الى نحو 1.2 نانومتر، ويمكن إستخدامها في حالة التصوير الفلوري القياسي.
- يتميز هذا الميكروسكوب عن الميكروسكوب الضوئي العادي بقدرته على التحكم في عمق المجال (لا تحصل على دقة الوضوح إلا في وجود الضوء المركز) وعلى معالجة إنحلال الصورة وعدم وضوحها
- له قدرة على جمع عدد من المقاطع البصرية من عينات الإختبار السميكة (والمعتمة في أغلب الوقت)
- يتميز بصور عالية الجودة ويمكن إستخدامه في العديد من المجالات البحثية.

8. أدوات أخرى مفيدة:

- لقد أستطاع العلماء بواسطة مسابير المسح والميكروسكوبات الإلكترونية المتطورة وذات دقة الوضوح العالية القدرة على قياس محتوى الذرات والجزيئات المنفردة الدقيقة، وبموجب هذه الأدوات العلمية المعقدة أستطاع العلماء والباحثين من تكوين تراكيب جديدة وإكتشاف خصائص غير معروفة وتقييم تطبيقات حديثة.

- وقد ظهرت العديد من الأنواع المختلفة من أدوات التصوير والمسح المستخدمة بعد تطبيق تكنولوجيا "النانو". والسؤال هنا: كيف نختار الأداة المناسبة من حيث دقة الوضوح والتفاصيل؟؟ وللإجابة لا بد من معرفة ما هي المادة الأولية التي نبدأ بها؟؟ فمثلاً، تختلف وسائل تصوير البروتينات عن وسائل تصوير الخزفيات!!
- تعد الميكروسكوبات الإلكترونية أفضل أنواع الأدوات العلمية، لإستخدامها في دراسة أجسام بمقياس دون ميكروني. وثمة عدد متنوع من هذه الميكروسكوبات قادرة على تصوير الذرات المنفردة في جسيمات ومواد "النانو" بالإستعانة بدقة وضوح تقل عن النانومتر. كما أن العلماء قادرين على إكتشاف التركيب الأولي إعتماداً على طاقة الإلكترون المفقودة وقياس الأشعة السينية المنبعثة عند المستوى الذري.
- بفضل ميكروسكوب المسح النفقي وميكروسكوب التصوير الذري، أمكن التوصل إلى ميكروسكوب المسبار الماسح الجديد والذي يقوم بقياس خصائص الأجسام وأشكالها عن طريق تقريب طرفها الحاد متناهي الصغر من الأسطح الصلبة وتتيح المسافة بين إبرة أو طرف الميكروسكوب وسطح المادة لميكروسكوب المسبار الماسح العمل في ظل ظروف يستحيل على تقنيات تحليل الأسطح التقليدية المعتمدة على الفراغ العمل فيها.

وعلى الرغم من ذلك، تساعدنا مسابير المسح الحديثة التي تفوقت على الأدوات العلمية البدائية في فحص العديد من الخصائص الأخرى غير طوبوغرافيا العينة ومن هذه الخصائص:

1. التركيب الإلكتروني في درجات الحرارة المنخفضة (التصوير بميكروسكوب المسح النفقي على سبيل المثال)
2. الخصائص البصرية (مثل التصوير بالميكروسكوب الضوئي الماسح قريب المدى والتي تتيح لنا الوصول إلى مقاييس دون الطول الموجي بين 50 و100 نانومتر).
3. درجة الحرارة (كميكروسكوب المسح الحراري) بالإستعانة بطرف يستشعر الحرارة لتصوير المجالات الحرارية للأجهزة الدقيقة الإلكترونية والبصرية الإلكترونية وقياس الخصائص الحرارية لجسيمات "النانو".
4. ثوابت العزل الكهربي (مثل ميكروسكوب المسح مخزن الشحنات) التي تمكن الباحث من تحديد المشاكل الموجودة بالأجهزة شبة الموصلة بدرجة دقة وضوح نانوية.
5. إعادة تشكيل الجزيئات البيولويجية والتعرف عليها (مثل ميكانيكا "النانو") حيث تستخدم المقاييس الميكانيكية في الجزئ الواحد لتوضيح ما يجري بالنسبة لما يتعلق بتركيب الذرات

6. التفاصيل الكيمائية التي تسَهل على العلماء مشاهدة العمليات البيولوجية والكيمائية والفيزيائية عند مستوى "النانو".

أدوات معالجة الجزيئات المنفردة:

- لتحريك وقياس خصائص الجزيئات المنفردة لا بد من إختراع أدوات لديها القدرة على تحريك وقياس هذه الخصائص لتجعل الإستفادة من إمكانيات مواد "النانو" المهمة.
- إذا إستطاع الأطباء التحكم في العمليات الكيميائية والفيزيائية للجزيئات على مستوى "النانو"، فالطب والبيولوجيا سيستفيدان كثيراً.
- إن العمليات الكيميائية والفيزيائية ، هي العمليات التي من شأنها تكوين الخلايا والأنسجة والأعضاء بالجسم. وبالتالي ممكن تعديل البوليميرات البنائية ومواد الإمتزاز والمواد المحفزة (مثل البروتينات والإنزيمات) كي تناسب الحاجة الطبَية لكل مريض على حدة.
- لقد كانت أغلب المقاييس الجزيئية مجرد حسابات تقديرية، وذلك بسبب عجز العلماء عن إختبار سلوك كل جزئ على حده، أما الآن بإستخدام الأدوات العلمية النافذة أصبح من الممكن إكتشاف كل جزيء منفرداً.
- تمكَن العلماء من التعرف على الخصائص الميكانيكية والكهربية الفريدة التي تميَز أنابيب "النانو" الكربونية بقياس كل أنبوب على حدة.
- أصبح بإمكان العلماء اليوم قياس درجة الإزاحة الجزيئية (أي التمييز بين الأجسام المضادة والأنتيجينات (antigens) أو شريطي الـDNA المتكاملين).
- تعد الحركة الجزيئية الطبيعية المسؤول الأول عن إستنساخ الـDNA والإنتقال الخلوي والإنقباض العضلي.
- تمكَن الملاقيط الضوئية العلماء من قياس الجزيئات بطريقة مباشرة، وكذلك تعديل توزيعات وديناميكيات عملية طي البروتين.