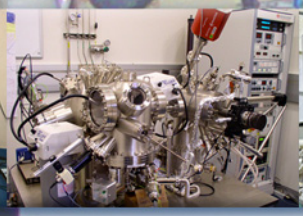
من اصدارات شبكة الفيزياء التعليمية

سلسلة تبسيط الفيزياء

الميكروسكوبات الإلكترونية

Electron Microscopes



الدكتور حازم فلاح سكيك

أستاذ الفيزياء المشارك

في جامعة الأزهر - غزة

شبكة

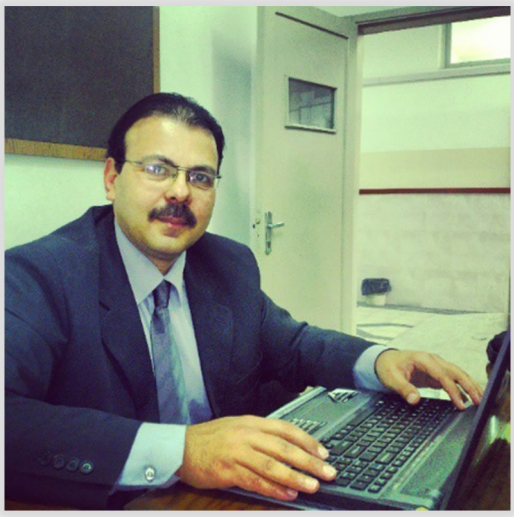
الفيزياء التعليمية

www.hazemsakeek.net

إهداء الى أبنائي

وطلابي

وكل محبي الفيزياء



الحمد الله رب العالمين والصلاة والسلام على سيد المرسلين على الحبيب المختار رحمة للعالمين سيدنا محمد وعلى آله وصحبه وسلم وبعد،،،

بتوفيق من الله سبحانه وتعالى؛ نقدم هذا الكتاب المتواضع الذي يقدم شرحا مبسطا عن الميكروسكوبات الإلكترونية بمختلف أنواعها مثل الميكروسكوب الإلكتروني الماسح والميكورسكوب الإلكتروني النافذ والميكروسكوب النفقي الماسح وميكرسكوب القوة الذرية، موضحا مكوناتها وكيف تعمل وانماط تشغيلها مدعمة بالصور والرسومات التوضيحية ومقاطع الفيديو من موقع اليوتيوب. هذه الأجهزة التي مكنتنا من رؤية الذرات وفحص أسطح المواد والتعرف على خواصها التي لم نكن نعرفها من قبل، وأصبحت أداة من أدوات البحث العلمي المتقدم التي تدخل في مختلف التطبيقات الطبية والصناعة والهندسية والعلمية. هذه الأجهزة التي اعتمدت فكرة عملها على الطبيعة الموجية للإلكترون، ولهذا سميت بالميكروسكوبات الإلكترونية.

يأتي هذا الكتاب ضمن سلسلة تبسيط الفيزياء التي تنتجها شبكة الفيزياء التعليمية. تهدف هذه السلسلة إلى تقديم الفيزياء بأسلوب علمي مبسط وسهل الفهم من خلال شرح تركيب واستخدامات الأجهزة الالكترونية الحديثة والمتطورة مع مراعاة كافة الفئات العمرية للقراء الكرام بحيث يتمكن طلاب المرحلة الثانوية وطلبة الجامعة الاستفادة مما هو مقدم ضمن هذه السلسلة.

أتمنى ان تكون محتويات هذا الكتاب مفيدة للقارئ وتقدم له معلومات جديدة ونافعة بإذن الله.

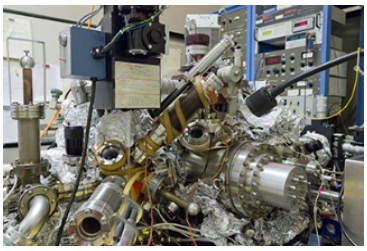
دكتور حازم فلاح سكيك
غزة 25 – 5 – 2013
www.hazemsakeek.net

المحتويات

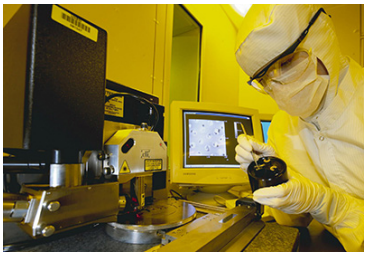
الميكروسكوب الإلكتروني الماسح
7 Scanning Electron Microscope (SEM)

الميكروسكوب الإلكتروني النافذ
21 Transmission Electron Microscope (TEM)

الميكروسكوب النفقي الماسح
41 Tunneling Electron Microscope (TEM)



ميكروسكوب القوة الذريـة
54 Atomic Force Microscope (AFM)



مقدمة

خلق الله سبحانه وتعالى الإنسان مختلفاً عن غيره من الكائنات، يقوده الفضول وحب التجربة لاكتشاف ما حوله والاستفادة منه مستخدما حواسه التي وهبها الله له. ومن هذه الحواس حاسة الإبصار التي يحتاجها ليرى بها الأشياء ويتعرف عليها ويدرسها. والعين البشرية لها حدود رؤية محددة لا يستطيع ان تتخطاها. لذا وجد الإنسان نفسه في حاجة إلى وسيلة أو طريقة لكي يكبر بها الأشياء الصغيرة لمزيد من الدراسة والاستكشاف. ومن هنا ظهرت فكرة الميكروسكوب (المجهر).

أنطوني فان ليفينهوك
Antonie van Leeuwenhoek

لكل شيء بداية فقد كانت بداية الميكروسكوبات مع عالم الأحياء الهولندي ليفنهينك Leeuwenhoek الذي تمكن من وضع نموذجا بدائيا للميكروسكوب باستخدام عدسة مكنته من تكبير الأشياء التي ينظر لها بعينيه ليتمكن من رؤية مكونات الانسجة والخلايا الحية، ولكن هذه العدسة لم تعطيها القوة التكبيرية المطلوبة لتمييز الجسيمات الأقل حجما من الخلايا والانسجة مثل الذرات.

حاول العلماء على مر العصور من إيجاد طرق مبتكرة للتكبير ولزيادة قوة الميكروسكوبات بالاعتماد على الطول الموجي للضوء المرئي وحتى الضوء ذو الاطوال الموجية الأقصر بوضع العدسات في زيوت لتعديل خواصها البصرية، ولكنهم على الرغم من كل ذل لم يتمكنوا الا من الوصول لقوة تكبيرية تعادل 2000 مرة من قدرات العين البشرية، ومن هنا بدأ التفكير في بدائل أخرى عن الضوء تكون أطوال موجاته اقصر لكي تستطيع ان تنفذ عبر مسافات اقل وتفصل لنا الأشياء، ولقد كان الاختيار هو الالكترونات تلك الجسيمات الدقيقة جدا وتحمل شحنة كهربية سالبة وتدور في مدارات مكممة حول أنوية الذرات، هذه الجسيمات أظهرت خواص موجية عندما تتحرر من الذرة وتتحرك بحرية. كما جاء في فرضية ديبرولي ان لكل جسيم موجة مصاحبة والموجة المصاحبة للإلكترون أقصر بألاف المرات من الضوء المرئي وبالتالي لها قدرة عالية للتفاعل مع اجسام دقيقة جدا ومن هنا جاءت تسمية

الميكروسكوب الضوئي

الميكروسكوبات بالميكروسكوبات الإلكترونية نسبة الى اعتمادها على الالكترونات.

يلزم للحصول على صورة مكبرة واضحة أن تكون طول موجة الأشعة المسلطة على الشيء أصغر من قياساته، لهذا يحدد طول موجة الضوء تبلغ طول موجة الضوء المرئي بين 380 نانومتر و750 نانومتر أما طول موجة شعاع الإلكترونات فيمكن التحكم فيه وتصغيرها إلى 3 نانومتر مثلا . بذلك نحصل بواسطة على صور أدق وتكبيره يصل مليون مرة. ويمكن لبعض الميكروسكوبات الإلكترونية أن تظهر حتى محيط ذرّات منفصلة في إحدى العينات.

الميكروسكوب الإلكتروني

إذا يختلف الميكروسكوب الإلكتروني عن الميكروسكوب العادي في أنه لا يحتوي على عدسات كما أنه يستخدم حزمة من الإلكترونات كمصدر للإضاءة، حيث تخترق حزمة الإلكترونات العينة المراد فحصها، ثم تستقبل على فيلم فوتوغرافي بالغ الحساسية حيث تتكون صورة للعينة، وعليه فإن فحص العينة لا يتم بواسطة العين كما في الميكروسكوب العادي، وإنما عن طريق فحص الصور الفوتوغرافية التي يتم تصويرها بواسطته.

سوف نقوم بشرح وتوضيح لأنواع مختلفة من الميكروسكوبات الإلكترونية المستخدمة في البحث العلمي والتكنولوجي وكلها تعتمد على حزمة من الالكترونات ولكن طريقة عملها مختلفة وكل نوع يستخدم لغرض خاص. سوف نتعرف على فكرة عملها واستخداماتها وطرق تشغيلها وتحضير العينة المراد فحصها.

الميكروسكوب الإلكتروني الماسح

Scanning Electron Microscopes (SEM)

الميكروسكوب الإلكتروني الماسح

Scanning Electron Microscopes (SEM)

في العام 1993، اتُهم Charles Smithart بقتل فتاة تبلغ من العمر 11 عاما في مدينة Glennallen في ألاسكا. شك المدعي العام في الجاني Smithart لأنه تواجد في موقع الحادث، ولكنه لم يمتلك الدليل القاطع على ارتكابه للجريمة. وهنا يأتي دور

الميكروسكوب الإلكتروني الماسح scanning electron microscope والذي يعرف بالاختصار SEM.

باستخدام كاشف طيف أشعة اكس الموجود في جهاز الميكروسكوب الإلكتروني الماسح، يتمكن الطبيب الشرعي من تحليل المعادن الصغيرة التي قد توجد في مكان الجريمة. ومن هنا تمكن الطبيب الشرعي المكلف في جريمة المدعى عليه Smithart من إيجاد بعض القطع المعدنية ذات الشكل الدائري والتي غالبا ما تنتج في عمليات لحام المعادن أو عند سنها. وبعد التحقيق وجد أن المدعى عليه Smithart يمتلك منصة لحام في محله الذي اعتاد في الكثير من الأحيان إصلاح الدراجات الهوائية لأطفال المنطقة التي يعيش فيها. وبهذا يتوجب التقدم بالشكر والتقدير لجهاز الميكروسكوب الإلكتروني الذي ساهم في تقديم الدليل القاطع على إدانة المتهم في الجريمة.

لماذا جهاز الميكروسكوب الإلكتروني الماسح وليس جهاز ميكروسكوب ضوئي عادي والمتوفر في المدارس والجامعات استخدم لفحص دليل إدانة Smithart؟ لسبب واحد فقط وهو إن الميكروسكوب الإلكتروني الماسح SEM يكبر الأشياء لدرجة تصل إلى 300,000 مرة. ويشير العلماء إلى هذا الرقم بمصطلح يعرف باسم قوة التكبير magnification power ويشار للرقم بالشكل التالي $300,000^{x}$، بالمقابل فان قوة التكبير في الميكروسكوب الضوئي لا تتجاوز بضعة مئات فقط. كما ان جهاز SEM يمتلك عمق تبئير كبير depth of field بالمقارنة مع الميكروسكوبات التقليدية، مما يعني إمكانية الحصول على صور ثلاثية الأبعاد وتحليلها، في حين أن الميكروسكوب الضوئي لا يوفر إلا صور سطحية ثنائية الأبعاد. وأخيرا فان جهاز SEM يستطيع أن يرى أكثر من السطح فهو أيضا يعطي معلومات على المركبات التي تدخل في تركيب العينة التي ينظر إليها. كل هذه الميزات أثبتت إنها مهمة جدا في فحص دليل الإدانة في الجريمة التي ارتكبها Smithart.

بالطبع فان جهاز SEM مثله مثل أي جهاز يمتلك بعض العيوب، والتي تتركز في ارتفاع ثمنه. فالجهاز الأرخص منه يكلف عشرات الآلاف من الدولارات وهناك أجهزة متقدمة أكثر يمكن أن يصل ثمنها إلى مئات آلاف الدولارات. كما إن أجهزة SEM أجهزة كبيرة وتحتوي على أجهزة دقيقة ومعقدة، وتتطلب خبرة ودراية عالية لتشغيلها. ونتيجة لهذا فان استخدام هذه الأجهزة مقصورا على المنشآت الصناعية والبحثية، وهذه الأجهزة لها تطبيقات واسعة وأصبحت من الأدوات الأساسية لأي مؤسسة بحثية أو منشأة صناعية.

سوف نقوم بشرح مفصل لفكرة عمل الميكروسكوب الإلكتروني الماسح SEM وكيف يستطيع أن يظهر الصور المكبرة بتفاصيل عالية الدقة والتي لا يمكن الاستغناء عنها في الأبحاث العلمية وخصوصا تقنية النانو وعلوم المواد والعلوم الأخرى. كما سوف نوضح الاكتشافات الحديثة التي طرأت على هذه التقنية. ولكن قبل الوصول لهذه النقطة لنبدأ بالبدايات مع هذا الجهاز.

صورة توضح حبيبات اللقاح أخذت بواسطة جهاز SEM وترى بوضوح عمق التبئير في الصورة لتبدو ثلاثية الأبعاد

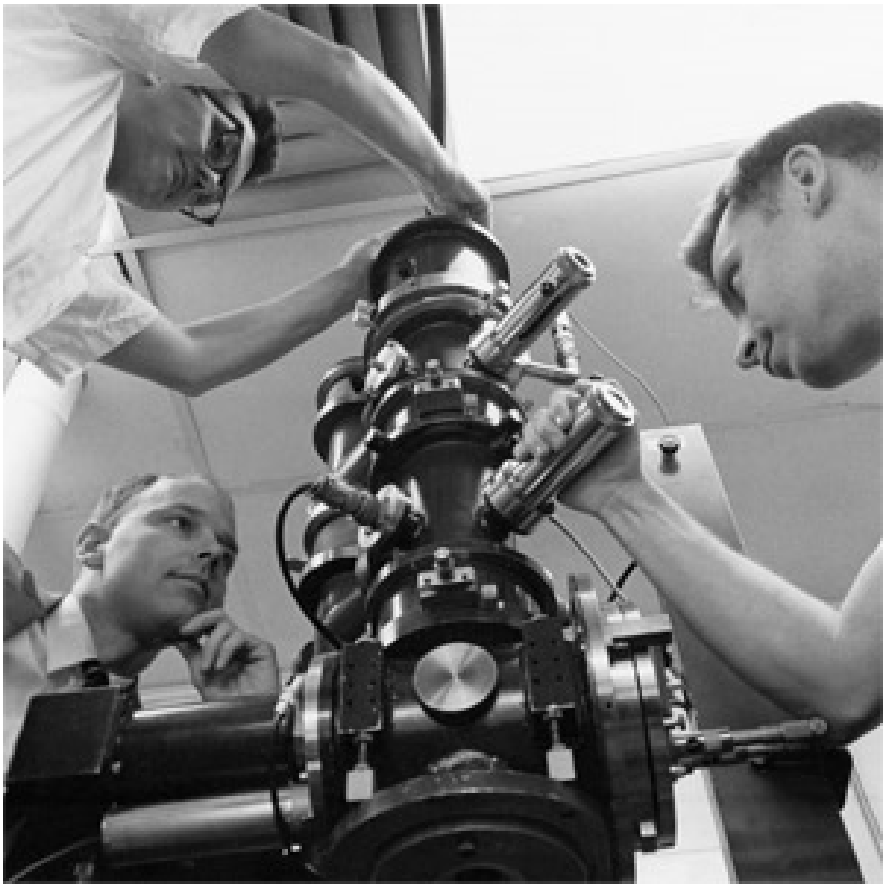
تاريخ الميكروسكوب الإلكتروني الماسح SEM

تطور جهاز SEM بدأ ببطء شديد ولم يظهر بشكل مفاجئ. فعندما تم الكشف عن هذه التقنية لأول مرة في عام 1935، توجه المهتمين لهذه التقنية إلى محترفي التسويق وطلبوا منهم أن يقيموا هذه الجهاز الجديد ومدى أهميته وتقدير مدى احتياج السوق له. وبعد الدراسات والأبحاث المتخصصة صدر تقرير خبراء التسويق والذي لم يكن متفائلا. فقدروا ان الحاجة لمثل هذا الجهاز لن تتجاوز العشرة أجهزة في كل

العالم. إلا انه تبين ان تقدير الخبراء لم يكن في محله. ولحسن الحظ لم يثني هذا التقرير العلماء والباحثين من العمل على تطوير هذه التقنية. والآن يصل عدد أجهزة SEM المستخدمة في مختلف المختبرات والمراكز البحثية لأكثر من 50,000 جهاز. والسؤال الآن كيف تمكن هذا الجهاز من الانتشار بهذا القدر بعد ان كانت التوقعات بانه لن يرى النور وأصبح أداة علمية هامة وأساسية.

لسبب بسيط هو أن العلماء قد وصلوا في تطويرهم للميكروسكوب الضوئي إلى أقصى قدرة له. فالميكروسكوب الضوئي موجود منذ عقود من الزمن، ولازلنا نراه في المختبرات المدرسية والمختبرات البحثية، إلا ان اعتماد هذه الأجهزة على الضوء شكل لها عقبة أمام التطور والوصول إلى قدرات تكبيرية كبيرة. فالضوء يميل إلى ان يحيد diffract أو ينحني عن مساره حول حواف العدسات، وهذا السلوك حدد القوة التكبيرية والقدرة التحليلية لها بشكل كبير لا يمكن التغلب عليه عند الوصول إلى أقصى قدرة تكبيرية أو تحليلية لهذه الأجهزة. ونتيجة لذلك بدأ العلماء في تطوير طرق جديدة لفحص العالم المجهري، ففي العام 1932، تم إنتاج أول جهاز ميكروسكوب إلكتروني نافذ transmission electron microscope والذي يعرف بالاختصار TEM وسوف نقوم بشرحه في موضوع منفصل. هذه الأداة توجه شعاع من الإلكترونات خلال العينة التي تفحص ومن ثم يتم عرض الصورة الناتجة على شاشة فلوريسنت. أجهزة TEM تشبه كثيرا أجهزة SEM والتي ظهرت بعد أعوام قليلة من اكتشاف جهاز TEM.

لم يتوقع العلماء بان جهاز SEM ضروريا بوجود جهاز TEM. وقد اتخذ البروفيسور C.W. Oatley في كلية الهندسة بجامعة كامبردج قرارا غير مترددا بتطوير جهاز الميكروسكوب الإلكتروني الماسح. وبالعمل المتواصل والمستمر بإشرافه وبمشاركة زملائه في الكلية وعدد من الطلبة تمكن C.W. Oatley من عرض إمكانيات هذا الجهاز الجديد من قوة تكبيرة وقدرة تحليلية وإظهار صور ثلاثية الأبعاد بجودة عالية. واليوم تستخدم أجهزة SEM بشكل يومي في العديد من التطبيقات من فحص العيوب في أشباه الموصلات في الدوائر الإلكترونية الدقيقة وحتى الكشف عن كيف تعمل الحشرات.



من اليسار إلى اليمين Oliver C. Wells وبجانبه Thomas E. Everhart و R.K. Matta في العام 1963 حول أول نجاح لتطوير جهاز الميكروسكوب الإلكتروني الماسح

المركبات الأساسية في جهاز الميكروسكوب الالكتروني الماسح SEM

بعد أن تعرفنا على إمكانيات جهاز SEM وتطوره تاريخيا. فإننا الآن أصبحنا جاهزين للتعرف على الأجزاء الأساسية التي يتكون منها هذا الجهاز وكيف تعمل مع بعضها البعض لإظهار الصور الدقيقة والمكبرة. ولكن قبل أن نبدأ في هذا أود أن أوضح إن أجهزة SEM عديدة ومتنوعة إلا إنها تتشارك كلها في الأجزاء الأساسية.

المدفع الإلكتروني Electron Gun

المدفع الإلكتروني ليس سلاحا كما يبدو من الاسم إلا انه عبارة عن سيل من الإلكترونات اللازمة لعمل جهاز SEM. المدفع الإلكتروني قد يكون أحد النوعين التاليين: المدفع الحراري وهو الأكثر شيوعا ويعمل من خلال استخدام الطاقة الحرارية في فتيلة وغالبا ما تكون فتيلة من التنجستين مثل تلك الموجودة في المصباح الكهربي لأنها تمتلك نقطة انصهار عالية، وتعمل الفتيلة عند ارتفاع درجة حرارتها

نتيجة لمرور تيار كهربي فيها على إرسال فيض من الإلكترونات توجه هذه الإلكترونات إلى العينة المراد فحصها. والنوع الثاني هو مدفع المجال الكهربي، حيث يعمل هذا من خلال إنتاج مجال كهربي كبير يعمل على سحب الإلكترونات من ذرات المادة التي ستنتج الإلكترونات. المدفع الإلكتروني بنوعيه يوضع عادة أما في أعلى الجهاز أو في أسفله ويقوم بإطلاق سيل الإلكترونات على العينة المراد فحصها. هذه الإلكترونات في العادة لا تذهب إلى المكان المطلوب بشكل تلقائي ومن هنا نحتاج إلى توجهها وهذا يقوم به العدسات.

العدسات Lenses

يستخدم جهاز SEM عدسات مثل الميكروسكوب الضوئي لإظهار صور دقيقة ومفصلة. والعدسات في هذه الأجهزة تعمل بشكل مختلف تماما. فهي ليست مصنوعة من الزجاج بل هي عدسات مصنوعة من مغناطيسات قادرة على توجيه مسار الإلكترونات. وبفعل ذلك تقوم هذه العدسات بتوجيه الإلكترونات والتحكم في مسارها، مما يضمن ان تصل الإلكترونات إلى المكان المطلوب بدقة.

غرفة العينة Sample Chamber

غرفة العينة في جهاز SEM هو المكان الذي يتم فيه وضع العينة المراد فحصها. ولان العينة يجب ان تكون ثابتة تماما ولا تتعرض لأي حركة حتى تظهر الصور دقيقة وواضحة، فان غرفة العينة يجب ان تكون قوية ومعزولة عن أي اهتزازات. وفي الواقع، فان أجهزة SEM حساسة للغاية ولهذا يتم تركيب هذه الأجهزة وتثبيتها في الطابق الأرضي في المبنى. وبالإضافة إلى وظيفة غرفة العينة في الحفاظ على العينة ثابتة فإنها أيضا تلعب دورا أساسيا في تحريك العينة بزوايا محددة لفحص أجزاء مختلفة فيها دون الحاجة إلى إعادة تثبيتها في كل مرة يراد النظر إلى جزء أو زاوية مختلفة من العينة.

صورة توضح غرفة العينة

الكواشف Detectors

هنا قد تعتقد ان الكواشف تشبه العدسة العينية في الميكروسكوب الضوئي إلا ان الأمر أكثر تعقيدا فالكواشف المستخدمة في جهاز SEM ترصد تفاعل سيل الإلكترونات مع العينة بعدة طرق مختلفة. فعلى سبيل المثال كواشف Everhart-Thornley ترصد الإلكترونات الثانوية، وهي تلك الإلكترونات المتحررة من السطح الخارجي من العينة. هذه الكواشف قادرة على إنتاج أدق الصور لسطح العينة. وهناك كواشف أخرى مثل كواشف الإلكترونات ذات الاستطارة الخلفية backscattered electron وكواشف أشعة اكس والتي تمكن العلماء من تحليل العينة ومعرفة المركبات الكيميائية الموجودة في العينة.

مفرغة الهواء Vacuum chamber

يتطلب تشغيل جهاز SEM العمل في الفراغ حيث ان الإلكترونات يمكن ان تصطدم بجزئيات الهواء ولا تصل إلى العينة إضافة إلى ان هذه الإلكترونات قد تدفع جزئيات الهواء لان تتفاعل مع سطح العينة وبالتالي إفساد العينة وتغير ملامحها.

وكما هو الحال في العديد من الأجهزة فان SEM ليس جهاز يعمل من خلال جمع هذه الأجزاء فقط، ولمعرفة كيف يظهر SEM الصور تابع عزيزي القارئ القراءة

كيف يعمل جهاز الميكروسكوب الالكتروني SEM؟

هذه الصورة عبارة عن صورة وردة تظهر تحت الميكروسكوب الإلكتروني الماسح وهي في الحقيقة عبارة عن تركيب نانوي ثلاثي الأبعاد. قام العلماء بإنتاج مواد جديدة بتقنية النانوتكنولوجي nanotechnology وهذه الوردة عبارة عن silicon carbide و gallium

يمكن تشبيه فكرة عمل جهاز SEM بآلة نسخ المفاتيح. فعندما تطلب نسخة إضافية لمفتاح من صانع المفاتيح فانه يقوم بوضع المفتاح الأصلي في مكان وتقوم الماكينة

بتتبع التفاصيل الدقيقة للمفتاح وتضعها على المفتاح الخام لينتج في النهاية نسخة طبق الأصل عن المفتاح الأصلي. لاحظ أن النسخ لا يحدث في نفس اللحظة إنما يتم على شكل تتبع لطرف وتطبيقه على الطرف الأخر. يمكنك الآن أن تتخيل العينة تحت الفحص هي المفتاح الأصلي. يأتي هنا دور جهاز SEM في استخدام شعاع الإلكترونات الناتج عن المدفع الإلكتروني وتوجيهه إلى العينة ومسح سطح العينة ليقوم بعمل نسخة طبق الأصل ولكن هنا تظهر لك النسخة على شاشة تلفزيون. وبدلا من إن يقوم الشعاع الإلكتروني بمسح سطح العينة في بعد واحد فانه يقوم بمسح ثلاثي الأبعاد لينتج لك صورة ثلاثية الأبعاد بكل التفاصيل من تجاويف وخدوش وشقوق.

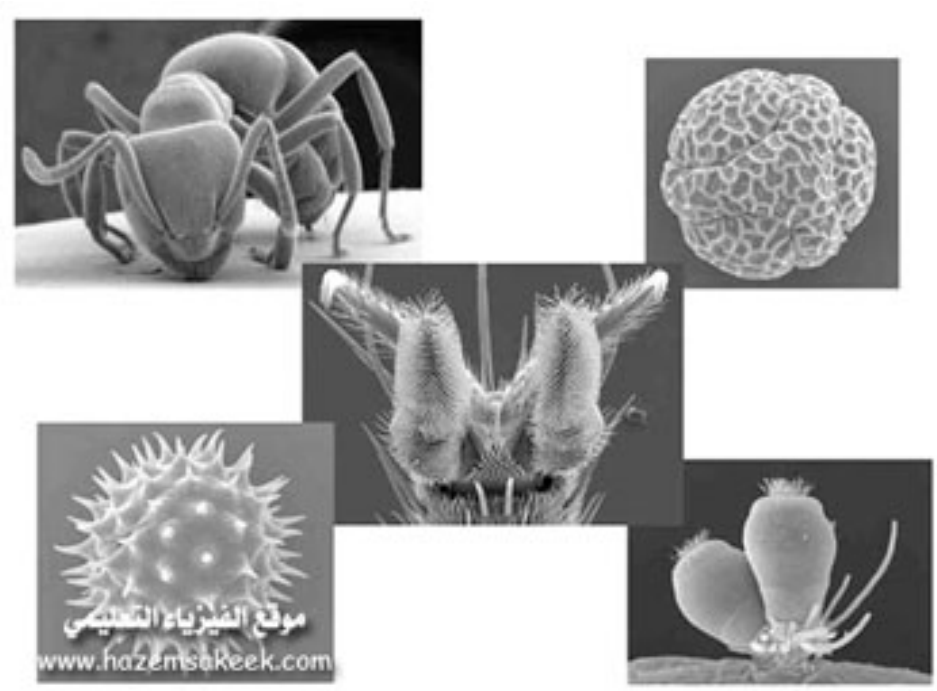
عندما يمسح الشعاع الإلكتروني سطح العينة فانه يتفاعل مع السطح وينتزع إلكترونات من سطح العينة بشكل محدد. هذه الإلكترونات المنتزعة يتم كشفها بواسطة الكاشف عن طريق جذب الإلكترونات المتشتتة وبالاعتماد على عدد الإلكترونات التي تصل إلى الكاشف، فإنها تسجل درجة معينة من مستوى الإضاءة على الشاشة. وباستخدام مجسات إضافية يتم الكشف عن الإلكترونات المتشتتة بالانعكاس عن سطح العينة backscattered وكذلك أشعة اكس المنبعثة عن العينة. نقطة بنقطة وسطر بسطر ويتم تكوين الصورة عن العينة الأصلية ومن هنا جاء اسم الجهاز بأنه جهاز ميكروسكوب الكتروني ماسح والآن أصبحنا نعرف لماذا أطلق عليه اسم الماسح.

بالطبع لا يمكن أن يقوم جهاز SEM بعمله بدون ان يتم التحكم في حركة الشعاع الإلكتروني والذي يتحكم فيه من خلال المجال المغناطيسي باستخدام فرق جهد متغير، للتحكم في تحريك شعاع الإلكترونات على العينة. وتقوم ملفات توليد المجال المغناطيسي بإنتاج المجال المغناطيسي اللازم لمسح الشعاع الإلكتروني بشكل دقيق ذهابا وإيابا على العينة. وإذا أراد الباحث أن يزيد قوة التكبير فانه يقوم بجعل الشعاع الإلكتروني يقوم بالمسح على منطقة أصغر على العينة.

تشغيل الميكروسكوب الإلكتروني الماسح SEM

قبل ان يقوم الباحثون بالحصول على الصور من جهاز SEM ولنفترض صور عن بعوضة، فان عليهم ان يجهزوا البعوضة مسبقا لتكون جاهزة كعينة للفحص بالجهاز. لان جهاز SEM لا يشبه الميكروسكوب الضوئي، فهو يعمل في الفراغ ويعتمد على المجالات المغناطيسية فان تحضير العينة قد يكون أمرا معقدا بعض الشيء. يبدأ الباحثون بتنظيف العينة من أي غبار أو عوالق. وبعد أن تتم عملية التنظيف يتم وضع العينة على الحامل الخاص بجهاز SEM إذا كانت العينة موصلة للكهرباء. وفي

حالة أن تكون العينة غير موصلة للكهرباء يتم تغطية العينة بمادة موصلة مثل الذهب أو البلاتينيوم من خلال عملية تعرف باسم الطلاء بالانتزاع sputter coating وهي تقنية تستخدم في إنتاج الأغشية الرقيقة. وهذه التقنية تطبق طبقة رقيقة على العينة تجعلها موصلة كهربائيا بالأرضي لتمنع العينة من ان تصاب بالضرر أثناء الفحص بواسطة الشعاع الإلكتروني الموجه عليها.



وحيث ان العينة سوف توضع في الجهاز وسوف تتعرض لضغط منخفض عند سحب الهواء من الجهاز ليعمل في الفراغ فان العينة تخضع لمزيد من التحضير لضمان أن تبقى العينة متماسكة في ظل هذه الظروف الحرجة. فالعينات البيولوجية على سبيل المثال تجفف قبل أن توضع في جهاز SEM. وإذا لم يتم ذلك فان الضغط المنخفض سوف يجعل الماء في العينة يتبخر بسرعة مما يتسبب في إفساد العينة وتغير ملامحها. بعض العينات الأخرى يتم تجميدها قبل الفحص، وهناك عينات يتم معالجتها كيميائيا حتى تتمكن من البقاء متماسكة في عملية التكبير.

صورة توضح عنكبوت جهز كعينة لفحص مغطى بطبقة رقيقة من الذهب

الباحثون مثلهم مثل المصورون لديهم الكثير من أدوات التحكم في الصورة الناتجة. مثل التكبير والتبئير والتباين والوضوح هذه كلها أدوات أساسية للحصول على صور واضحة ويتم التحكم فيها من خلال مفاتيح خاصة على لوحة تحكم الجهاز. وأجهزة SEM الحديثة التي دمج فيها أجهزة الحاسوب لتمكن الباحثون من التحكم في متغيرات الصورة من خلال برامج خاصة جعل من استخدام أجهزة SEM أكثر سهولة من قبل.

وفي النهاية يجب اتخاذ بعض إجراءات الوقاية والسلامة عند تشغيل هذه الأجهزة. فعند عمل هذه الأجهزة فانه ينتج عنها صدور أشعة اكس عندما تصطدم الإلكترونات بالعينة وكما نعلم فان أشعة اكس ضارة على الإنسان إلا انه لا يجب عليك القلق من التعرض لأشعة اكس هذه لان العينة تكون معزولة تماما وأشعة اكس المتولدة لا تصل للشخص المشغل للجهاز، وعادة ما يرفق تعليمات خاصة يتوجب إتباعها قبل تشغيل الجهاز وهذه التعليمات تقع ضمن سياسة الوقاية والسلامة المتبعة في المؤسسة وتختلف حسب نوع وموديل جهاز SEM.

مقاطع فيديو على اليوتيوب توضح فكرة عمل جهاز الميكروسكوب الالكتروني الماسح.

http://www.youtube.com/watch?v=sFSFpXdAiAM

http://www.youtube.com/watch?v=fToTFjwUc5M

http://www.youtube.com/watch?v=lrXMIghANbg

الميكروسكوب الالكتروني النافذ

Transmission Electron Microscopy (TEM)

الميكروسكوب الالكتروني النافذ

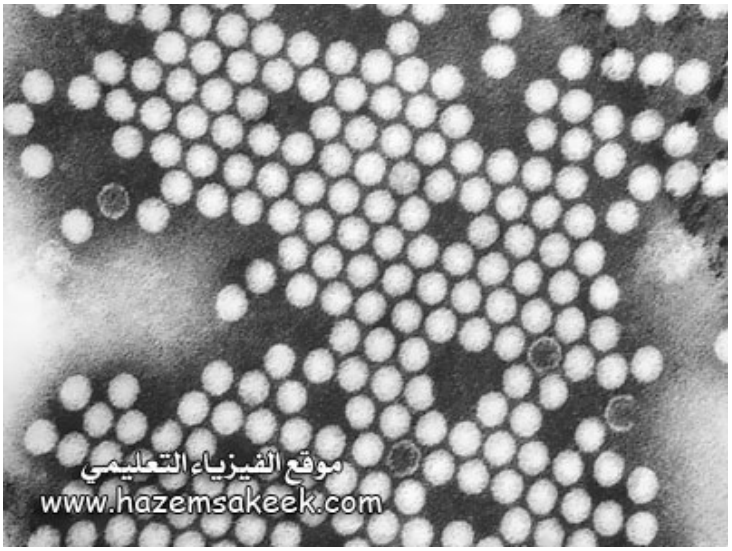
Transmission Electron Microscopy (TEM)

مع تطور أجهزة التكبير أصبح بالإمكان رؤية المواد على المستوى الذري، مما فتح المجال لتكنولوجيا النانو لتتطور وتنتشر. جهاز الميكروسكوب الالكتروني النافذ والذي يعرف بالاسم Transmission electron microscopy ويختصر بـ (TEM) هو أحد أهم أجهزة التكبير. من خلال اسمه يمكننا التنبؤ بالتقنية التي يعمل بها هذا الميكروسكوب الالكتروني حيث ينفذ شعاع من الالكترونات من عينة رقيقة جدا، ويتفاعل معها. تتكون الصورة من تفاعل الالكترونات النافذة من العينة حيث

يمكن أن تكبر الصورة وتركز على شاشة فلوريسنت أو على طبقة من فيلم فوتوغرافي، أو أن ترصد بواسطة كاميرا فيديو CCD. يستطيع الميكروسكوب الالكتروني النافذ أن يكون صور بدقة تحليلية عالية جدا أكبر بكثير من تلك التي يمكن أن نحصل عليها من الميكروسوب الضوئي التقليدي والسبب في ذلك يعود إلى الطول الموجي القصير المصاحب للإلكترونيات (موجة دبرولي de Broglie). وهذا يجعلنا نستخدم هذه الأداة لرؤية تفاصيل دقيقة تصل في دقتها إلى رؤية صف من الذرات. هذه الدقة جعلت جهاز الميكروسكوب الالكتروني النافذ أداة تحليلية هامة تستخدم في العديد من المجالات العلمية في الفيزياء والبيولوجي بالإضافة إلى تطبيقاتها في أبحاث السرطان وعلم الفيروسات وفي علوم المواد materials science مثل بحوث أشباه الموصلات والنانوتكنولوجي.

كما يمكن استخدام أنماط تشغيل مختلفة في جهاز الميكروسكوب الالكتروني النافذ TEM للتعرف على التراكيب الكيميائية للعينة والتركيب البلوري والالكتروني أيضا.

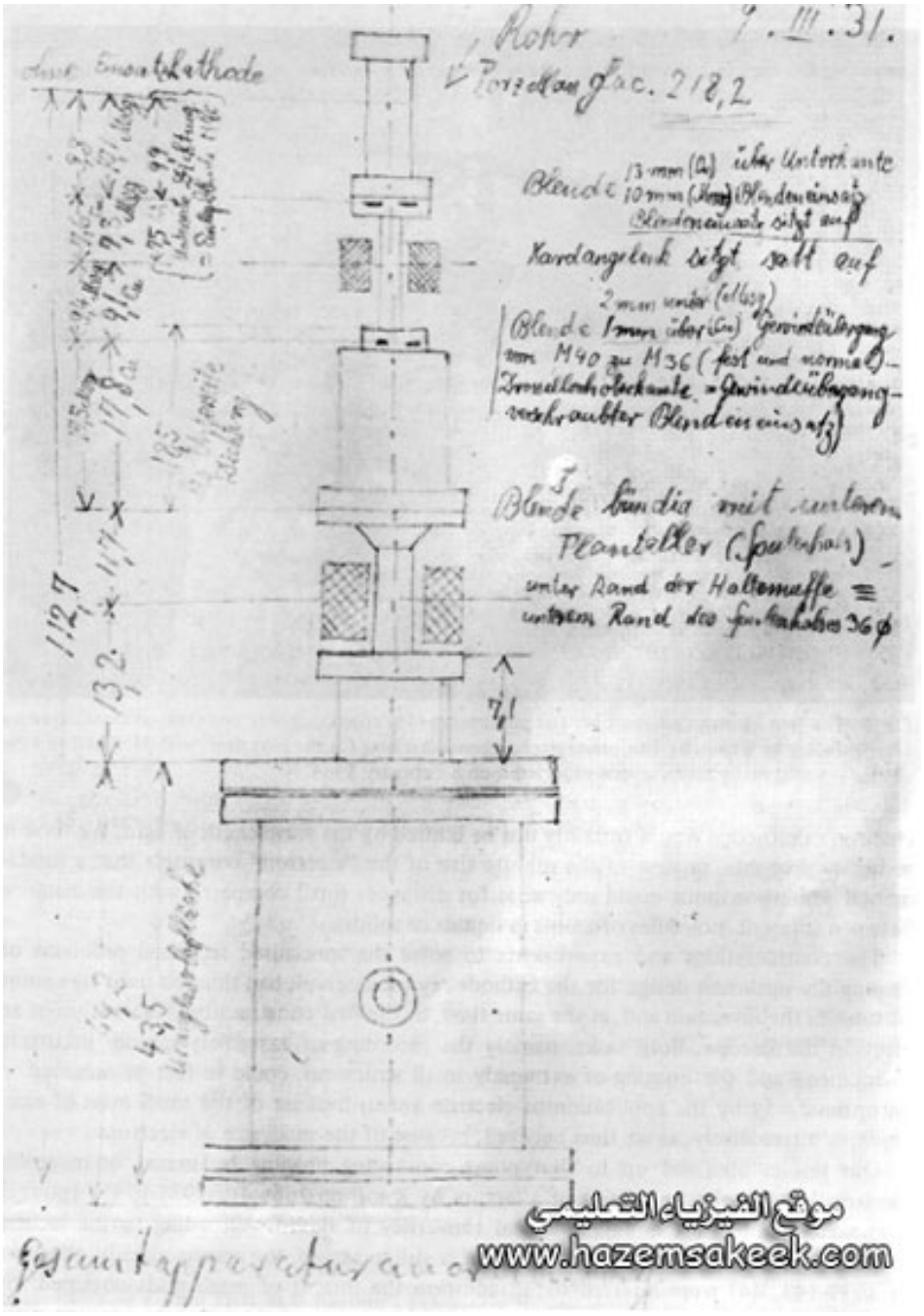
سوف نتعرف على الاجزاء الرئيسية لجهاز الميكروسكوب الالكتروني النافذ الذي لا يستغني عنه كل من يعمل في مجال تكنولوجيا النانو وعلم المواد والاغشية الرقيقة ونوضح ايضا انماط التشغيل المختلفة للحصول على معلومات متنوعة عن العينة بتفاصيل دقيقة.



صورة توضح فيروس بوليو polio virus المسبب لشلل الأطفال حجمه 30nm

نبذة تاريخية عن جهاز الميكروسكوب الالكتروني النافذ

أول ميكروسكوب الكتروني نافذ TEM تم تركيبه في I. G Farben-Werke والآن هو في متحف في مدينة ميونخ بألمانيا



مخطط لأول ميكروسكوب الكتروني تم الحصول عليه من دفتر العالم Ruska في العام 1931 كان قادرا على التكبير 16 مرة فقط

البداية: افترض العالم Ernst Abbe إن القدرة التحليلية لأي ميكروسكوب تعتمد على الطول الموجي للضوء المستخدم، وبالتالي فان الميكروسكوبات التقليدية المعتمدة على الضوء المرئي سوف يكون لها حد أقصى للقدرتها التحليلية لا يمكن أن تتجاوزه بأي حال من الأحوال ولهذا طور العالم Koehler جهاز ميكروسكوب يعمل بالأشعة الفوق بنفسجية وبالرغم من أن ذلك زاد القدرة التحليلية إلا أن اعتماد هذا الميكروسكوب على استخدام بصريات مصنعة من الكوارتز، لان الزجاج العادي يمتص الأشعة فوق البنفسجية، جعل سعره مرتفعا جدا. عند هذه المرحلة أصبح واضحا لدى العلماء أن الحصول على صور دقيقة بحجم أجزاء من الميكرون مستحيلا نظرا لقيود الطول الموجي للضوء المستخدم.

مع المزيد من الاكتشافات التي بدأت في العام 1858 بواسطة العالم Plücker الذي استطاع التحكم في أشعة الكاثود (وهي حزمة من الالكترونات ولكن لم يكن ذلك معروفا إلا بعد تجارب العالم ج ج طومسون) بواسطة المجالات المغناطيسية. تمكن العالم Riecke في العام 1891 من تبئير أشعة الكاثود بواسطة المجالات المغناطيسية مما يعني انه استطاع تصميم عدسة مغناطيسية بسيطة.

في العام 1928 في الجامعة التكنولوجية في برلين قام العالم Max Knoll برئاسة فريق بحثي بتطوير عدسات للتحكم في أشعة الكاثود لاستخدامها في الحصول على صور مكبرة. وبعد ثلاثة أعوام من الأبحاث والتجارب تمكن العالم Max Knoll وفريقه من الحصول على أول صورة مكبرة لشبكة وضعت فوق فتحة الانود وكان هذا في العام 1931. في نفس العام تمكن العالم Reinhold Rudenberg في شركة سيمينز Siemens company من الحصول على براءة اختراع للعدسة الكهروستاتيكية في الميكروسكوب الالكتروني.

التطور: في ذلك الوقت كان السلوك المزدوج للإلكترونيات معروفا من خلال الفرضية التي وضعها العالم دي برولي De Broglie hypothesis وهي أن كل جسيم له سلوك موجي وبالتالي وجد أن الإلكترون يسلك سلوك موجي بالإضافة إلى سلوكه الجسيمي مثله مثل الضوء تماما وبالرغم من أن فرضية دبرولي وضعت في العام 1927 إلا أن الفريق البحثي المكلف بتطوير قدرة الميكروسكوب لم يكن يعلم بهذه الفرضية حتى العام 1932 (لم يكن لديهم شبكة انترنت في ذلك الوقت) وبمجرد أن وصلتهم تلك الفرضية والتجارب التي أكدت صحتها لاحظ العلماء انه بالإمكان استخدام الموجة المصاحبة للإلكترون في عملية التكبير في الميكروسكوبات لان هذه الموجة اصغر كثيرا من الطول الموجي للضوء المرئي (الطول الموجي المتوسط للضوء 5000 انجستروم في حين إن الطول الموجي المصاحب للإلكترون في حدود 1 انجستروم) وبالتالي يمكن تطوير أجهزة تكبر الأشياء على المستوى الذري. في

العام 1933 تم الحصول على أول نجاح للحصول على صور مكبرة لعينة من ألياف القطن قبل أن تصاب العينة بالضرر نتيجة لاصطدام الالكترونات بها.

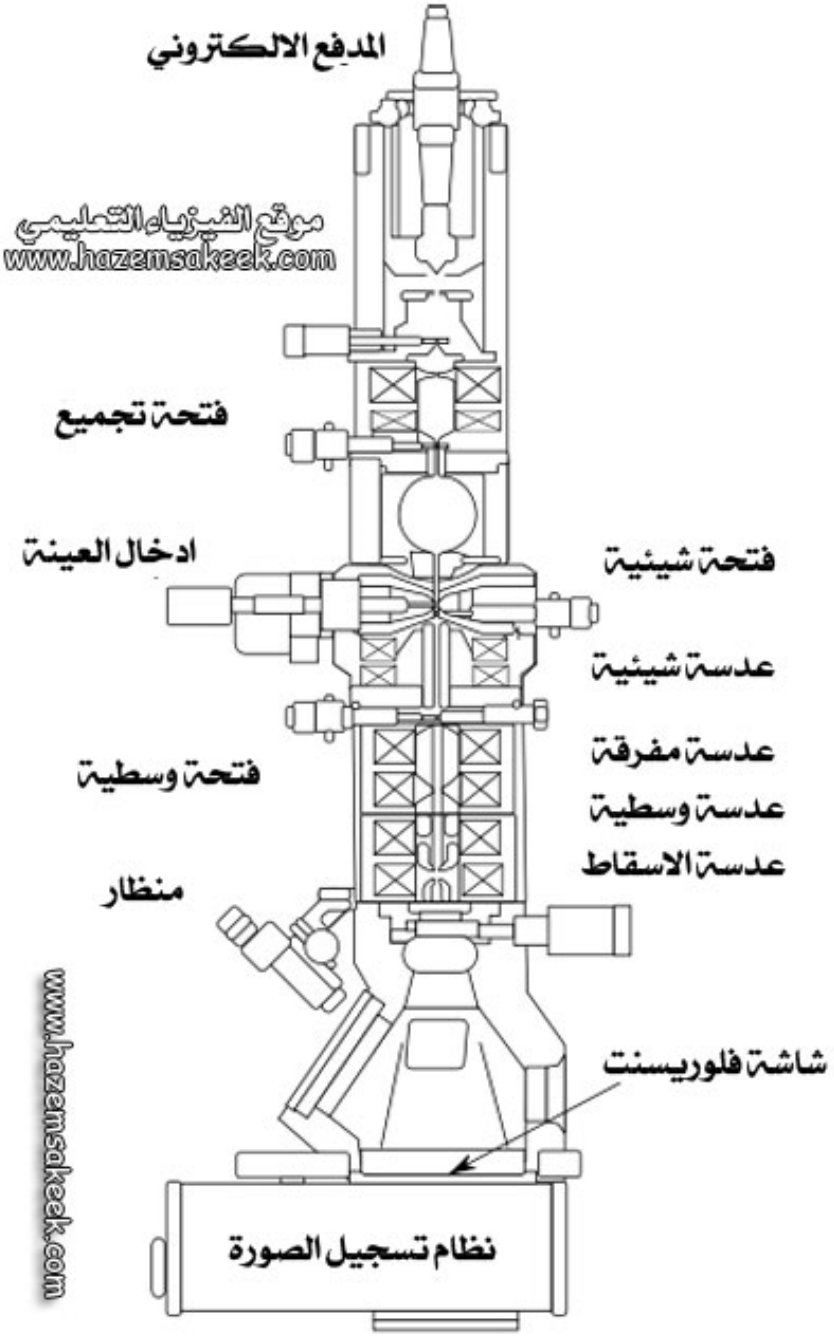
بعد هذا النجاح ازداد الاهتمام بالميكروسكوب الالكتروني من قبل العديد من المجموعات البحثية لتطويره، واستمر التطوير ايضا في شركة سيمينز للحصول على صور لعينات بيولوجية وفي العام 1938 تم بناء أول جهاز TEM.

مزيدا من التطورات: بعد الحرب العالمية الثانية استمر العالم Ruska في شركة سيمينز بتطوير الميكروسكوب الالكتروني ليحصل على تكبير وصل إلى 100,000 مرة. وللعلم فان تصميمه هذا لازال مستخدما في الاجهزة الحديثة حالياً. وقد عقدت العديد من المؤتمرات العلمية المتخصصة حول هذا الجهاز تحت اسم مؤتمر الميكروسكوب الالكتروني بدأت في العام 1942 والثاني في 1950 وبعدها في العام 1954.

بتطوير جهاز TEM تم تطوير تقنيات أخرى منها الميكروسكوب الالكتروني الماسح النافذ والذي يعرف باسم scanning transmission electron microscopy والذي يختصر بـ (STEM) وتم تطوير هذا الجهاز في السبعينات من القرن الماضي بواسطة العالم Albert Crewe في جامعة شيكاغو بعد تصميم المدفع الالكتروني الذي يعمل بالمجال الكهربي field emission gun وتحسين العدسات المغناطيسية. وهذا الجهاز استخدم لرؤية ذرات الكربون في غشاء رقيق مرسب على شريحة.

الأجزاء الأساسية في الميكروسكوب الالكتروني النافذ TEM

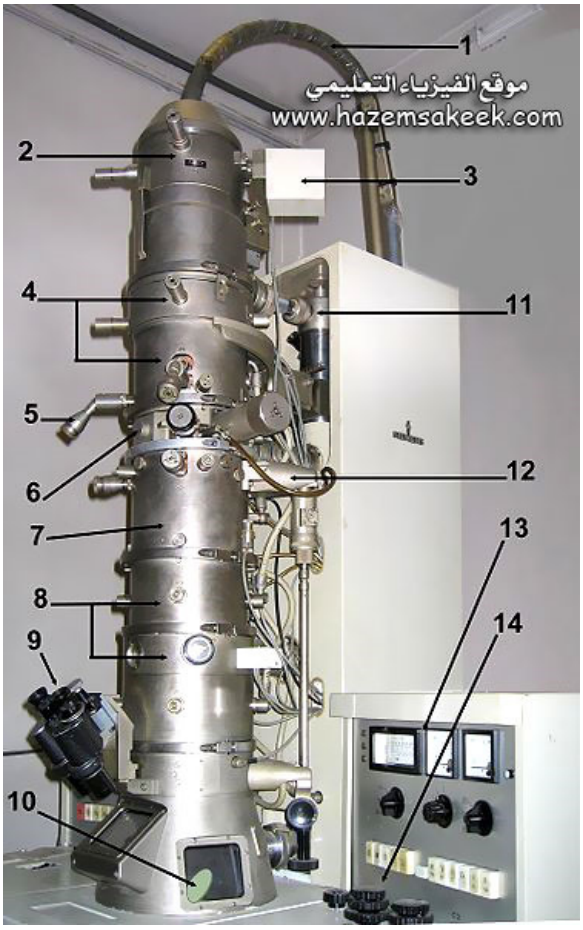
يتكون جهاز TEM من أجزاء رئيسية عديدة تشمل نظام مفرغة الهواء vacuum system والذي يوفر الفراغ في داخل الجهاز ليسهل على الالكترونات الوصول إلى العينة بدون أن تصطدم في الغازات داخله، وكذلك يوجد العديد من العدسات الكهرومغناطيسية، وألواح التوجيه الكهروستاتيكية، وهذه تمكن المستخدم من التحكم في الشعاع الالكتروني. كما يوجد أيضا غرفة العينة التي يمكن التحكم بموضعها في الجهاز لتحريك العينة داخل الجهاز تحت الشعاع الالكتروني. كما توجد أجهزة عرض الصورة المتكونة من الالكترونات التي نفذت من العينة. ولمزيد من التفصيل سوف نشرح هذه الأجزاء الأساسية بمزيد من التفصيل.



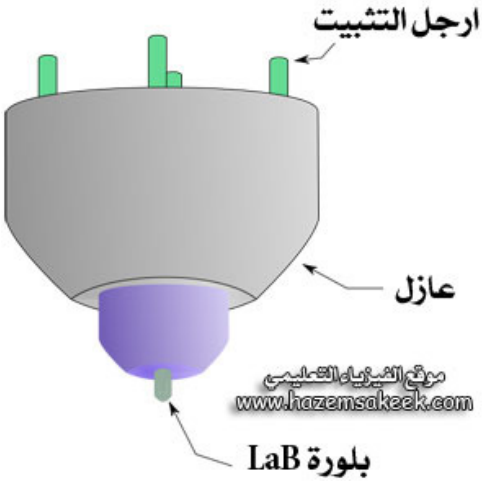
مخطط يوضح الأجزاء الأساسية في جهاز TEM

مصدر الالكترونات المدفع الإلكتروني Electron Gun

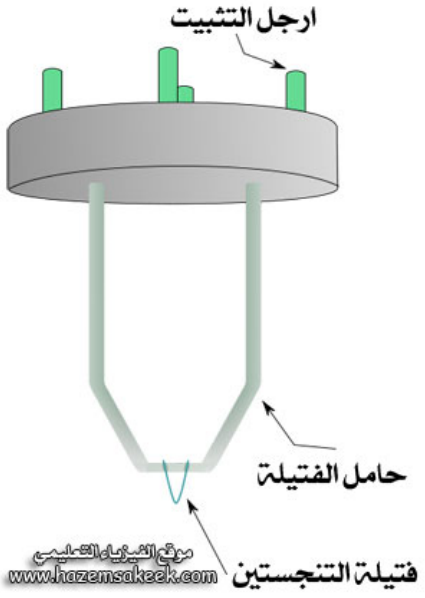
الجزء الأساسي في الجهاز هو مصدر الالكترونات والذي يعرف باسم المدفع الإلكتروني والذي يكون في أعلى الجهاز ويتكون من فتيلة من التنجستين في شكل فتيلة ذات طرف حاد أو من عنصر lanthanum hexaboride (LaB6) في صورة بلورة مفردة. يتم توصيل الفتيلة في مصدر فرق جهد عالي يتراوح بين 100 الى 300 ألف فولت يولد تيار كافي ليعطي انبعاث إلكتروني اما بطريقة الانبعاث الحراري thermionic أو بطريقة الانبعاث بواسطة المجال الكهربي field electron emission.



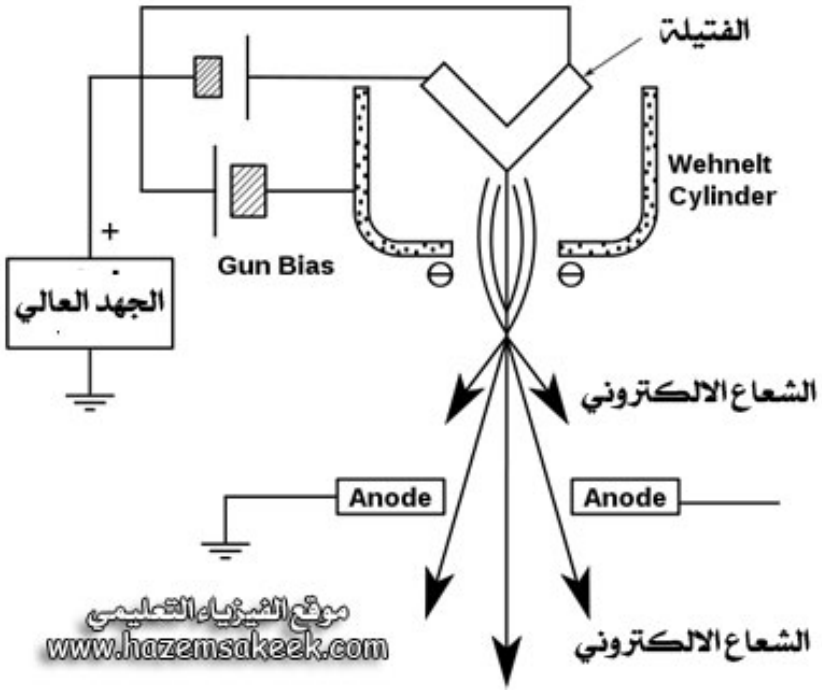
مصدر الالكترونات في أعلى الجهاز حيث تعمل العدسات (4 و7 و 8) على تركيز الشعاع الالكتروني على العينة وتنفذ من العينة على شاشة العرض (10). وأزرار التحكم بالشعاع الالكتروني على اليمين (13 و14).



فتيلة بلورة LaB_6



فتيلة التنجستن



شكل يوضح المدفع الالكتروني

العدسات Lenses

مثل الميكروسكوب الضوئي فان جهاز TEM يستخدم عدسات لإظهار صور دقيقة ومفصلة. والعدسات في هذه الأجهزة تعمل بشكل مختلف تماما. فهي ليست مصنوعة من الزجاج بل هي عدسات مصنوعة من مغناطيسات قادرة على توجيه مسار الإلكترونات. وبفعل ذلك تقوم هذه العدسات بتوجيه الإلكترونات والتحكم في مسارها، مما يضمن أن تصل الإلكترونات إلى المكان المطلوب بدقة.

نظام العدسات المستخدم يتكون من ثلاثة مراحل وهي العدسات المجمعة condensor lenses والعدسات الشيئية objective lenses وعدسات الإسقاط projector lenses. ووظيفة العدسات المجمعة هو التحكم في شكل الشعاع الإلكتروني في حين أن وظيفة العدسات الشيئية هو تركيز الشعاع الإلكتروني على العينة. اما عدسات الإسقاط فهي التي تستخدم لتوسعة الشعاع وعرضه على كامل شاشة العرض الفلوريسنت لإظهار الصورة. وهذه العدسات هي المسؤولة عن

التكبير حيث ان التكبير يعتمد على النسبة بين المسافات بين العدسة العينة والعدسة الشيئية ومستوى الصورة المتكونة. كما قد توجد أيضا عدسات إضافية تقوم بتحسين جودة الصورة وتصحيح الزيغ الذي قد ينتج بسبب عدم التماثل في الشعاع الإلكتروني والذي يعرف باسم (astigmatism).

موجهات الشعاع الإلكتروني Electron Beam Manipulation

يتم التحكم في الشعاع الإلكتروني من خلال تفاعل الإلكترونات مع المجال المغناطيسي حيث يؤثر المجال المغناطيسي على الإلكترونات المتحركة بسرعة معينة بقوة مغناطيسية يمكن من خلالها توجه الشعاع الإلكتروني داخل الميكروسكوب الإلكتروني النافذ TEM. كذلك يستخدم المجال الكهربي الاستاتيكي لتوجيه مسار الشعاع الالكتروني بزاوية معينة. وباستخدام هذين المجالين معا يتم تشغيل الجهاز بنظام STEM.

شاشة العرض Display Screen

يتكون نظام العرض في جهاز TEM من شاشة فسفورية، مصنوعة من كبريتيد الزنك لتمكن المستخدم من الحصول على صور مباشرة. كما يمكن أن يحتوي الجهاز على شاشة متصلة بشريحة إلكترونية تعرف CCD وهي التي تستخدم في الكاميرات الرقمية وكاميرات الفيديو للحصول على صور رقمية.

مفرغة الهواء Vacuum system

لكي تنطلق الإلكترونات من الفتيلة وتصل الى العينة فان جهاز TEM يعمل عند ضغط منخفض يصل الى 10^{-4}Pa وذلك من خلال سحب الهواء بواسطة مفرغة الهواء فنحصل على وسط تتحرك فيه الإلكترونات بحرية بدون تصادمات مع ذرات الهواء تعيق وصولها للعينة وكذلك لمنع حدوث أي تفريغ كهربي عند تطبيق فرق جهد عالي لتعجيل الإلكترونات داخل الجهاز.

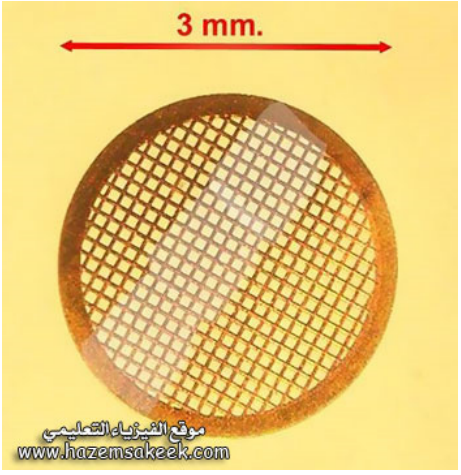
يتكون نظام تفريغ الهواء في الجهاز من عدة مراحل المرحلة الأولى تبدأ باستخدام مضخة هواء دورانية تعرف باسم rotary pump لتصل بالضغط في داخل الجهاز

إلى قيمة معينة لتبدأ بعدها المضخة الثانية في العمل وهي مضخة الانتشار والتي تعرف بالاسم diffusion pump كما يمكن استخدام مضخة التيربوا turbomolecular pumps للحصول على ضغط منخفض في حدود 10^{-7} - 10^{-9} Pa يسمح بتشغيل الجهاز عند فرق جهد عالي بدون حدوث تفريغ كهربي. وهذه المضخات متصلة بالجهاز ويمكن التحكم بها من خلال الصمامات المتوفرة لفصل وتوصيل المضخات في الجهاز.

حامل العينة Specimen stage

يجب أن يسمح تصميم حامل العينة بان يوضع في داخل الجهاز بدون إحداث زيادة في الضغط. وحامل العينة يتكون من شبكة دائرية بقطر 3 سم وهو الحجم القياسي ويمكن أن يوجد في حالات نادرة حامل بقطر 2.3 سم وذلك في حالة الحاجة إلى إمالة العينة أثناء الفحص مثل فحص شيء معدني حيث يتطلب فحص العينة من عدة زوايا حيث تخترق الإلكترونات عينة بسمك 100nm ويمكن التحكم بسمك الاختراق من خلال فرق جهد تعجيل الإلكترونات.

كما يسمح تصميم حامل العينة بتحريك العينة وهي داخل الجهاز وذلك لفحص مناطق محددة من العينة وعملية التحكم بالعينة تحت الفحص عملية معقدة وقد مرت بالكثير من التطويرات والتحديثات، وحاليا استخدم فيها الكمبيوتر مع الموتور الناقل ليعطيه التعليمات الدقيقة لتحديد مكان العينة بالنسبة للشعاع الإلكتروني وكذلك تحريك العينة بسرعة قد تصل إلى بضعة نانومترات لكل دقيقة.



حامل العينة وهي عبارة عن شبكة

طرق تكوين الصورة Imaging methods

تستخدم طرق تكوين الصورة في جهاز TEM المعلومات التي تكون في الأمواج المصاحبة للإلكترونيات والناتجة من تفاعلها مع العينة. وتسمح عدسات الإسقاط بتوجيه أمواج الإلكترونات وتوزيعها على شاشة العرض. وتعبر شدة الإضاءة التي تظهر على شاشة العرض عن متوسط سعة الدوال الموجية للإلكترونات النافذة من العينة.

وبالتالي تم استخدام عدة طرق للحصول على الصورة لتحسين أمواج الالكترونات التي تنفذ من العينة والحصول منها على معلومات مفيدة. تعتمد الصور المتكونة على سعة الشعاع الالكتروني وكذلك على طور هذه الالكترونات التي تستخدم في حالة التكبير لدرجات عالية. التحليل العالي للعينة يتطلب ان تكون العينة رقيقة للغاية لتنفذ منها الالكترونات بطاقة عالية، وعندها لا تمتص العينية أية الكترونات تذكر وبالتالي لن تغير من سعة الموجة الالكترونية ولكن تعدل من طورها. ومن هنا نستنتج ان الصور تتكون اما من خلال التغير الناتج على سعة موجة الالكترونات عند نفاذها من العينة او من خلال التغير في طور هذه الامواج.

إظهار التباين Contrast formation

إظهار التباين في جهاز TEM يعتمد بشكل أساسي على نمط تشغيل الجهاز. تستخدم تقنيات معقدة لإظهار الصورة تعتمد على تغير قوة العدسة وكل نمط تشغيل له اعدادات خاصة بقوة العدسات المستخدمة. انماط التشغيل المختلفة هذه تستخدم في تميز المعلومات التي نحصل عليها من الفحص وهذا يعتمد على اهتمام الباحث والنتائج التي يرغب في الحصول عليها.

نمط التشغيل المجال الساطع Bright field

يعتبر هذا النمط الاكثر استخداما في جهاز TEM وهو نمط صور المجال الساطع. تتكون الصورة في هذا النمط من خلال امتصاص الالكترونات في العينة. المناطق السميكة من العينة أو المناطق التي تحتوي على عدد ذري كبير تظهر معتمة في حين المناطق الاقل سمكا أو التي تحتوي على عدد ذري قليل تظهر مضيئة، ومن هنا جاء اسم هذا النمط.

صور TEM لعيب في الشبكة البلورية على المستوى الذري

نمط التشغيل تباين الحيود Diffraction contrast

تظهر العينات تباين في الحيود حيث يتعرض شعاع الالكترونات إلى تشتت براج Bragg scattering، وفي هذه الحالة فان العينة البلورية تشتت الالكترونات في مواقع منفصلة في مستوى البؤرة الخلفي. وبوضع فتحة aperture في مستوى البؤرة الخلفي يمكن اختيار تشتت براج المطلوب وهذا يعني ان اجزاء محددة من العينة هي المسؤولة عن تشتت الالكترونات وهي التي يتم رصدها لتكوين الصورة.

إذا كانت الانعكاسات التي تم اختيارها بواسطة الفتحة لا تحتوي على شعاع متشتت فان الصورة سوف تظهر معتمة حيث لا يوجد تشتت من العينة عند هذا الموضع.

أجهزة TEM الحديثة تكون مجهزة بحامل للعينة يمكن امالته بزاوية معينة للحصول على شروط حيود معينة والفتحة المثبتة على العينة تسمح للمستخدم باختيار الالكترونات التي تحيد في اتجاه معين بعد ان تنفذ من العينة.

يستخدم هذا النمط من التشغيل في التعرف على عيوب الشبكة البلورية lattice defects في البلورات. وبالتحكم الدقيق في اتجاه العينة فانه يمكن تحديد مكان

العيوب بدقة وكذلك نوعها. وذلك من خلال توجيه العينة ومراقبة حيود براج والتغير في تباين شدته يمكن تحديد المستوى البلوري الذي حدثت فيه العيوب في الشبكة البلورية.

أنماط تشتت بلوري في الحديد من النوع FCC

كما انه يمكن الحصول على صور لأنماط الحيود الذي من خلاله يمكن التعرف على التركيب البلوري للعينة فاذا كانت انماط الحيود عبارة عن نقاط تكون العينة عبارة عن بلورة مفردة single crystal واذا كانت سلسلة من الحلقات تكون العينة متعددة التبلور polycrystalline أو امورفية غير متبلورة amorphous. وفي حالة البلورة المفردة فان انماط الحيود تعتمد على اتجاه العينة وتركيبها. وهذه الصور تفيد الباحث في معرفة التماثل وزاوية البلورة بالنسبة للشعاع الالكتروني. وفي العادة يتم الحصول على نتائج الحيود هذه على شريحة فيلم.

نمط التشغيل فقد طاقة الالكترون Electron energy loss

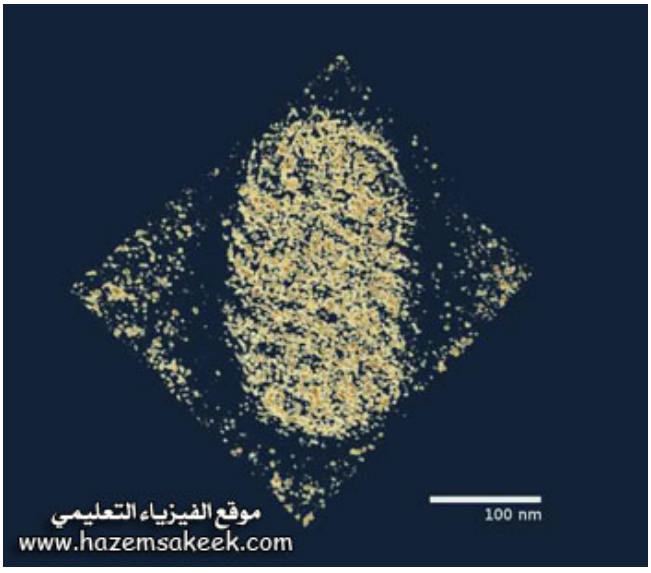
يعتبر هذا نمط تشغيل متطور وحديث فأجهزة TEM الحديثة تكون مزودة بمرشح مغناطيسي ومطياف طاقة لاختيار قيم طاقة معينة مرتبطة مع الالكترونات المتفاعلة مع العينة. فعلى سبيل المثال العناصر المختلفة في العينة تغير من طاقة الالكترونات بعد خروجها من العينة وهذا يسبب في العادة حدوث زيغ في الصورة ولكن التغير

في طاقة الالكترونات بعد تفاعلها مع العناصر المختلفة في العينة يمكن الاستفادة منه في الحصول على معلومات عن تركيب العناصر الموجودة في العينة. ويمكن تشغيل مطياف الطاقة ايضا للحصول على صورة.

نمط التشغيل تباين الطور Phase contrast

يمكن الحصول على التركيب البلوري للعينة باستخدام نمط التشغيل تباين الطور phase contrast وهذا النمط من التشغيل يعرف ايضا بالميكروسكوب الالكتروني النافذ ذو القدرة التحليلية العالية High Resolution Transmission Electron Microscopy والذي يختصر بـ HRTEM. فعند استخدام مصدر الكتروني ينتج من خلال مجال كهربي بدلا من الانبعاث الحراري وتتكون الصورة نتيجة الاختلاف في طور امواج الالكترونات، والذي نتج عن تفاعلها مع العينة. وهنا تتكون الصور بطرق معقدة لان الصورة لا تتكون بالاعتماد على شدة الشعاع الالكتروني النافذ (عدد الالكترونات) التي تصطدم بالشاشة وإنما على تفسير التغير في الطور وهذا يتطلب نماذج رياضية يستخدمها الكمبيوتر لتكوين الصورة.

الصور ثلاثية الأبعاد Three dimensional imaging



صورة ثلاثية الأبعاد لفيروس parapoxa

حيث أن حامل العينة يسمح بدوران العينة بزوايا محددة يمكن الحصول على صور للعينة عند زوايا مختلفة على المحور العمودي على الشعاع الالكتروني. وبأخذ عدة صور لعينة عند زوايا مختلفة بمقدار درجة واحدة لكل صورة يتم تجميع مجموعة من الصور يمكن منها تكوين صور ثلاثية الإبعاد تمثل العينة.

تحول مجموعة الصور إلى صور ثلاثية الأبعاد هي عملية معقدة وتتم من خلال مرحلتين المرحلة الأولى هي تحليل الصور للتخلص من الأخطاء والمرحلة الثانية تستخدم تقنية تسمى filtered back projection لتكوين الصور الثلاثية الأبعاد وفي كلا المرحلتين يستخدم برامج كمبيوتر خوارزميات خاصة لتحليل وبناء الصور.

تجهيز العينة Sample preparation

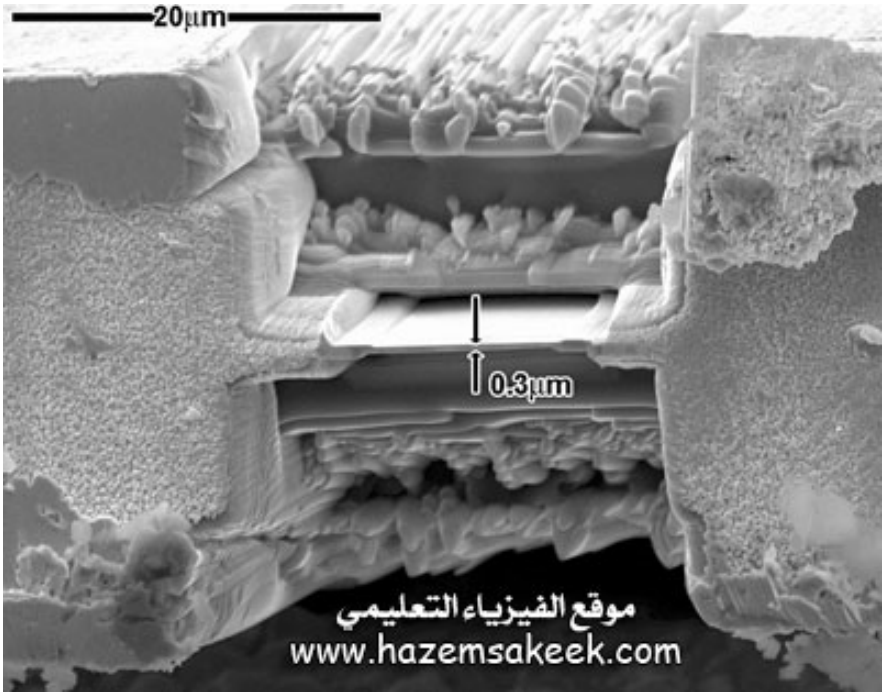
تعتبر عملية تجهيز العينة معقدة بعض الشيء. فالعينات التي ستفحص بجهاز TEM تتطلب أن تكون بسمك لا يتجاوز بضعة مئات النانومترات، فالجهاز يعتمد على تكوين الصورة بواسطة الالكترونات والتي ليس قدرة كبيرة على الاختراق كأشعة اكس. والعينات ذات الجودة العالية تكون بسمك يساوي مقدار اختراق الالكترونات لها وهذا في حدود بضعة عشرات النانومترات. تحضير العينة يعتمد على نوعها وكذلك على نوع المعلومات المطلوب الحصول عليها من فحصها في الجهاز ولهذا يوجد العديد من طرق التحضير المستخدمة.

المواد التي لها ابعاد صغيرة بحيث ينفذ عبرها الشعاع الالكتروني مثل البودرة والانابيب النانوية يمكن ان تحضر بشكل سريع من خلال تصنيعها على شكل غشاء رقيق. وفي البحوث البيولوجية فان العينة يجب ان تحضر بشكل يجعلها تتحمل الضغط المنخفض والتحكم فيها داخل الجهاز يتم تثبيتها باستخدام مواد تعرف باسم negative staining مثل مادة uranyl acetate او بتغطيتها بطبقة بلاستيكية. كما يمكن ايضا تبريد العينة عند درجة حرارة النيتروجين السائل بعد ان تغطى بغشاء زجاجي. وفي بحوث علوم المواد material science وعلم المعادن فهي عادة ما تتحمل الضغط المنخفض ولكن يجب ان تحضر في صورة اغشية رقيقة او ان توضع بالترسيب على أسطح يمكن للشعاع الالكتروني من اختراقها.

وهناك الكثير من الطرق المستخدمة لتجهيز العينات قبل وضعها في الجهاز وهذه الطرق متنوعة حسب نوع العينة والهدف من فحصها ومن هذه الطرق

1. فصل الأغشية Tissue sectioning

2. تلطيخ العينة Sample staining
3. التحفيف الميكانيكي Mechanical milling
4. الانتزاع الكيميائي Chemical etching
5. الانتزاع الأيوني Ion etching



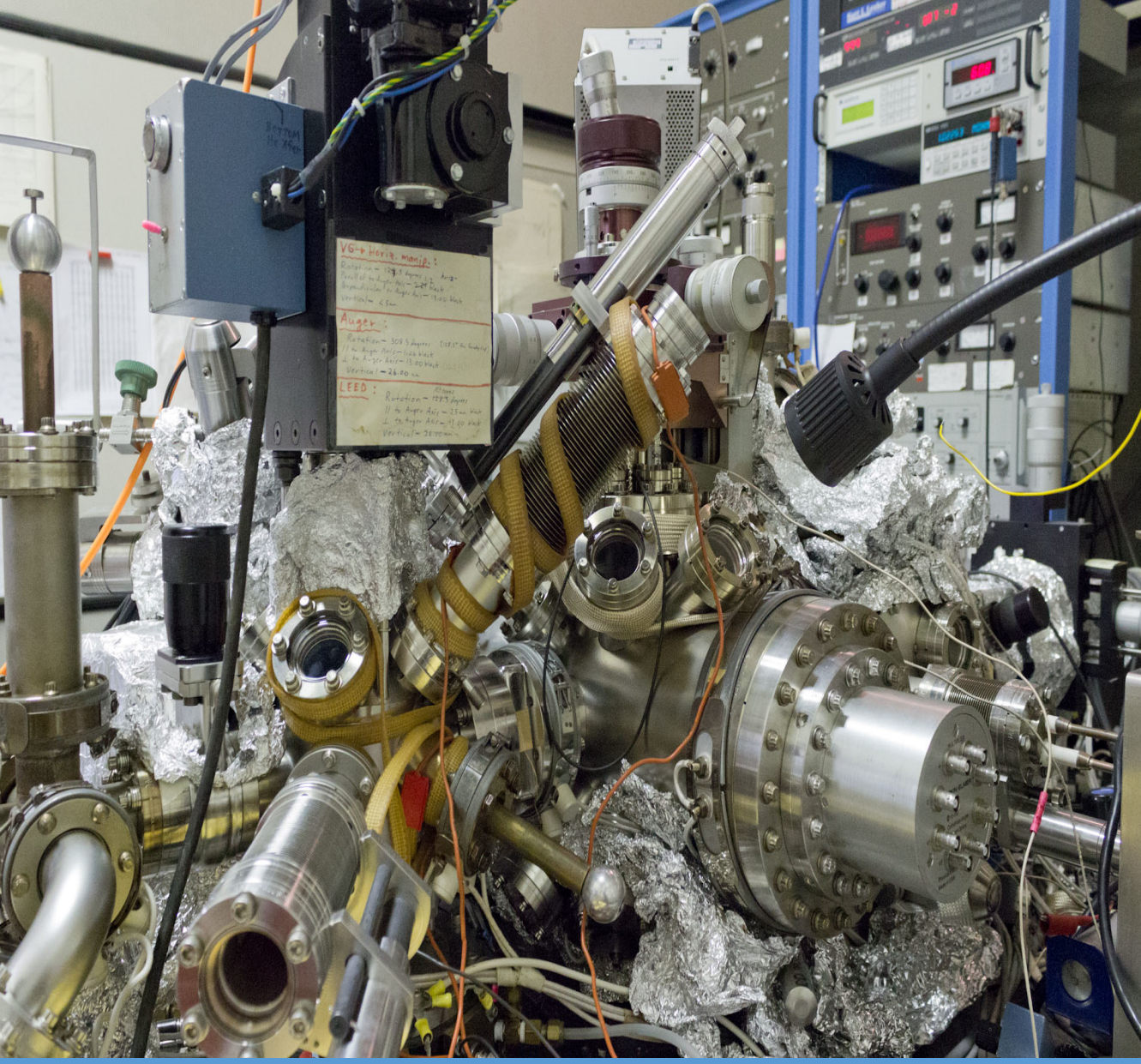
صورة SEM لعينة تم تجهيزها للفحص بجهاز TEM

عيوب جهاز TEM

كأي جهاز تقني له الكثير من الفوائد يصاحبه بعض العيوب ومن هذه العيوب التي تصاحب جهاز TEM هو طرق تحضير العينة والتي تكون في بعض الأحيان عملية معقدة وصعبة وتستغرق الكثير من الوقت قبل إجراء الفحص. حيث أن العينة يجب أن تكون شفافة أمام شعاع الالكترونات. كما انه من المحتمل أن يحدث بعض التغيرات في العينة أثناء التحضير والإعداد. هذا اضافة الى أن نطاق الفحص في

جهاز TEM ضيق بما لا يسمح بفحص كامل العينة. كما أن العينة قد تتعرض للضرر باصطدام الالكترونات بها وخصوصا عن فحص المواد البيولوجية.

نلاحظ ان جهاز TEM جهاز مهم للباحثين والمطورين يسمح برؤية المواد على المستوى الذري ويعتبر هذا الجهاز من الاجهزة التي ساهمت في انتشار علم النانو وتقنية النانوتكنولوجي. وفي النهاية يتضح من فكرة عمل جهاز الميكروسكوب الالكتروني النافذ TEM وجهاز الميكروسكوب الالكتروني الماسح SEM انهما متقاربان من ناحية المكونات، إلا ان تقنيات التشغيل مختلفة ويمكن الحصول على جهاز واحد يدمج كلا من SEM و TEM في جهاز واحد وحسب طريقة التشغيل وإعداد العينية يمكنك الحصول على النتائج المطلوبة.



المیکروسکوب النفقي الماسح

Scanning Tunneling Microscope (STM)

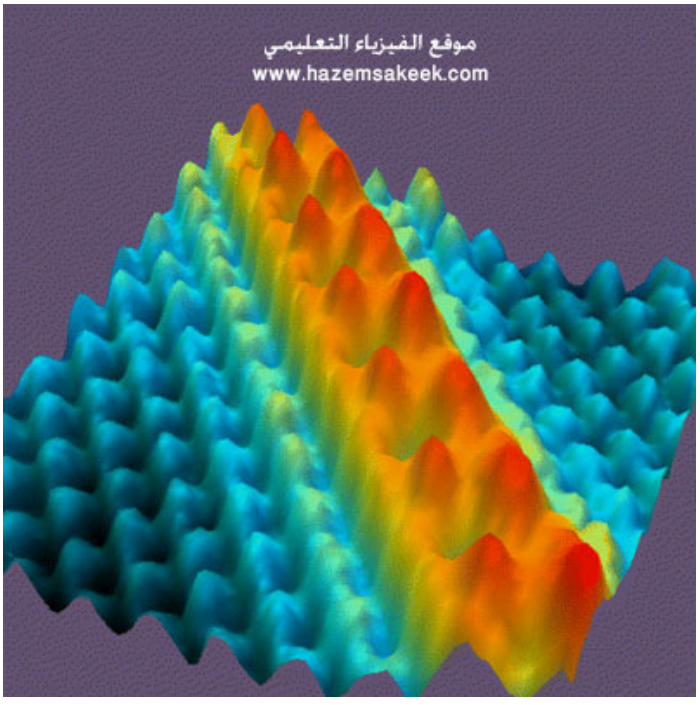
الميكروسكوب النفقي الماسح
Scanning Tunneling Microscope (STM)

عندما نتحدث عن الميكروسكوب فان أول ما نفكر به هو جهاز الميكروسكوب الذي نعرفه في مختبرات المدارس والذي يعمل بتكوين صورة ضوئية عن العينة المراد النظر لها بشكل مكبر، ومع تقدم العلم وتطوره أصبح بالإمكان ان نحصل على تكبير يفوق أي توقع. في بدايات القرن العشرين مع اكتشاف الفيزياء الحديثة والخاصية المزدوجة للإشعاع الكهرومغناطيسي والجسيمات المادية ونظرية ميكانيكا الكم التي تدرس الأجسام على المستوى الذري الدقيق أصبح بالإمكان تصميم ميكروسكوب يعمل على التكبير بدرجة عالية جدا تصل الى مئات الاف المرات وهي تعتمد على استخدام موجة الالكترون وقد تحدثنا عن الميكروسكوب الالكتروني الماسح SEM

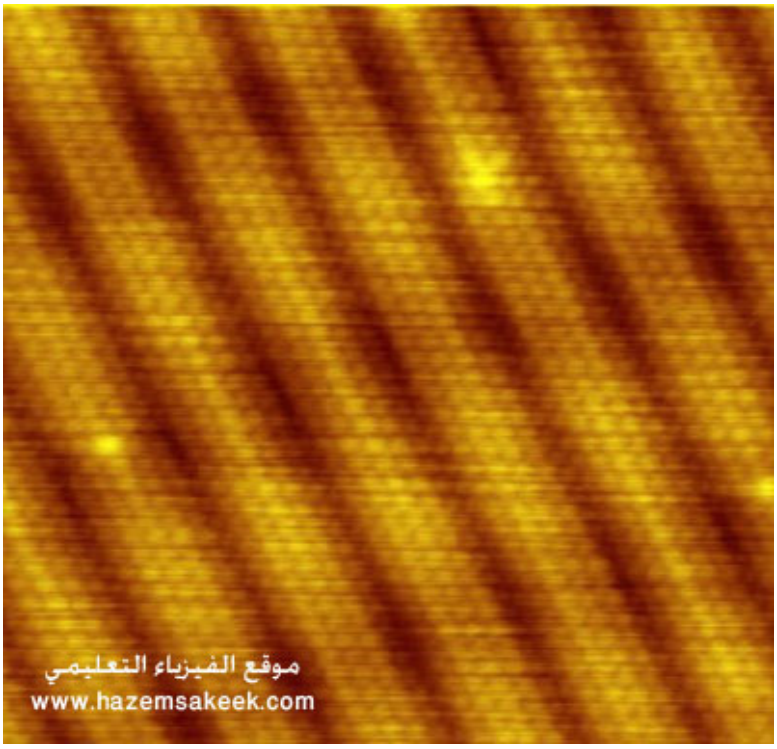
والميكروسكوب الالكتروني النافذ TEM وتوالت الاكتشافات ليظهر لنا في العام 1981 ميكروسكوب جديد من حيث فكرة عمله ومن حيث امكانياته وقدراته واستخداماته المتنوعة هذا الميكروسكوب يعرف باسم الميكروسكوب النفقي الماسح scanning tunneling microscope او STM.

يعتبر جهاز الميكروسكوب النفقي من الأجهزة الاساسية في علم النانوتكنولوجي والذي ساعد في دراسة المواد على المستوى الذري وفي بناء وفحص التراكيب النانوية. وتعتمد فكرة عمله على مبدأ النفق الكمي quantum tunneling. فعندما يقترب طرف المجس الموصل للكهرباء والذي يعرف باسم tip من السطح المراد فحصه يطبق فرق جهد بين السطح وطرف المجس tip يسمح بمرور الالكترونات من خلال نفق في الفراغ بينهما. تيار الالكترونات هذا يعرف باسم التيار النفقي tunneling current. يعتمد التيار النفقي على موضع المجس بالنسبة للسطح وعلى فرق الجهد المطبق وعلى الكثافة الموضعية للعينة.

سوف نقوم بشرح فكرة عمل جهاز الميكروسكوب النفقي STM وانماط تشغيله كما سوف نتعرف على الاجهزة التي تعمل على نفس فكرة عمله.



صورة توضح سلسلة من ذرات Cs الحمراء على سطح GaAs



صورة لسطح نظيف من الذهب بواسطة جهاز STM

صورة STM لسلسلة جزئيات تجمعت بشكل ذاتي لشبه موصل عضوي على الجرافيت

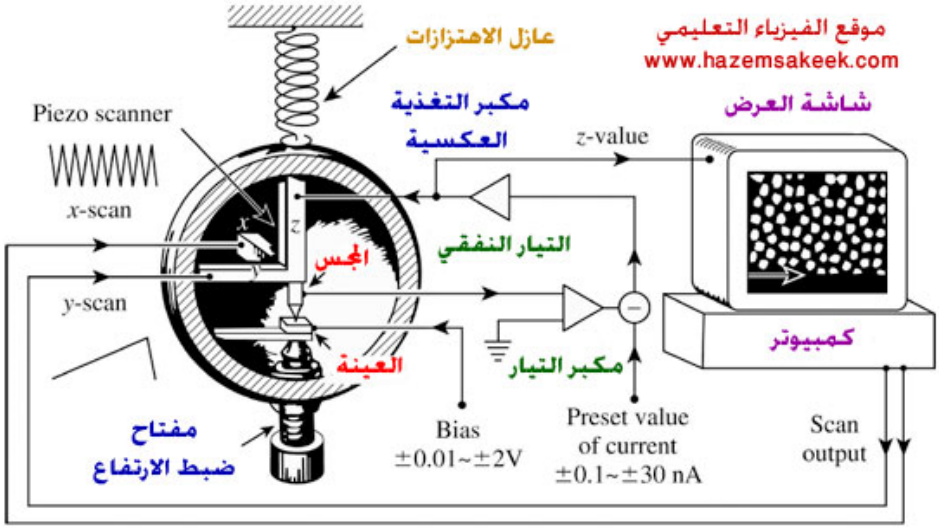
الميكروسكوب النفقي الماسح والذي اسمه العلمي scanning tunneling microscope والذي يعرف بالاختصار STM هو أداة قوية للحصول على صور لأسطح المواد على المستوى الذري. تم اختراع هذا الجهاز في العام 1981 على يدي العالمين Gerd Binnig و Heinrich Rohrer في شركة IBM. وحصلا على جائزة نوبل في عام 1986 لاختراعهما هذا الجهاز الذي سمح لأول مرة برؤية الذرة وفي الثلاثة ابعاد. يتمتع جهاز STM بقدرة تحليلية عالية تصل إلى 0.1nm وعمق يصل الى 0.01nm. وبهذه القدرة التحليلية العالية يمكن ان نحصل على صور للذرات داخل المواد هذا بالإضافة الى التحكم في الذرات وتحريكها.

المعلومات التي نحصل عليها من جهاز STM هي مراقبة التغير في التيار النفقي عند مسح سطح العينة بالمجس وتعرض البيانات في شكل صورة. يتطلب تشغيل جهاز STM درجة عالية من النظافة والاستقرار للسطح ولهذا يتم تشغيل الميكروسكوب في مفرغة هواء vacuum chamber ويكون المجس حادا جدا بحيث يكون طرفه بسمك ذرة او ذرتين، ويتصل المجس بأجهزة تحكم دقيقة لتحريكه في الابعاد الثلاثة بالنسبة للعينة وتستخدم ايضا أجهزة الكترونية متطورة لرصد التيار وترجمة التغيرات فيه الى صورة.

العالم Heinrich Rohrer على اليسار والعالم Gerd Binnig على اليمين في مختبرات شركة IBM توضح اول جهاز STM تم تصميمه في العام 1981 وحصلا على جائزة نوبل لهذا الاختراع في 1986. الجهاز الذي مكن العلماء لأول مرة من رؤية الذرات في المادة والتحكم فيها ليكون جهاز بناء التراكيب النانوية وفحصها.

تركيب الجهاز

يشتمل تركيب جهاز STM على المجس الماسح tip وماسح يعمل بالكهرباء الانضغاطية piezoelectric للتحكم في الارتفاع وفي الابعاد السطحية x و y، وجهاز التحكم في المسافة بين مجس المسح وسطح العينة، ونظام العزل من الاهتزازات، وكمبيوتر.



تعتمد القدرة التحليلية لجهاز STM على نصف قطر تحدب المجس الماسح tip. ويلعب المجس الماسح دورا اساسيا في الحصول على صورة نقية وتبلغ دقة المجس الماسح درجة متقدمة وذلك حين تحتوي نهايته على ذرة واحدة فقط. فاذا كانت بسمك ذرتين فقد نحصل على صورتين معا مما يشكل زيغ في الصورة المتكونة ولضمان الحصول على ذرة في نهاية المجس فقد استخدمت لهذا الغرض أنابيب الكربون النانوية للحصول على مجسات ماسحة لعمل الجهاز.

يصنع المجس الماسح من مادة التنجستين أو من البلاتينيوم والاريديوم أو الذهب. تستخدم طريقة النحت الكهروكيميائي electrochemical etching في حالة مجسات التنجستين بينما تستخدم طرق ميكانيكية في حالة المجسات المصنوعة من البلاتينيوم والاريديوم.

ونظرا لحساسية التيار النفقي البالغة للتغير في الارتفاع، يجب عزل المجس عن الاهتزازات أو تثبيت الجهاز على قاعدة صلبة للحصول على نتائج مفيدة. في أول جهاز STM صمم بواسطة العالمين Binnig وRohrer استخدمت رافعة

مغناطيسية للحفاظ على الجهاز بعيدا عن أي اهتزازات، والان تستخدم زنبركات ميكانيكية أو زنبركات غازية. كما يتم ايضا استخدام وسائل للتقليل من التيارات الدوامية eddy currents.

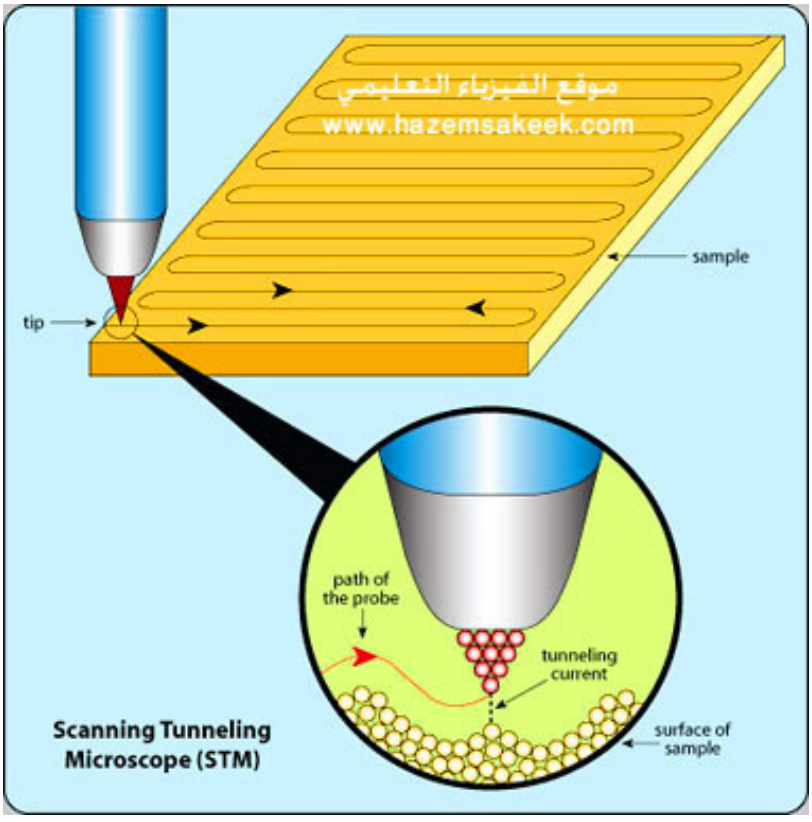
للحفاظ على موضع المجس بالنسبة للعينة والتحكم في عملية مسح سطح العينة بالمجس والحصول على البيانات يتم استخدام كمبيوتر. كما ان الكمبيوتر يستخدم لتحسين الصورة باستخدام برامج معالجة الصورة والقيام بالقياسات الكمية على العينة.

كيف يعمل جهاز STM

في البداية يطبق فرق جهد على المجس الماسح ليتحرك عموديا في اتجاه سطح العينة وعندما يصبح على بعد مسافة صغيرة جدا من سطح العينة يتوقف المجس. تبدأ بعد ذلك مرحلة التحكم الدقيق في حركة المجس في الابعاد الثلاثة بالقرب من العينة ويستخدم بيزوالكترك piezoelectric أي الكهرباء الانضغاطية للحفاظ على المسافة ثابته بين المجس والعينة في حدود 4 الى 7 انجستروم. في هذه الحالة يعمل فرق الجهد على دفع الالكترونات للتحرك النفقي بين رأس المجس tip والعينة، مما ينتج عنه تيار نفقي يمكن قياسه. عندما يبدأ التيار النفقي يمكن تغير موضع رأس المجس بالنسبة لسطح العينة ويتم رصد التغيرات في التيار النفقي الناتج.

اذا تحرك رأس المجس عبر العينة في المستوى x-y، فان التغيرات في ارتفاع السطح وكثافته تحدث تغيرات في التيار النفقي. هذه التغيرات يتم رصدها ورسمها في شكل صورة. ويمكن ان تتم عملية رسم الصورة اما من خلال قياس التغيرات في التيار النفقي بالنسبة لسطح العينة عند ارتفاع ثابت بين رأس المجس والعينة أو من خلال رصد التغير في الارتفاع z عند جعل التيار النفقي ثابت من خلال تغير ارتفاع رأس المجس بالنسبة لسطح العينة. وهذين النمطين من انماط التشغيل يعرف باسم نمط الارتفاع الثابت constant height mode أو نمط التيار النفقي الثابت. في نمط التيار الثابت تقوم أجهزة التغذية العكسية الالكترونية بإعادة ضبط ارتفاع رأس المجس من خلال تعديل قيمة الجهد على البيزوالكتريك الذي يتحكم في الارتفاع. وهذا يؤدي إلى الحصول على التغيرات في ارتفاع. الصورة التي نحصل عليها من رأس المجس هي صورة تضاريس سطح العينة وتعطي كثافة شحنة سطحية ثابتة وبالتالي فان التباين في الصورة يكون نتيجة للتغيرات في كثافة الشحنة.

في نمط الارتفاع الثابت يتم تثبيت كل من فرق الجهد والارتفاع في حين يتم قياس التغيرات في التيار النفقي خلال مسح رأس المجس لسطح العينة، وهذا يؤدي الى الحصول على صورة للتغيرات في التيار النفقي على السطح، والتي ترتبط بكثافة الشحنة.



مسح المجس لسطح العينة على المستوى الذري في جهاز STM

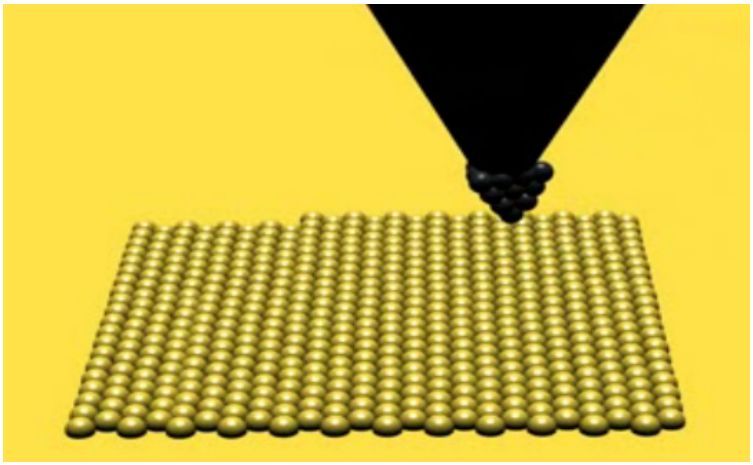
كل الصور التي يتم الحصول عليها بجهاز STM هي صورة بتدرجات رمادية وللحصول على صورة ملونة يتم استخدام برامج كمبيوتر لإبراز الميزات المهمة المراد اظهارها في الصورة.

بالإضافة إلى عملية المسح لسطح العينة فان المعلومات التي ترصد بواسطة الأجهزة الالكترونية تكون دالة في الموضع بالنسبة لسطح العينة وعند كل موضع على سطح العينة يتم تغيير الجهد الكهربي ورصد التغير في التيار. وهذه القياسات تعرف باسم طيف المسح النفقي scanning tunneling spectroscopy وتعرف بالاختصار STS وينتج عنها مخططات توضح كثافة المستويات كدالة في الطاقة داخل العينة.

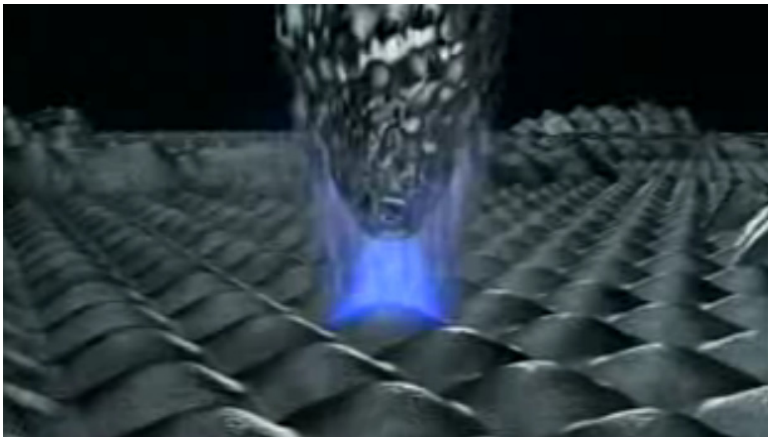
وتتميز تقنية STM عن أجهزة قياس كثافة المستويات بقدرتها على اخذ قياسات موضعية بشكل دقيق، فعلى سبيل المثال يمكن قياس كثافة المستويات في موضع يوجد فيه شوائب في العينة ومقارنتها مع موضع اخر لا يوجد فيه شوائب على نفس سطح العينة.

في العام 1989 كتب العالمان Eigler and Schweizer اسم شركة IBM بالذرات باستخدام 35 ذرة زينون على سطح النيكل

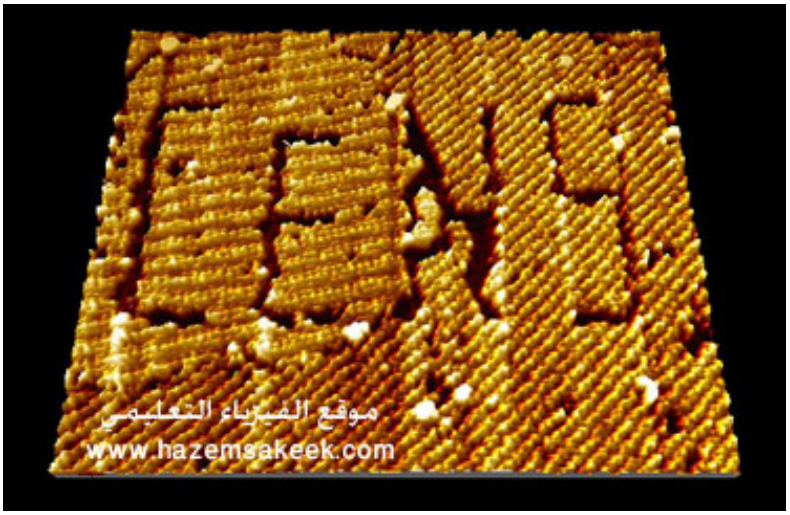
عرض فيديو يوضح فكرة عمل المجس الماسح في الميكروسكوب النفقي الماسح



http://www.youtube.com/watch?v=ihw_2g9AwiU



http://www.youtube.com/watch?v=47UgMpXFVj4



صورة توضح شعار مركز علوم النانو CeNS كتب بواسطة الذرات باستخدام جهاز STM

استخدامات اخرى لجهاز STM

العديد من أجهزة الميكروسكوب تم تطويرها بالاعتماد على فكرة عمل جهاز الميكروسكوب النفقي STM. ومن هذه الأجهزة جهاز ميكروسكوب الماسح الفوتوني photon scanning microscopy والذي يعرف بالاختصار PSTM،

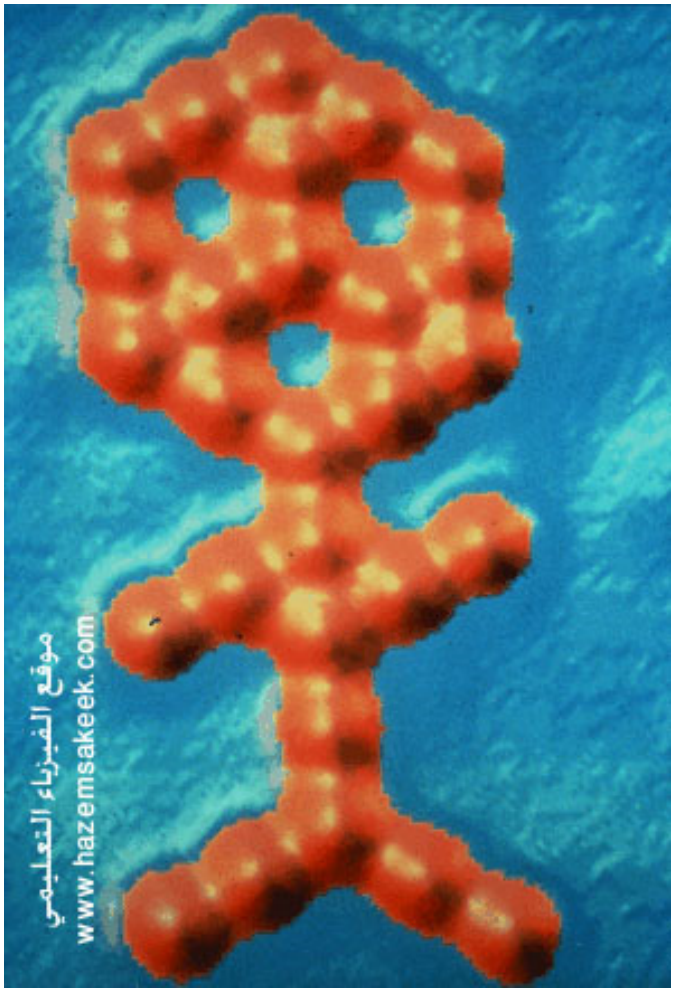
ويستخدم مجسا ضوئيا tip ليشكل النفق الذي تنتقل عبره الفوتونات، وجهاز ميكروسكوب الجهد النفقي الماسح scanning tunneling potentiometry والذي يعرف بالاختصار STP، والذي يقوم بقياس الجهد الكهربي عبر العينة، وجهاز ميكروسكوب غزل الاستقطاب النفقي الماسح spin polarized scanning tunneling microscopy والذي يعرف بالاختصار SPSTM والذي يستخدم مجسا فرومغناطيسيا ليعمل كنفق للإلكترونات المغزلية المستقطبة في المجال المغناطيسي للعينة، وجهاز ميكروسكوب القوة الذرية atomic force microscope والذي يعرف بالاختصار AFM والذي فيه يتم قياس القوة الناتجة عن التفاعل بين المجس وسطح العينة على المستوى الذري.

الطرق الاخرى من STM تقوم على فكرة التحكم في المجس ليحدث تغيرات في طبوغرافيا سطح العينة. وهذه الطرق جذبت العلماء لعدة اسباب وهي:

اولا يمتلك جهاز STM نظاما دقيقا لتحديد الموضع على المستوى الذري مما يسمح بالتحكم في الذرات بشكل دقيق.

ثانياً بعد ان يتم تعديل سطح العينة باستخدام المجس الماسح يمكن اخذ صورة للسطح الجديد بنفس المجس الماسح بدون ان يتم تغيير الجهاز.

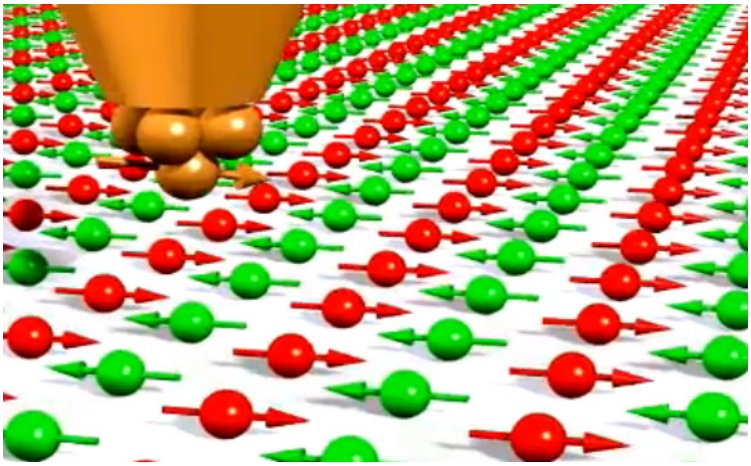
وبهذا تمكن باحثون في شركة IBM من تطوير طريقة للتحكم في ذرات الزينون على سطح النيكل. وهذه الطريقة استخدمت لتطويق الالكترونات حول عدد من الذرات، والتي مكنت جهاز STM من استخدامه لمراقبة تذبذبات الالكترونات والتي تعرف باسم electron Friedel Oscillations على سطح المادة. كما يمكن استخدام تقنية STM كنفق لشعاع الكتروني موجه على عينة لعمل طباعة ذرية lithography على سطح العينة. وهذه تعتبر تقنية متقدمة كثيرا على تقنية الطباعة بالشعاع الالكتروني التقليدية. ومن التطبيقات العملية لجهاز STM استخدامه في ترسيب ووضع الذرات مثل الذهب والفضة وغيرها على شكل مفضل مبرمج مسبقا لعمل الوصلات الكهربية للأجهزة النانوية او حتى لصناعة اجهزة نانوية بالكامل.



صورة الرجل الجزيئي والذي طوله 45 انجستروم والتي تم بناؤه باستخدام 28 جزئ اول اكسيد الكربون على سطح من البلاتينيوم.

مؤخرا مجموعة من الباحثين تمكنوا من استخدام مجس STM للتحكم في اتجاه الروابط بين الجزئيات بشكل منفرد. هذا بالاعتماد على أن المقاومة الكهربية للجزئيات تعتمد على اتجاه الروابط وبالتالي تمكنوا من وضع الاسس اللازمة للحصول على مفاتيح كهربية switch من الجزئيات يمكن استخدامها في الكمبيوترات البيولوجية.

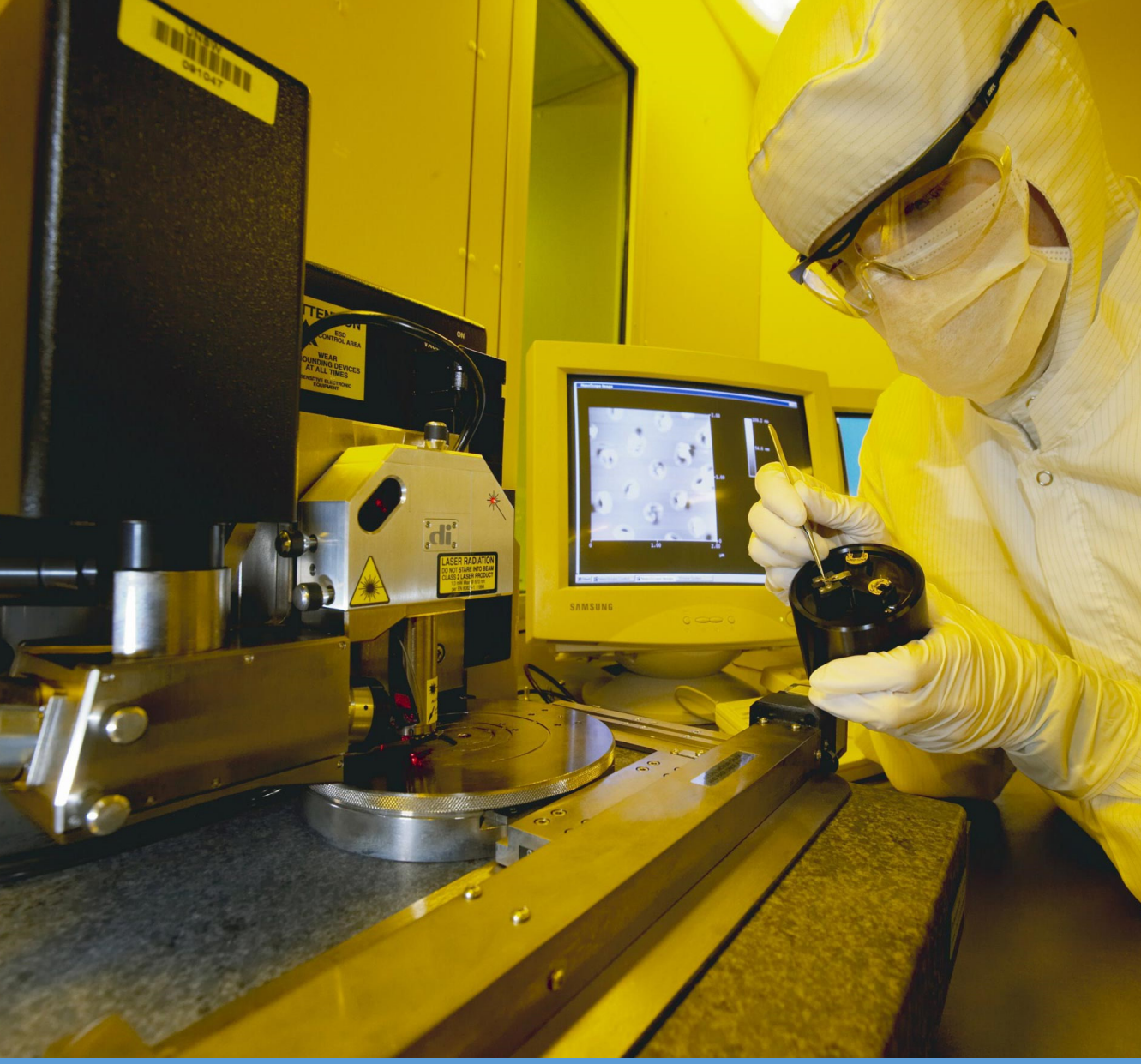
مقاطع فيديو توضح فكرة عمل الميكروسكوب النفقي الماسح STM



http://www.youtube.com/watch?v=nD1Ra_AdX74

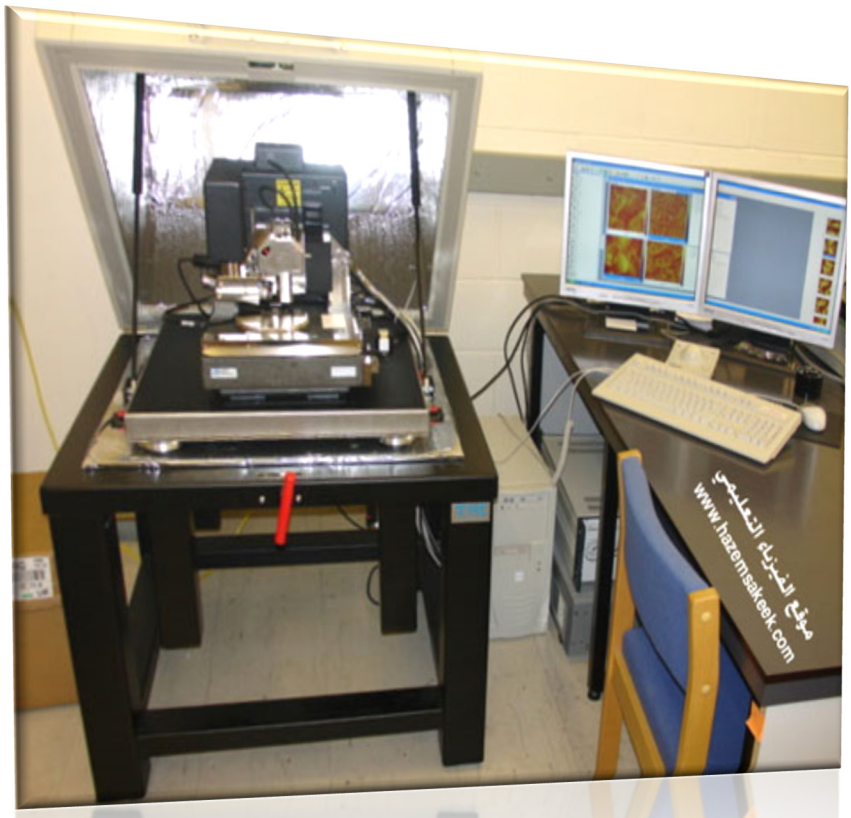
http://www.youtube.com/watch?v=5g43LWUl18Y

جهاز STM يستخدمه الكثير من الباحثين في مختلف التخصصات وللعديد من الاغراض.



ميكروسكوب القوة الذرية

Atomic force microscopy (AFM)



ميكروسكوب القوة الذرية

Atomic force microscopy (AFM)

ميكروسكوب القوة الذرية Atomic Force Microscope (AFM) أو ميكروسكوب القوة الماسحة Scanning Force Microscopy (SFM) هو ميكروسكوب ذو قدرة تحليلية عالية وهو أحد أنواع ميكروسكوبات المجسات

الماسحة والذي تحدثنا عن واحد منها وهو الميكروسكوب النفقي الماسح STM في مقال سابق. ولكن هذا الميكروسكوب له قدرة تحليل تصل الى اجزاء من النانومتر حيث انه يفوق حد تكبير الميكروسكوبات الضوئية بأكثر من 1000 مرة. ويعتبر هذا الميكروسكوب متطورا عن الميكروسكوب النفقي الماسح STM. اخترع ميكروسكوب القوة الذرية AFM من قبل العالمان Quate وGerber في العام 1986. وتوفر أول جهاز للاستخدام في المختبرات العلمية في العام 1986. ويعتبر هذا الميكروسكوب الأكثر شهرة كأداة تكبير وقياس وتحريك على المستوى النانوي.

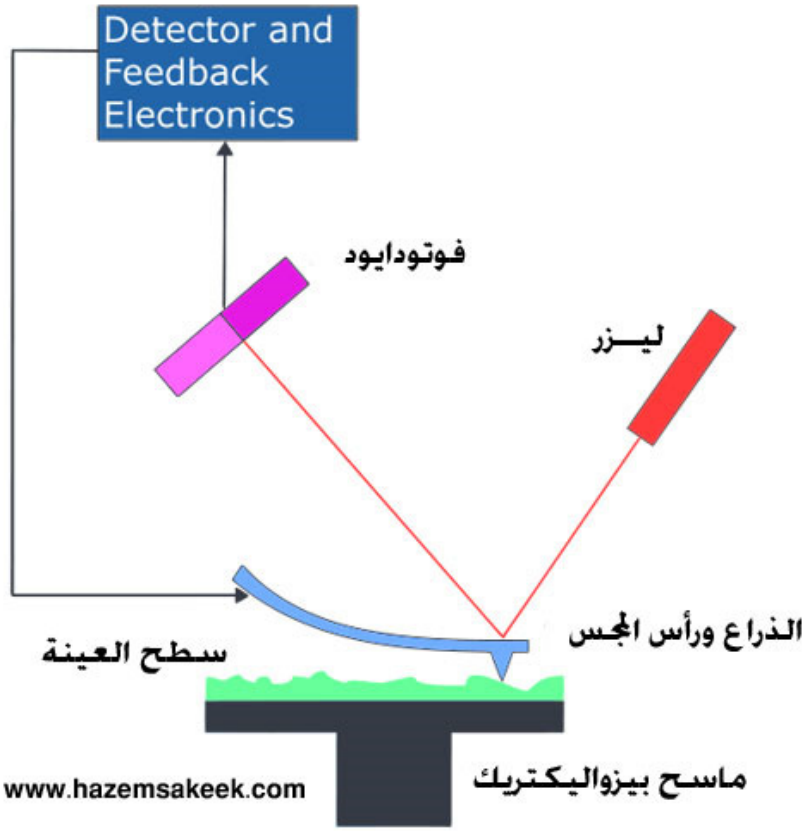
وحديثاً تمكن علماء فيزيائيون في جامعة اوساكا في اليابان من استخدام ميكروسكوب القوة الذرية AFM من التعرف على هوية التركيب الكيميائي وتحديد نوع كل ذرة ومكان تواجدها على المخطط ثلاثي الابعاد لتضاريس سطح المادة على المستوى الذري .وقد اكتشف هؤلاء العلماء ان التفاعلات تشكل بصمة ذرية لتمييز الذرات باستخدام ميكروسكوب AFM.

سوف نلقى الضوء عن هذا الجهاز الدقيق وكيف يعمل وأهم المجالات التي يمكن ان يستخدم بها جهاز ميكروسكوب القوة الذرية.

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 الى انحراف في الذراع بناء على قوة هوك. وقد تكون القوة المتبادلة قوة ميكانيكية او قوة فاندرفال أو قوة شعرية أو قوة كهروستاتيكية أو قوة مغناطيسية أو قوة رابطة كيميائية أو قوة كزيمار أو غيرها من انواع القوة وهذا حسب نوع السطح الذي تتم دراسته. كما يمكن دراسة العديد من انواع هذه القوة باستخدام مجسات خاصة وعندها يسمى الميكروسكوب باسمها مثل ميكروسكوب القوة المغناطيسية magnetic force Microscope (MFM) أو ميكروسكوب المسح الحراري scanning thermal microscopy أو غيره. وفي كل هذه الميكروسكوبات تحدث القوة المتبادلة باختلاف انواعها انحراف في ذراع ميكروسكوب القوة الذرية يقاس هذا الانحراف بواسطة انحراف شعاع ليزر عن مرآة مثبتة على ذراع الميكروسكوب. وشعاع الليزر المنعكس يرصد على مصفوفة خطية من الفوتودايود Photodiodes. وهناك طرق اخرى لقياس الانحراف مثل مقياس التداخل الضوئي optical interfermetry، أو باستخدام بيزوالكترك أو مجس سعة كهربية. وحسب طريقة قياس الانحراف يتم تصميم ذراع الميكروسكوب

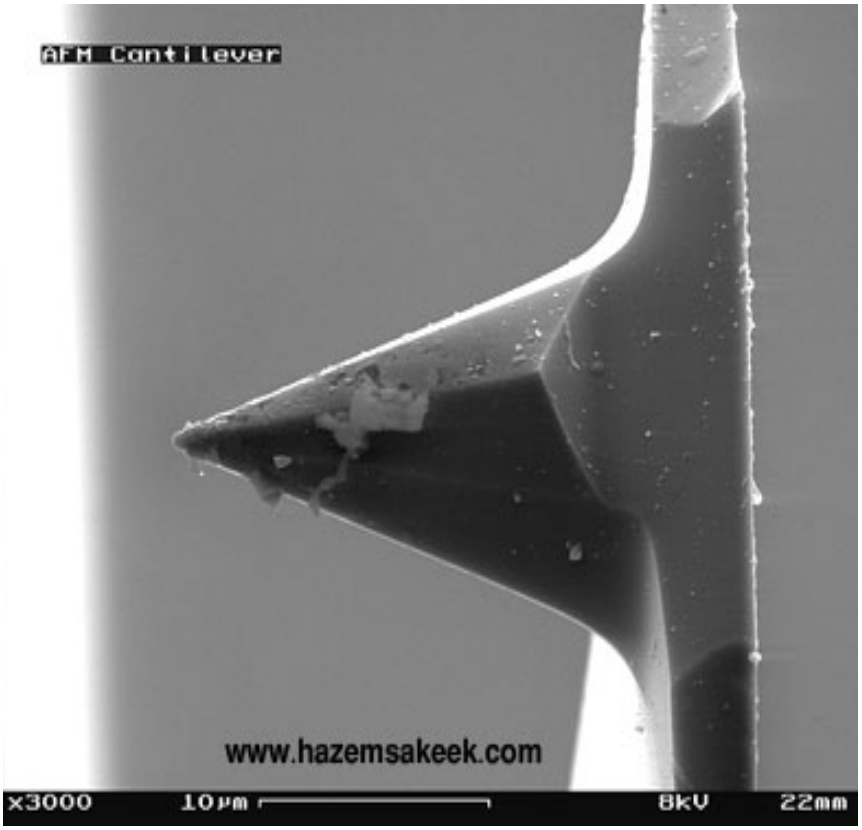
فمثلا لو كانت طريقة القياس تعتمد على الكهرباء الانضغاطية (بيزوالكتروك) فان الذراع تصنع من مواد بيزوالكتروك. ولكن تعتبر طريقة قياس الانحراف بشعاع الليزر الطريقة الادق والاكثر استخداما.



مخطط توضيحي لفكرة عمل ميكروسكوب القوة الذرية

إذا تم مسح المجس عند ارتفاع معين من سطح العينة فقد يكون هناك خطورة على المجس بان يصطدم بالسطح، ولتجنب حدوث هذا يتم استخدام تغذية عكسية للتحكم في المسافة بين المجس وسطح العينة لتحافظ على القوة المتبادلة 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 انواع اخرى من ميكروسكوبات القوة الذرية تستخدم 3 بلورات

بيزوالكتريك كل بلورة مسئولة عن اتجاه من اتجاهات الحركة الثلاثة. وفي التصاميم الحديثة يتم تثبيت الذراع على ماسح بيزوالكتريك افقي في حين يتم تحريك العينة فقط في الاتجاهين x و y. وفي النهاية نحصل على خريطة لمساحة تمثل طبوغرافيا سطح العينة.



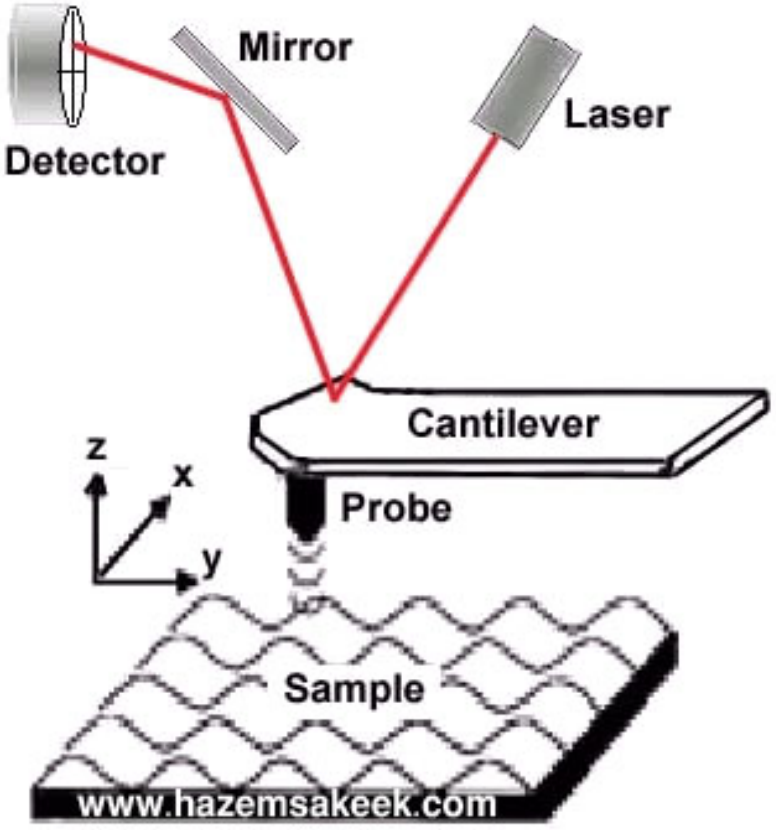
صورة توضح ذراع AFM ويبلغ عرضه 100 ميكروميتر ويمكن ان يصل ألى 20 ميكروميتر او اقل.

يمكن تشغيل ميكروسكوب القوة الذرية AFM بعدة انماط تشغيل وهذا حسب الاستخدام المطلوب ونوع الفحص المراد. وبصفة عامة يمكن تقسيم أنماط التشغيل إلى نوعين هما نمط التشغيل الاستاتيكي أو نمط الاتصال والنوع الثاني هو نمط التشغيل الديناميكي أو نمط عدم الاتصال.

انماط التشغيل واخذ الصور Imaging Modes

ذكرنا ان هناك نمطين اساسيين من انماط تشغيل جهاز AFM وهما النمط الاستاتيكي والذي يتم فيه سحب الذراع عبر سطح العينة ويتم مباشرة قياس تضاريس السطح من خلال الانحرافات في الذراع. والنمط الديناميكي يكون الذراع يتذبذب بالقرب من السطح عند تردد رنيني resonance frequency. ويتم قياس التردد والسعة والطور وتردد الرنيني من خلال القوة المتبادلة بين المجس وسطح العينة. هذه التغيرات في التردد بالنسبة للتردد المرجعي يعطي معلومات عن خصائص العينة.

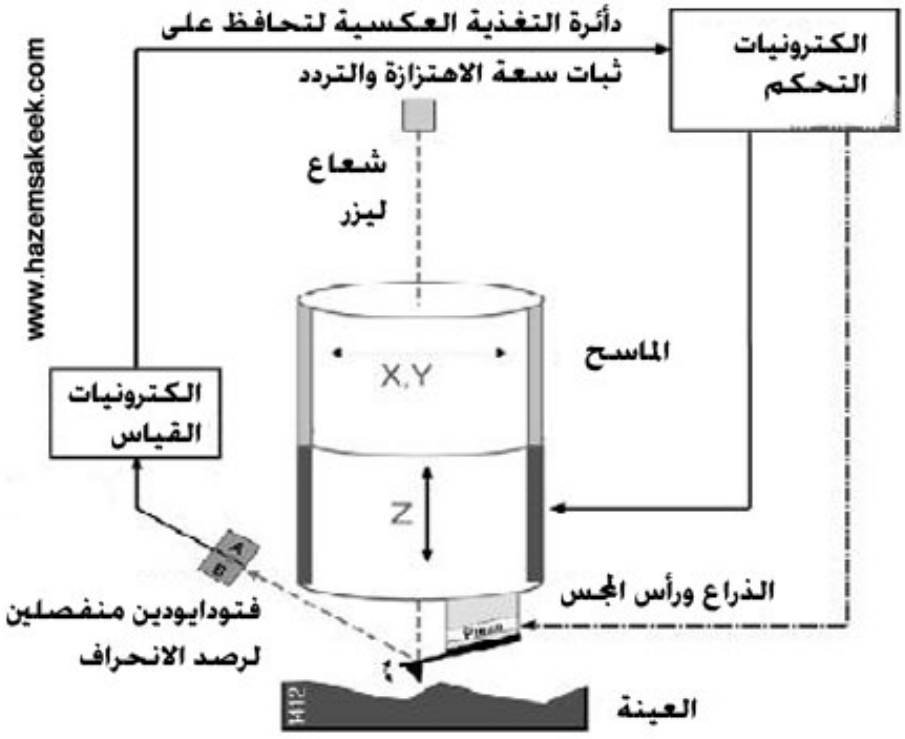
النمط الاستاتيكي او نمط الاتصال Contact Mode



في هذا النمط يستخدم الانحراف في رأس المجس كإشارة للتغذية العكسية ولان قياس الاشارة في هذا النمط يتعرض للتشويش يتم استخدام ذراع اقل صلابة لتكبير مقدار إشارة الانحراف. ويقرب المجس من سطح العينة بحيث تحدث قوة تنافر تنتج عن

الالكترونات على سطح العينة والكترونات المجس. ويتم الحفاظ على ثبات مقدار القوة التنافرية هذه اثناء المسح من خلال المحافظة بقاء الانحراف ثابتاً.

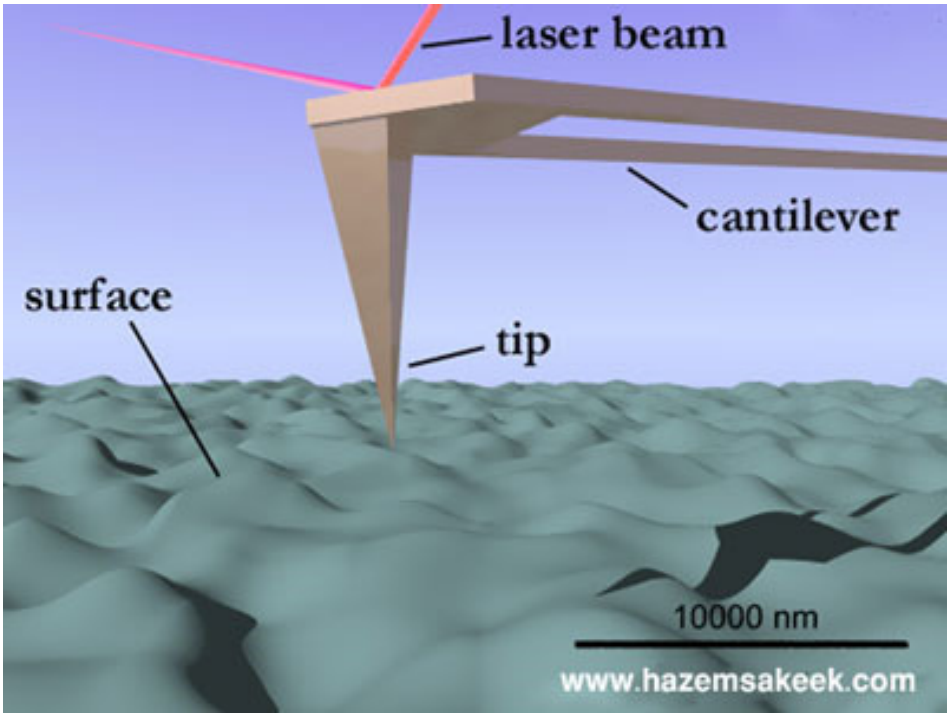
النمط الديناميكي او نمط عدم الاتصال Non-contact Mode



نمط عدم الاتصال في ميكروسكوب القوة الذرية

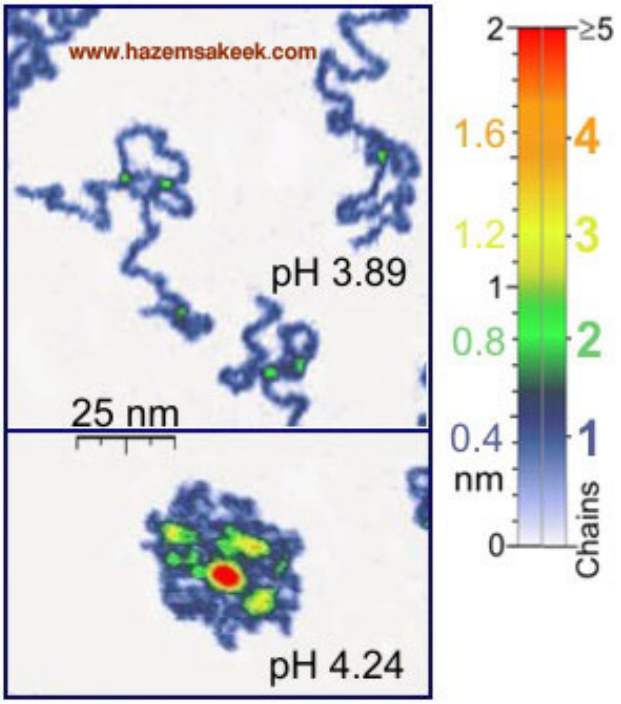
في هذا النمط لا يكون المجس متصلا مع سطح العينة. بل يكون الذراع متذبذب عند تردد أكبر بقليل من تردد الرنين حيث تكون سعة الذبذبة في حدود بضعة نانومترات (اقل من 10 نانومتر). وتكون القوة المتبادلة بين المجس وسطح العينة هي قوة فاندرفال van der Waals وهي تكون مسيطرة عند تلك المسافة أي في حدود 1 الى 10 نانومتر فوق سطح العينة، وهذه القوة تعمل على تقليل تردد الرنين للذراع. هذا الانخفاض في تردد الرنين يستخدم في نظام التغذية العكسية الذي يقوم بالحفاظ على سعة الاهتزازة ثابتا من خلال اعادة ضبط المسافة بين المجس والسطح. وبقياس

المسافة بين المجس والسطح اثناء المسح في الاتجاهين y،x يتم رسم الصورة لطبغرافية سطح العينة باستخدام برامج معدة لذلك.



في هذا النمط لا يتعرض رأس المجس لأي ضرر لأنه لا يحتك مع سطح العينة مثلما يحدث مع النمط السابق. وهذا يجعل من نمط التشغيل الديناميكي مفضلا أكثر وخصوصا في حالة التعامل مع العينات اللينة. ولكن في حالة العينات الصلبة فان الصور التي تؤخذ بكلا النمطين تكون متماثلة. ولكن إذا وجدت طبقة نانوية من مادة سائلة على سطح العينة فان النمطين سوف يعطيان صورا مختلفة بعض الشيء، لان المجس في النمط المتصل يخترق طبقة السائل ليعطي صورة للسطح الاسفل منها، في حين ان النمط غير المتصل سوف يتذبذب فوق السطح ويعطي صورة لكل من السائل والسطح معا.

نمط النقر Tapping Mode

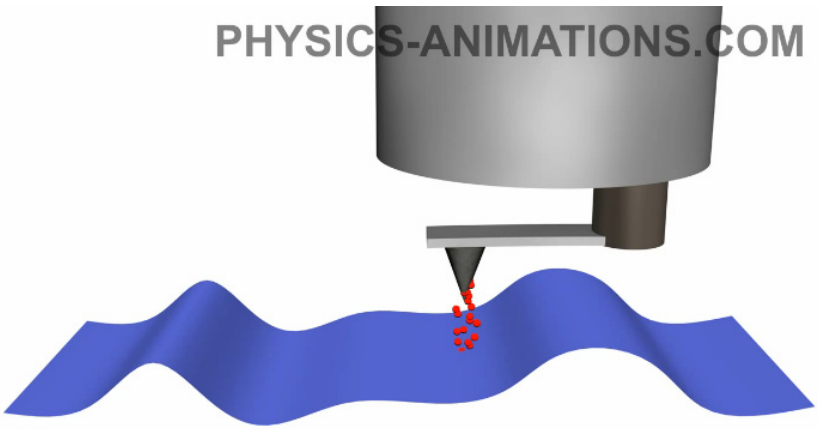


سلسلة بوليمر مفرد، (بسمك 0.4nm)، سجلت بنمط النقر Tapping mode في وسط مائي عند قيم pH مختلفة

في اغلب الاحيان تتكون طبقة مائية فوق سطح العينة. ولأننا نجعل رأس المجس قريب جدا من العينة للحصول على إشارة لمقياس القوة المتبادلة فانه من المحتمل ان يلتصق رأس المجس بالعينة، ولمنع هذا من الحدوث تم تطوير النمط الغير متصل بنمط النقر tapping mode وذلك للتغلب على هذه المشكلة.

في نمط النقر تتذبذب الذراع للأعلى والاسفل بالقرب من تردد الرنين وتكون سعة الذبذبة أكبر من 10 نانو متر حيث تتراوح بين 100 و200 نانومتر. ونظرا للقوة المتبادلة التي تؤثر على الذراع عند اقترابها من سطح العينة فان قوة فاندرفال أو قوة ثنائيات القطب المتفاعلة او القوى الكهروستاتيكية تتسبب في تغير في سعة الذبذبة وتقل كلما اقترب رأس المجس من سطح العينة. يتم التحكم بارتفاع الذراع بواسطة

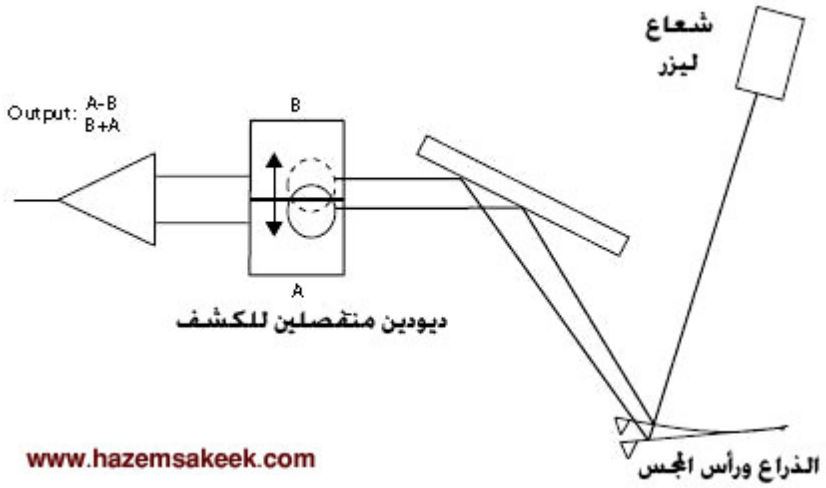
بيزوالكترك تعمل على ضبط ارتفاع الذراع اثناء مسح العينة. ويعتبر نمط التشغيل هذا نمطا متطورا عن نمط عدم الاتصال.



عرض يوضح فكرة عمل ميكروسكوب القوة الذرية بالأنماط المختلفة

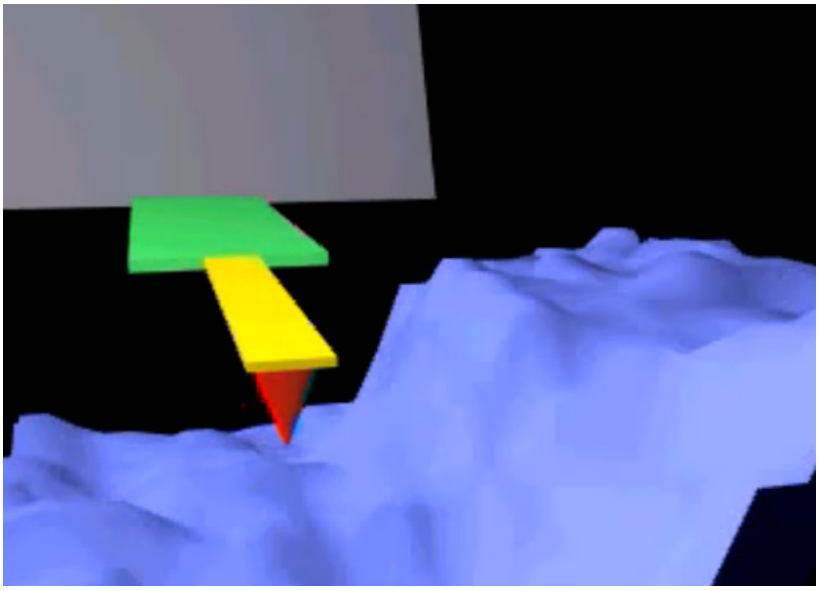
http://www.youtube.com/watch?v=Nfu4BPmbFoI

قياس انحراف ذراع ميكروسكوب القوة الذرية



قياس انحراف الشعاع في جهاز AFM

ينعكس شعاع ليزر دايود على الجانب الخلفي للذراع ويتم التحكم فيه من خلال كاشف حساس للموضع position sensitive detector (PSD) يتكون من فوتوديودين موضوعين بالقرب من بعضهما البعض والمخرج من كل فوتودايود موصول بمكبر differential amplifier. الازاحة الزاوية للذراع تجعل أحد الديودين يلتقط اشارة أكبر من الديود الاخر. وهذا يعطي اشارة تتناسب مع انحراف الذراع. وتصل حساسية الجهاز الى كشف انحراف اقل من 10 نانومتر. ويمكن تكبير التغير في زاوية الشعاع بزيادة طول مسار شعاع الليزر بضع سنتيمترات.



عرض يوضح عمل ميكروسكوب القوة الذرية

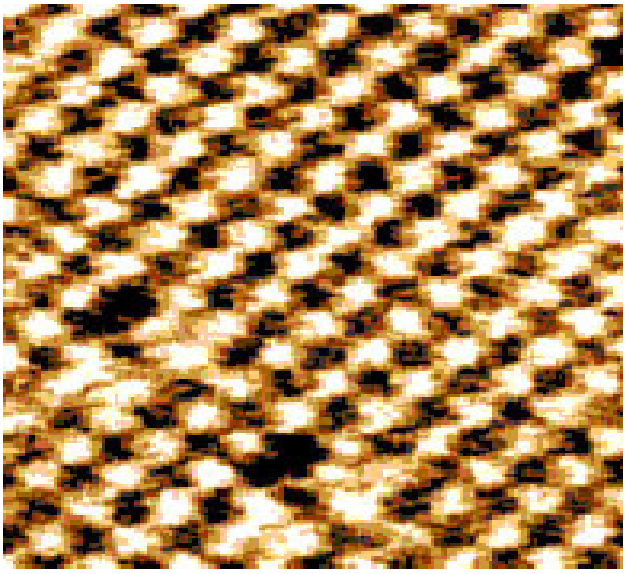
http://www.youtube.com/watch?v=ZfotHVtylq0

مطياف القوة Force Spectroscopy

بالإضافة إلى استخدام 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 باسم منحنى القوة والمسافة force-distance curve. في هذه الطريقة يتم مد رأس المجس وسحبه عن سطح العينة اثناء مراقبة انحراف الذراع كدالة في ازاحة البيزوالكتريك. هذه الوظيفة استخدمت في قياسات على المستوى النانوي مثل

الروابط الذرية وقوى فانردفال وقوى كايسمر وقوى التحلل في السوائل والجزيئات المفردة وقوى التمدد والتمزق. وهذه القوة صغيرة جدا في حدود البيكونيوتن piconewton ولا يمكن قياسها باي جهاز اخر والان أصبح قياسها ممكنا بجهاز AFM وبدقة تحليلية تصل الى 0.1 نانومتر. يمكن الحصول على قياسات مطياف القوة في كلا نمطي التشغيل الاستاتيكي والديناميكي.

التعرف على الذرات وتميزها



صورة بلورة كلوريد صوديوم بواسطة ميكروسكوب القوة الذرية

يستخدم مقياس القوة الذرية AFM للحصول على صور للذرات ولتحريكها ايضا على أسطح المواد. فالذرة على رأس المجس تتحسس الذرات ذرة ذرة على سطح العينة وتشكل قوة كيميائية مع كل ذرة. ولان هذه التفاعلات تغير بشكل دقيق تردد اهتزاز رأس المجس، فإنها يمكن ان تقاس وترسم. وعلى هذا الاساس تم التميز بين ذرات السليكون والرصاص على سطح سبيكة، من خلال مقارنة البصمات الذرية وتكبيرها. حيث تم ملاحظة ان رأس المجس يتفاعل مع ذرات السليكون بقوة في حين يتفاعل مع ذرات التن والرصاص بقوة اقل. ولهذا فان الذرات المختلفة يمكن ان تتميز في صورة مصفوفة اثناء مرور رأس المجس على سطح العينة.

أول ميكروسكوب قوة ذرية

المزايا والعيوب

ميكروسكوب القوة الذرية AFM له عدة مزايا عن الميكروسكوب الالكتروني الماسح SEM. كما انه ليس مثل الميكروسكوب الالكتروني الماسح الذي يوفر صور أقرب لان تكون ثنائية الابعاد أما ميكروسكوب القوة الذرية يعطي صور ثلاثية الابعاد للسطح، بالإضافة إلى ان العينات لا تتطلب معاجلة خاصة مثلما يحدث في الميكروسكوب الالكتروني كتغطيتها بالكربون أو الذهب وهذا يفسد العينة، كما ان الميكروسكوب يعمل في الظروف العادية في حين ان الميكروسكوب الالكتروني يتطلب ان يعمل في الفراغ. وهذا جعل ميكروسكوب القوة الذرية جهازا لدراسة الخلية الحية. وميكروسكوب القوة الذرية يمتلك قدرة تحليلية عالية تفوق قدرة SEM وSTM.

من عيوب جهاز AFM بالمقارنة مع جهاز SEM هو حجم الصورة. فجهاز SEM قادرا على مساحة تصل الى بضعة مليمترات وبعمق يصل الى بضعة مليمترات الا

ان جهاز AFM يعمل على مساحة لا تتعدى 150x150 مايكرومتر وبعمق 10 – 20 ميكروميتر. ولكن هذا العيب تم التعامل معه من خلال تطوير اجهزة AFM بواسطة شركة IBM تعمل بمجسين متوازيين.

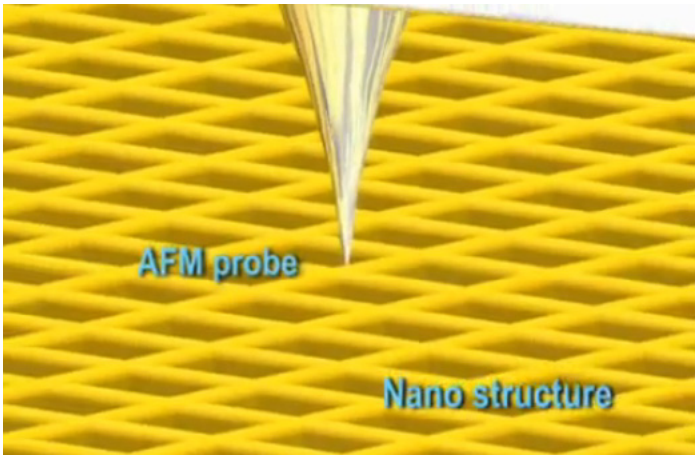
كما ان استخدام رأس مجس tip غير مناسب قد يعطي بعض العيوب في الصورة الناتجة. بالإضافة الى ان AFM يعمل ببطء بالمقارنة مع SEM الذي يعطي صورة حية للعينة فان AFM يتطلب ان يعمل لبضعة دقائق حتى يعطي صورة. وهذا التأخير يؤدي الى انزياح حراري في الصورة مما يجعل ميكروسكوب القوة الذرية غير مناسب للقياسات الدقيقة للمسافات الطوبوغرافية على الصورة. ويتم تطوير اجهزة AFM للتغلب على هذه المشكلة بأجهزة تعرف باسم videoAFM والتي تعمل بسرعة فاقت سرعة SEM.

تتأثر صور AFM بالتخلف hysteresis في المواد البيزوالكتريك والتداخل في الاشارات الملتقطة لكل من y،x أثناء المسح ولكن هذا تم التغلب عليه باستخدام برمجيات متطورة وفلاتر خاصة أو باستخدام ماسحات متعامدة منفصلة.

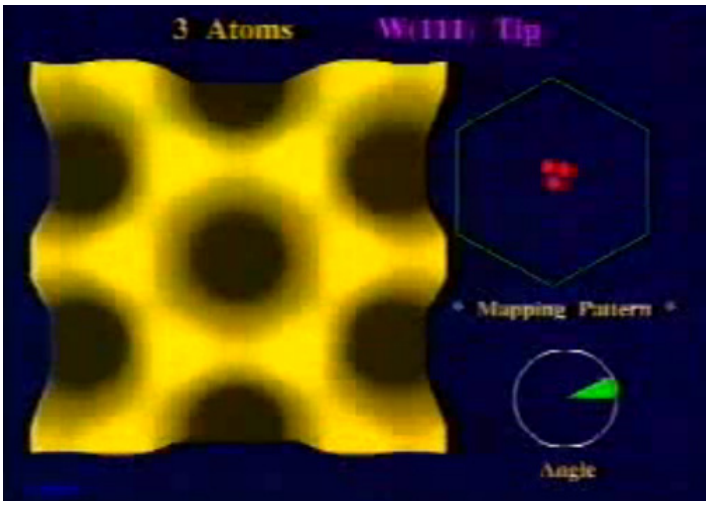
ماسح البيزوالكتريك Piezoelectric هو عبارة عن ماسح من مادة بيزوالكتريك وهي مواد تنضغط وتتمدد بتطبيق فرق جهد كهربي وهذه الخاصية تستخدم في تحريك رأس المجس على العينة بدقة عالية. وقد تم شرح فكرة عمل البيزوالكتريك في مقال كيف تعمل الكهرباء الانضغاطية.

نلاحظ كيف ان الميكروسكوبات تختلف باختلاف الطريقة التي تقوم بها بالحصول على الصورة وهنا قمنا بشرح فكرة مبسطة عن ميكروسكوب القوة الذرية والذي مكن العلماء من رؤية الذرات والتمييز بينها والتحكم بها الذي فتح الباب امام تكنولوجيا النانو لتدرس المواد على المستوى الذري وفهم الكثير من خصائصها.

مقاطع فيديو توضح فكرة عمل الميكروسكوب النفقي الماسح



http://www.youtube.com/watch?v=RjQSVTLAgbI



http://www.youtube.com/watch?v=4fSyYaFGlUI

مراجع مفيدة لمزيد من المعلومات

http://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_force_microscopy
http://www.asu.edu/news/research/afm_081704.htm
http://www.nanoscience.com/education/afm.html

د. حازم فلاح سكيك

استاذ الفيزياء المشارك بجامعة الأزهر - غزة

- رئيس قسم الفيزياء بجامعة الأزهر - غزة في الفترة 1993-1998.
- مؤسس وعميد كلية الدراسات المتوسطة بجامعة الأزهر - غزة من الفترة 1996-2005.
- عميد القبول والتسجيل بجامعة الأزهر - غزة في الفترتين 1998-2000 و2007-2008.
- مدير الحاسب الالي بجامعة الأزهر - غزة في الفترة من 1994-2000.
- رئيس وحدة تكنولوجيا المعلومات بجامعة الأزهر - غزة في الفترة من 2000-2005.
- مؤسس موقع الفيزياء التعليمي.
- مؤسس أكاديمية الفيزياء للتعليم الالكتروني.
- مؤسس مركز الترجمة العلمي.
- مؤسس قناة الفيزياء التعليمي على اليوتيوب.
- مؤسس ورئيس تحرير مجلة الفيزياء العصرية.

لمزيد من المعلومات يرجى زيارة

المؤسسة الإعلامية لشبكة الفيزياء التعليمية

www.hazemsakeek.net

من اصدارات شبكة الفيزياء التعليمية

سلسلة تبسيط الفيزياء

الميكروسكوبات الإلكترونية

Electron Microscopes

الدكتور حازم فلاح سكيك

أستاذ الفيزياء المشارك

في جامعة الأزهر - غزة

شبكة الفيزياء التعليمية

www.hazemsakeek.net