



جمهورية العراق
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
كلية العلوم - قسم الكيمياء

مجهر القوة الالكترونية

Atomic Force Microscopy

تطبيقات استعمالات وأساسيات عمل الجهاز

مشروع بحث مقدم الى

كلية العلوم / جامعة القادسية

كجزء من متطلبات نيل شهادة البكالوريوس في علوم الكيمياء

من قبل الطالبة

أسماء مهدي داغر

بإشراف

أ.م.د. أوراس عدنان حاتم

2019 م

1440 هـ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

﴿ن وَالْقَلَمِ وَمَا يَسْطُرُونَ (1) مَا أَنْتَ بِنِعْمَةٍ رَبِّكَ بِمَجْنُونٍ (2) وَإِنَّ لَكَ لَأَجْرًا غَيْرَ
مَمْنُونٍ (3) وَإِنَّكَ لَعَلَى خُلُقٍ عَظِيمٍ (4) فَسَتُبْصِرُ وَيُبْصِرُونَ (5)﴾

[القلم]

الأهداء

الى حكمتي..... وعلمي

الى ادبي وخطبي

الى طريقي المستقيم

الى طريق الصداقة

الى ينبوع الصبر والتفاؤل والامل

الى كل من في الوجود بعد الله ورسوله امي الغالية

الى من ضحى براحته من اجل راحتني ... والدي "رحمه الله"

الى مندي وقوتي وملاذي بعد الله

الى من اثروني على نفسه

الى من اظهروا لي مالموا اجمل من الحياه

اخبي

شكر وعرفان

قال رسول الله (صلى الله عليه واله وسلم)

((من لا يشكر الناس لا يشكر الله))

صدق رسول الله (صلى الله عليه واله وسلم)

نشكر كل من ساعدنا على اتمام هذا البحث وقدم لنا العون ومد لنا يد المساعدة وزودنا بالمعلومات اللازمة لإتمام هذا البحث ونخص بالذكر الى من علمتنا التفاؤل والتقدم إلى الإمام، إلى من وقفت الى جانبنا عندما ضللنا الطريق

((ا.م.د أوراس عدنان حاتم))

كما نتوجه بجزيل الشكر والامتنان الى كل من ساعدنا من قريب او بعيد على انجاز هذا العمل ولايفوتنا ان نشكر جميع أساتذتنا في كلية العلوم /قسم الكيمياء.

الخلاصة

مجهر القوة الذرية ((atomic force microscopy))

هو أداة تستخدم لفحص الأسطح. يتم وضع مجس صغير يحتوي على رقيقة صغيرة جداً من الألماس فوق سطح العينة بواسطة ناتئ محمل بنابض. عند تحريك المجس ببطء على السطح ، يتم قياس القوة بين السطح والطرف ويتم رفع المجس تلقائياً وخفضه للحفاظ على ثبات هذه القوة. يتيح مسح السطح بهذه الطريقة إنشاء خريطة طبوغرافية للسطح بمساعدة كمبيوتر. إن مجهر القوة الذرية يشبه إلى حد كبير مجهر المسح النفقي (STM) في بعض الطرق ،على الرغم من أنه يستخدم القوى بدلاً من الإشارات الكهربائية لفحص السطح. مثل STM ، يمكن أن تعمل مسحا للجزيئات الفردية. على عكس STM ، يمكن استخدام AFM لفحص المواد غير الموصلية ، وهي ميزة مفيدة في فحص العينات البيولوجية.

1-1 مجهر الطاقة الذرية او ما يسمى مجهر القوة الذرية AFM

هو جهاز يستخدم في مجال تقنية النانو لمعرفة ورسم تضاريس السطوح ذات الابعاد النانوية والميكروية.

وهو ذو أهمية أساسية في العديد من التطبيقات AFM حتى الان تم وضع العديد من الأساليب لهذا الغرض وتشمل الأساليب التي يراقب الانحراف الثابت Cantilevers وتلك التي تستخدم حيث تم تحديد الثابت من النتوء AFM من qusquon الرنان غير المفرد مطلوب أيضا كتلة الكابول ويتم الحصول عليها عادة من ابعاد عرض الكثافة من حيث ان

$$K = me pe bhlw^2 vac \dots \dots \dots 1$$

ac = هو التردد الأساسي للنتوء القطري في الفراغ

L, b, h = سماكة الناتئ

W = طول النتوء

Pe = كثافة النتوء

me = الكثافة الفعالة المعتاد التي تأخذ القيمة (0.2427)

وقد تم تطبيق معادلة رقم (1) لعدة أسباب علمية

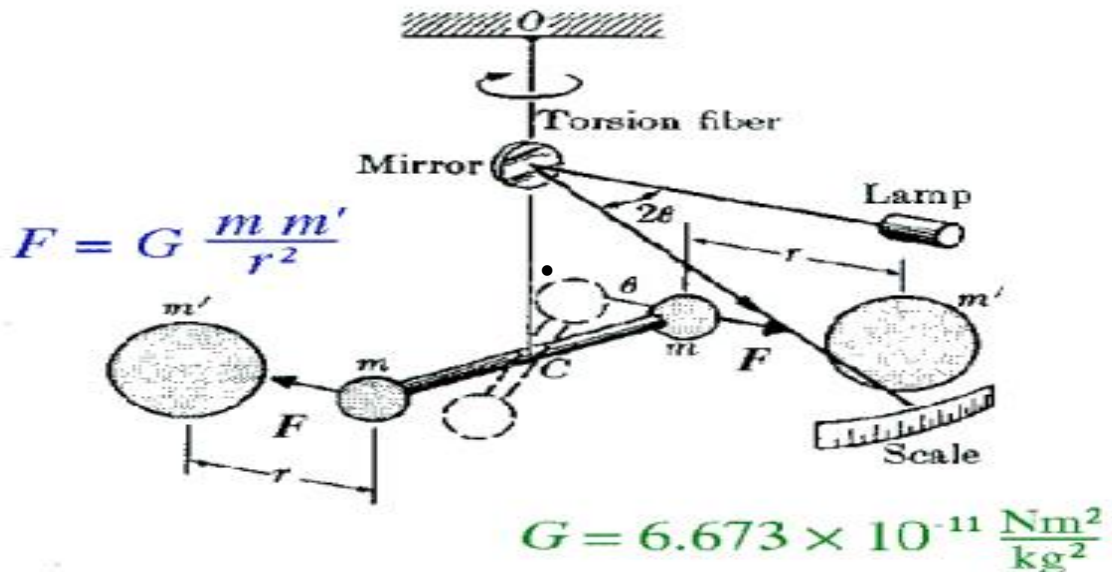
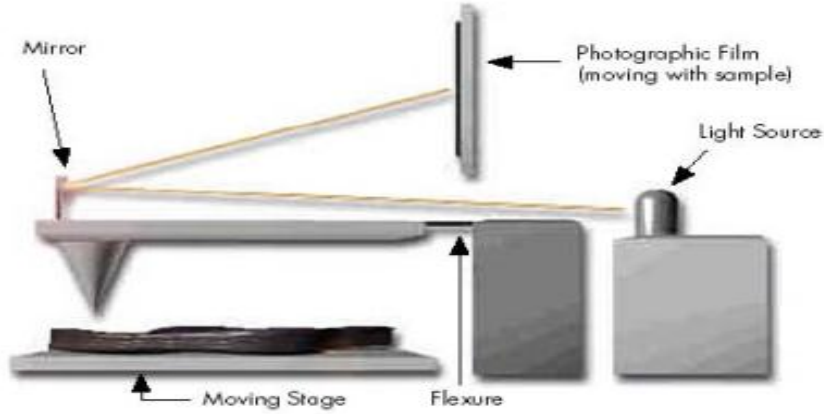
على النقيض من ابعاد عرض المخطط للنتوء يتم قياسها بسهولة باستخدام تقنيات بصرية

في الاكتشافات الحديثة الا انه لا يتعامل الا مع العينات الناقلة المطلية بالناقل الامر الذي حد من تطبيقاته لذلك تم تطويره في هذه القوم الذرية (AFM) في محاولة لتوسيع تقنية المجهر الماسح النفقي لتشمل دراسة المواد الغير ناقلة كهربائيا كالبروتونات كما تم تطوير رأسه مدبب ليضمن مسح اكثر دقة لأبعاد اقل وفي عام 1986 أوضح كل من Qudhe و Binnig ولأول مرة أفكار مجهر القوة الذرية والذي يستخدم نهاية مدببة صغيرة جدة للمسار في نهاية الذراع (الكابل).

2-1 مقدمة تاريخية

اخترع ميكروسكوب القوة الذرية Afm العالمين Quate و Gevbar في عام 1986 وتوفر اول جهاز للاستخدام في المختبرات العلمية في عام 1986 ويعتبر هذا الميكروسكوب الأكثر شهرة كأداة تكبير وقياس وتحريك على المستوى النانوي.

رافعة خفيفة : استخدم لأول مرة لتضخيم مسافة الحركة التكبير : 1000X



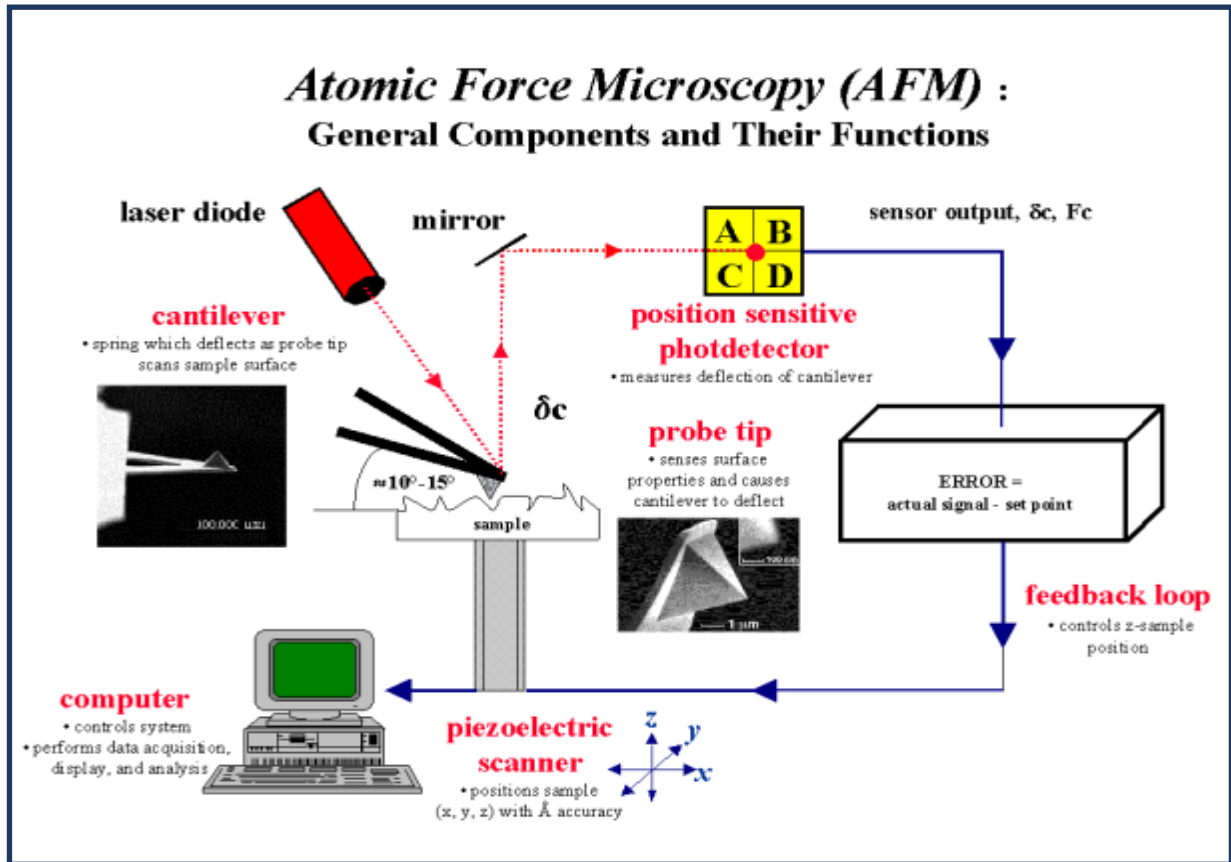
تجربة كافينديش : استطاع العالم كافينديش عام 1979 احتساب قيمة الثابت G في معادلة احتساب القوة

احتساب قيمة G حديثا تمكن علماء فيزيائيون في جامه (اوسكا) في اليابان من استخدام المجهر القوة الذرية Afm في التعرف على هوية التركيب الكيميائي وتحديد نوع كل ذرة ومكان تواجدها على المخطط ثلاثي الابعاد وتضاريس سطح المادة على المستوى الذري وقد اكتشف هؤلاء العلماء ان التفاعلات تشكل بصمة ذرية لتمييز الذرات بأستخدام المجهر Afm.

3-1 مقارنة بين المجهر الالكتروني الضوئي ومجهر القوة الذرية :-

1- يمكن للمجهر الضوئي والمجهر الالكتروني توليد صورة ثنائية الابعاد ولسطح العينة بسهولة مع تكبير 1000 مرة وبضع مئات الالاف 100.000 بالنسبة للمجهر الالكتروني مع ذلك فأن المجاهر لا تستطيع قياس البعد العمود (في الاتجاه Z) للعينة . الارتفاع (للجزيئات على سبيلالمثال) من العينة المدروسة.

2- مجهر القوة الذرية والذي يستخدم نهايته مدببة حادة لتكبير معالم السطح ليتمكن تصويره طبوغرافية السطح التكبير العالي لغاية تصل الى 1000.000 مرة مقارنة او حتى افضل من المجاهر الالكترونية.



المكونات العامة لمجهر القوة الذرية

4-1 مبدأ العمل:-

يتألف الجهاز من ابرة ذات ابعاد ميكرونية تقوم بالمرور على السطح المراد مسحة

تكون هذه الابرة مثبتة الى الحامل الافقي بينما تكون هي نفسها عمودي على هذا الحامل وعلى سطح المراد مسحة يتم اسقاط اشعاع ليزري على الحامل والذي يرتفع وينخفض مع ارتفاع وانخفاض الابرة وبالتالي مع تنوع تضاريس السطح في ارتفاع وانخفاض وسيتم التقاط منعكس الاشعاع الليزري على الحامل مستقل وبالتالي يتم تحديد ورسم التضاريس السطح الممسوح نتيجة لحركة منعكس الاشعاع الليزري.

يستطيع مجهر القوة الذرية رؤية احجام بين 20 – 300 نانوميتر وهي احجام الفيروسات اما احجام البروتينات فهي ما بين 1-30 نانوميتر بالمقارنة بأحجام كرات الدم الحمراء فهي تصل الى 7000 نانومتر أي (7مايكرومتر)

5-1 المبدأ الأساسي:-

يتكون ميكروسكوب القوة الذرية Afm من ذراع Cautilev في نهايته مجس probe مكون من رأس حاد يعرف tip يستخدم لمسح سطح العينة.

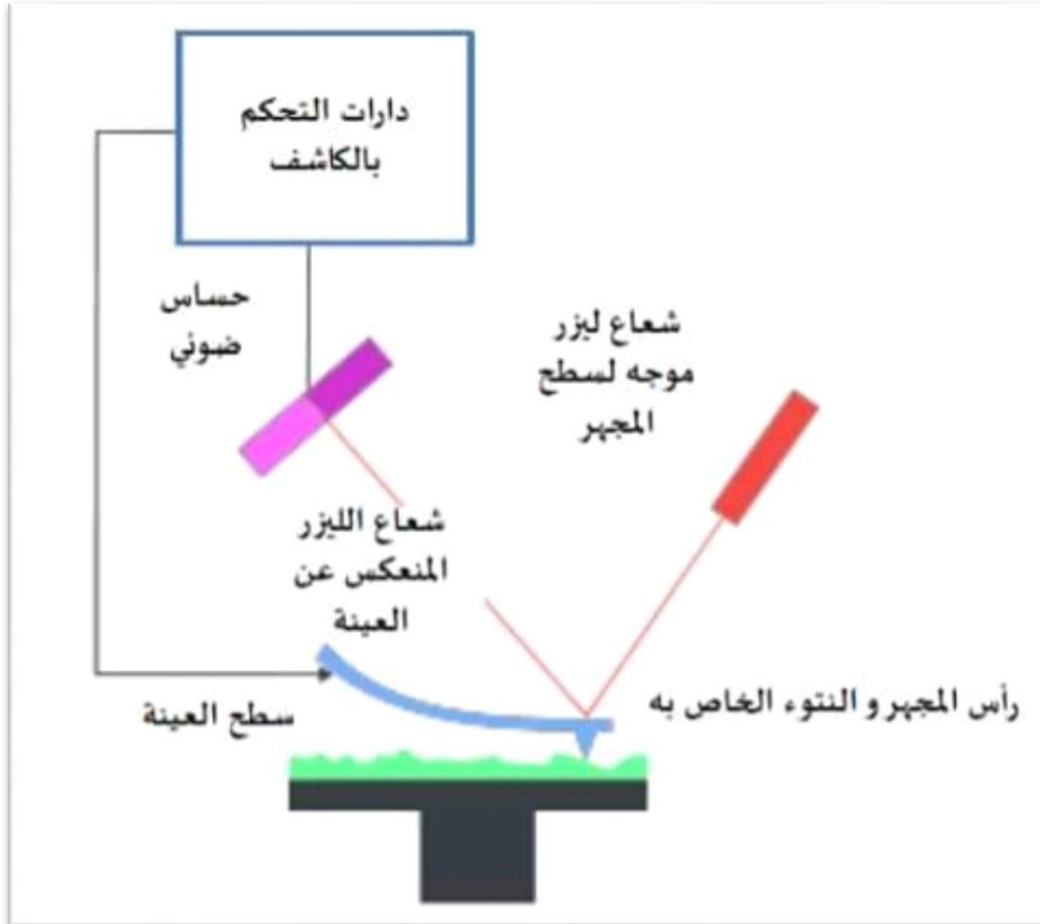
يتكون الذراع مصنوع من مادة السليكون او نتريد السليكون بنصف قطر في حدود بضعة نانومترات.

عندما يقترب المجس من سطح العينة يتولد قوة بين رأس المجس وسطح العينة تؤدي هذه القوة الى انحراف في الذراع بناء على قوة هوك.

كما يمكن دراسة العديد من أنواع هذه القوة باستخدام مجسات خاصة وعندها يسمى المجهر بأسمها مثل مجهر القوة المغناطيسية mfm او مجهر الماسح الحراري او غيره.

الليزر عالي الكثافة وبالتالي دقة مكانية فائقة واكثر حساسية للعينة الصغيرة على الكائن ثنائي الضوء

ثنائي الضوءي: حساسية عالية للكشف في بعدين



مخطط توضيحي لفكرة عمل ميكروسكوب القوة الذرية

6-1 آلية عمل مجهر القوة الذرية:

يقدم مجهر القوة الذرية توصيفا ثلاثي الابعاد للسطح على المقياس النانوي عن طريق حساب القوة بين المسبار الحاد (اصغر من 5نانومتر) والسطح وذلك على المسافة صغيرة جدا (البعد بين المسار والعينة 0.2-10 نانومتر) يكون المسار مثبتا على الكابول مرن. تقوم النهاية المدببة للمسار بلامسة السطح بلطف وتسجيل القوة الصغيرة بين المسبار والسطح يوضع المسبار في نهاية الكابول (والذي يمكن للمرء ان يفكر به كأنه نابض) كمية القوة بين المسبار والعينة يمكن وصف هذه القوة بأستخدام قانون هوك

$$F = -k * X$$

$$F = \text{القوة}$$

$$K = \text{ثابت النابض}$$

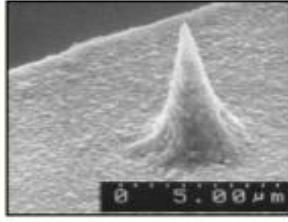
$$X = \text{إخفاء ذراع الكابول}$$

إذا كان ثابت النابض الكابول اقل منه السطح أي قل من ثابت النابض الممسك بذرات العينة مع بعضها البعض

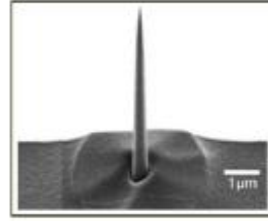
(أيضا هنا تم تشبيه الروابط بين الذرات بنوابض) بتسخين الكابول وتتم مراقبة الانحناء.

7-1 المواد الداخلة في صناعة المسبار

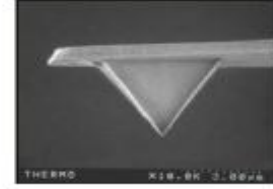
يصنع المسبار عادة من نتريد السيليكون Si_3N_4 او السيليكون Si تسبب لكل من الأطوال والمواد والاشكال المختلفة للكابول تغييرا في الثابت النابض وتواتر التجاوب. يعكس للمسبار ان يطلى بمواد أخرى وذلك من اجل تطبيقات إضافية مثل مجهر القوة الكيميائية (CFM) ومجهر القوة المغناطيسية



Diamond-coated tip



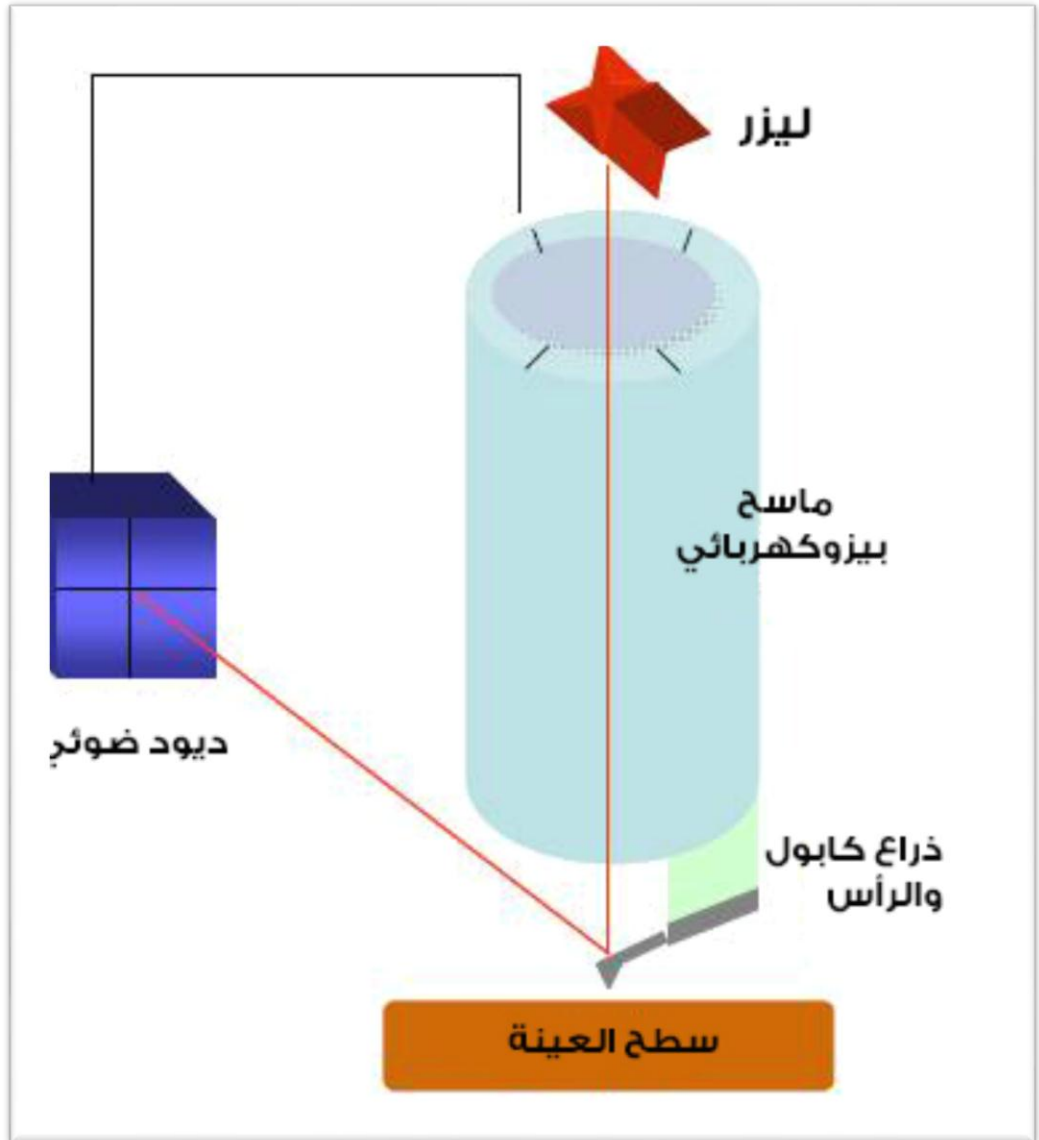
FIB-sharpened tip



Gold-coated Si₃N₄ tip

أنواع المواد المستخدمة في صناعة المسبار

يتم التحكم بحركة المسبار على السطح بشكل مشابه لذلك في مجهر المسح النفقي باستخدام حلقة تغذية راجعة وماسح بيزو كهربائي (عادة يكون الكابول مرتبط بماسح يتحكم بحركة شاقوليه في الاتجاه Z وتتوضح العينة على المسار X, Y يتحكم في الحركة على المستوى الافقي) ويكون الفرق الرئيسي في تصميم الأجهزة هو التحكم بالقوى بين المسبار و سطح العينة يتم قياس انحناء المسبار عادة بأستخدام طريقة ارتداء الحزمة. حيث يرتد ليزر من الجزء الخلفي للكابول ليصل الى كاشف ديود ضوئي (تأين ضوئي مصنوع من نصف ناقل عند تعرضه للضوء يولد تيار فيه دائرته فيتم قياسه) حساس للمسوح . يقوم الكاشف بحساب انحناء الكابول خلال مسح النهاية المدببة للعينة . يستخدم انحناء الكابول المقاس في توليد خريطة لطوبوغرافية السطح.



8-1 أنواع القوى التي يتم قياسها:

ان التفاعلات المهيمنة على المسافات الصغيرة بين المسبار والعينة في مجهر القوة الذرية هي تفاعلات فاندرفالز (وهي تفاعلات تنشأ نتيجة استقطاب كهربائي لحضي بين ذرات او جزيئات تكون قريبة من بعضها جدا وهذه التفاعلات تعتبر من اضعف التفاعلات بين الجزيئات) اما التفاعلات طويلة المدى

(كالسعرية والكهربائية والساكنة والمغناطيسية) يكون ذات أهمية بعيدا عن السطح وهي مهمة في طرق التحليل الأخرى

خلال الالتماس مع العينة فان القوى المسيطرة التي يواجهها المسبار هي قوة فاندرفالز التناظرية (خط التماس) هذا يؤدي الى انحاء النهاية المدببة الموصوفة سابقا.

اثناء حركة النهاية المدببة بعيدا عن السطح تكون قوة فاندرفالز التجاذبية هي المسيطرة (لخط الالتماس).

9-1 أنماط التشغيل

1- نمط التماس :- يكون التباعد بين السطح والمسبار اصغر من 0.5 نانومتر(قوة فاندرفالز التناظرية) عندما يكون ثابت النابض الكابول اقل من السطح فان الكابول ينحني القوة على النهاية المدببة في قوة تناظرية.

عن طريق المحافظة على انحاء ثابت للكابول بأستخدام حلقة التغذية الراجعة (حيث يتم تحريك الماسح في الاتجاه Z العمودي ليحافظ على انحاء ثابت الكابول) فان القوة بين المسبار والعينة تبقى ثابتة ويتم الحصول على صورة للسطح وتدعى هذه الطريقة باسم القوة الثابتة وتستخدم في معظم التطبيقات هناك طريقة أخرى للقياس في نمط التماس هي طريقة الاشعاع الثابت وتستخدم لإخذ صورة على المستوي.

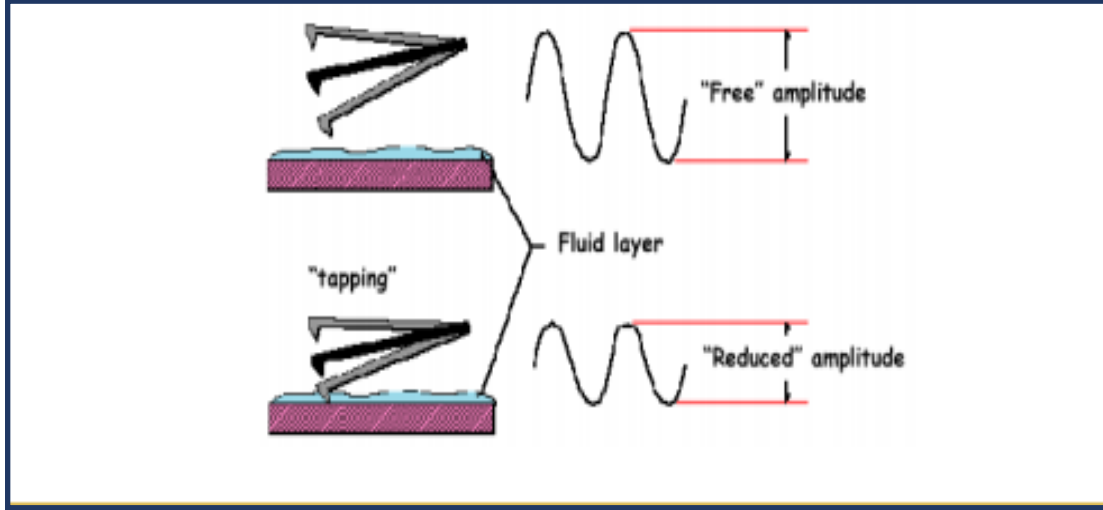
هنا يطفأ الماسح البيزو كهربائي في الاتجاه Z وتمسح العينة بدون تغذية راجعة في الاتجاه Z وعوضا عن ذلك يستخدم انحاء الكابول لتوليد معلومات مباشرة عن شكل السطح لان ارتفاع الماسح يثبت خلال الماسح . انحاءات الكابول والتغيرات في القوة المطبقة تكون صغيرة

مزايا نمط التماس

- 1- مسح السريع
- 2- جيدة للعينات القاسية
- 3- تستخدم في تقليل الاحتكاك

عيوب نمط التماس:-

يمكن ان تخرب او تشوه العينات الطرية مع ذلك فأن التصوير في السوائل عاده ما يحل هذه المشكلة .



توضيح نمط التماس

2- نمط التماس المتقطع (النقر):-

التباعد بين السطح والمسبار بين 2- 0.5 نانومتر التصوير في هذا النمط مشابه لنمط التماس. مع ذلك في هذا النمط يتغير الكابول عند تواتر تجاوب (التواتر الطبيعي الذي سيهتز به الجسم اذ ما ترك يهتز بشكل حر فمثلا اذا ضرب النابض في نهاية كتله – المسبر – فسيهتز للأعلى وللأسفل بتواتره الطبيعي (

يتعد المسبار بخفه على سطح العينة خلال عملية المسح ملامسا للسطح في نهاية اهتزازه. عن طريق المحافظة على سعة اهتزاز ثبته يتم المحافظة على تفاعل ثابت بين العينة والنهاية المدببة، ويتم الحلول على صورة للسطح .

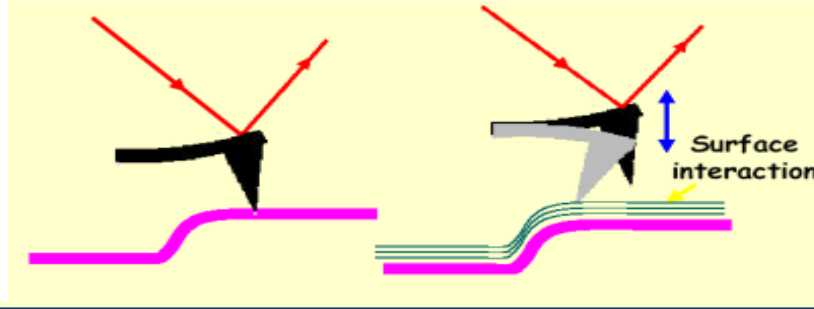
مزاياه

- يقدم دقة عالية للعينات التي تتخرب بسهولة
- جيد من اجل العينات البيولوجية.

العيوب

- مزيد من التحديات بالنسبة للتصوير في السوائل بحاجة الى سرعة مسح ابطأ

AFM imaging modes: Contact vs. Non-contact



شكل يوضح نمط التماس ونمط لا تماس

3- نمط عدم الاتصال (قوى فاندر فالز التجاذبية):-

التباعد بين السطح والمسبار 0.1- 10 نانومتر المسبار هنا لا يلامس سطح العينة ولكنه يهتز طبقة السائل المهتز على السطح خلال المسح .

ملاحظة (جميع العينات باستثناء العينات في التخلية الحساسة جدا والحجيرة البيئية لها بعض السائل المهتز أي المتجمع على سطحها دون ان يدخل العينة كما يحدث في الامتصاص)

يمكن باستخدام حلقة التغذية الرابعة في مراقبة التغيرات في السعة نتيجة قوة فاندر فالز التجاذبية حساب طبوغرافية السطح .

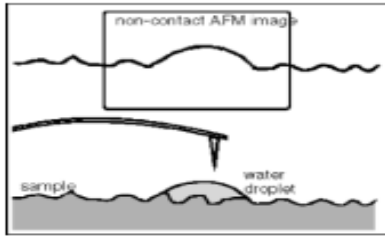
المزايا

القوة المطبقة على العينة الصغيرة جدا مما يزيد من عمر المسبار.

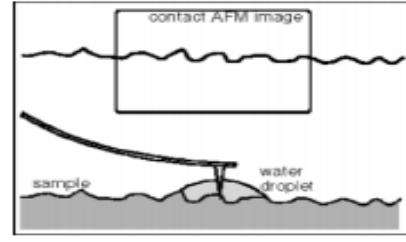
العيوب

- عادة دقة اقل
- طبقة ملوثة على السطح يمكن ان تتداخل مع الاهتزاز كما تحتاج عادة الى تخلية عالية جدا للحصول على صور افضل.

Non-Contact vs. Contact Through Water

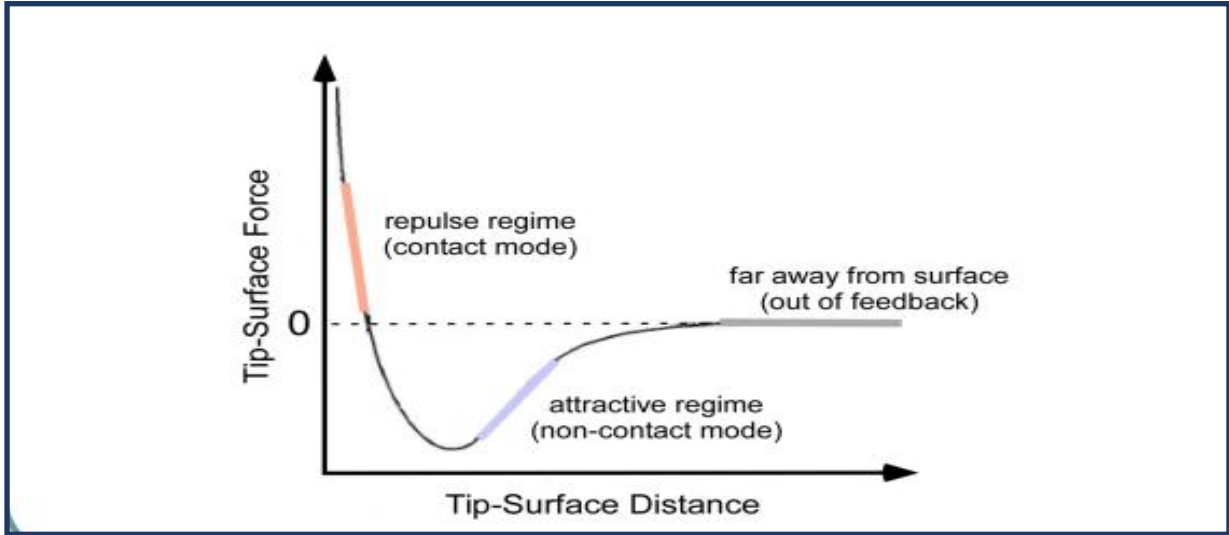


Non-Contact



Contact

توضيح نمط الاتصال وعدم الاتصال مطبق على عينة من الماء

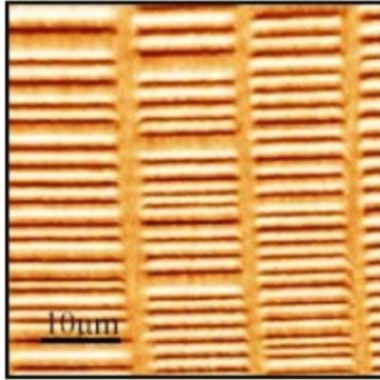


على يمين المنحني يفصل بين الذرات مسافة كبيرة. تبعد بين الذرات في بعضها البعض تدريجياً، تنجذب الى بعضها البعض بشكل ضعيف يزداد هذا التجاذب كلما اقتربت اكثر وعندما تصبح الذرات قريبة من بعضها جدا تتنافر السحب الالكترونية كهربائياً

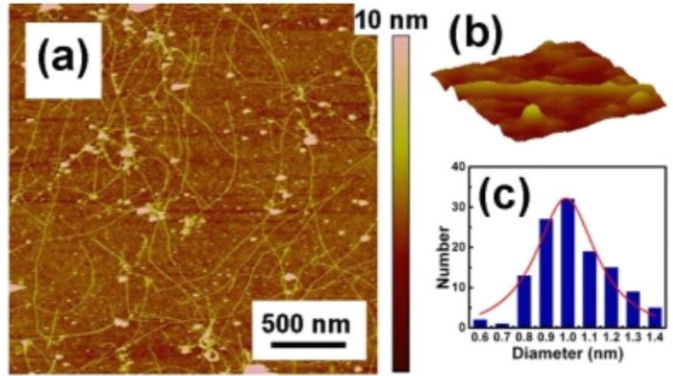
بأستمرار تتناقص المسافة بين الذرية تنقص قوة التنافر من قوة التجاذب الى ان تصبح القوة مساوية الى الصفر بين الذرات عندها تكون المسافة بينهما بضعة سنتمترات تقريبا بطول الرابطة الكيميائية عندها تصبح قوة فاندر فالز موجبة كلياً أي تنافرية تكون الذرات حينها متصلة ببعضها .

ميل منحني فاندرفالز يكون شديد الانحدار في منطقة التماس لذلك توازن قوة فاندرفالز التنافرية أي قوة تقريبا تحاول دفع الذرات لتقريبها من بعضها البعض. في مجهر القوة الذرية ذلك يعني ان دفع الكابول للإبرة باتجاه العينة سينحني الكابول بدلا من اجبار الذرات على التقارب من بعضها، حتى وان حسم الكابول بحيث قاسيا ليولد قوة كبيرة على العينة مسافة الفصل بين الرأس العينة لن تتناقص كثيرا،

AFM imaging: from mm to nm, to Å



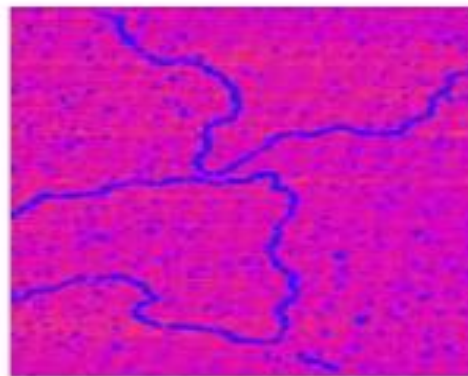
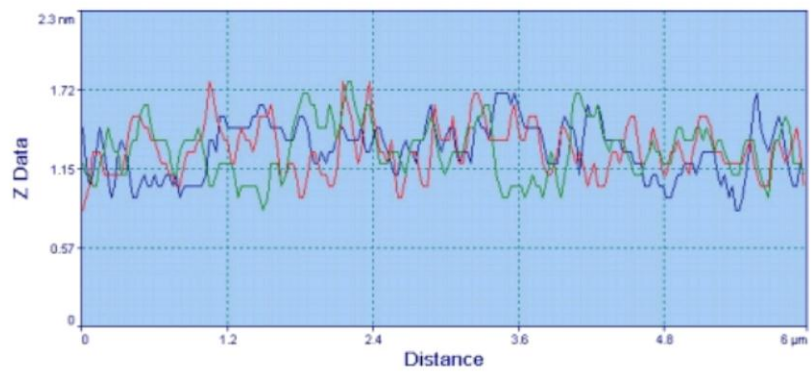
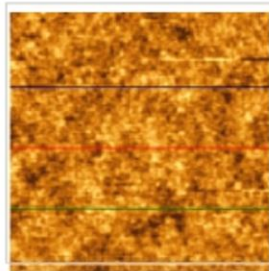
Magnetic bits of a zip disk



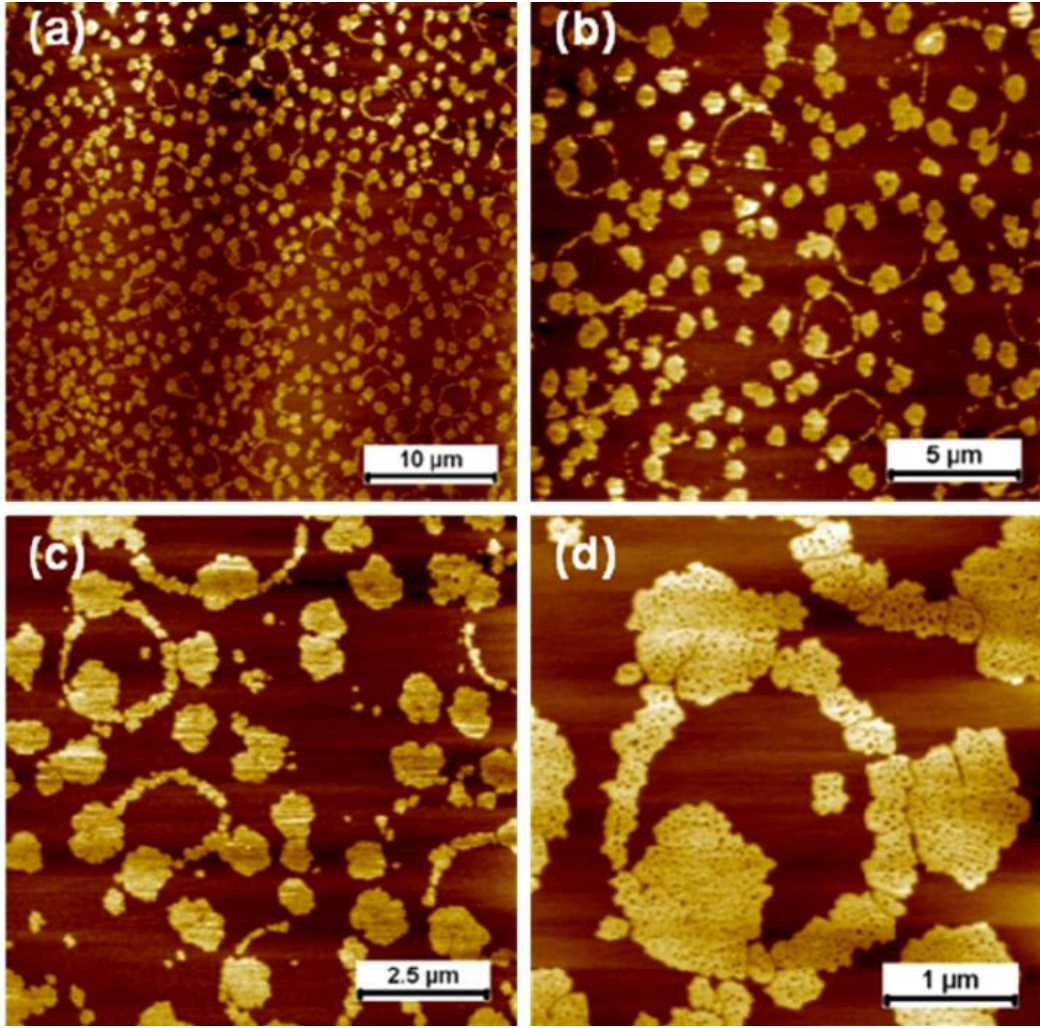
Carbon Nanotubes

وعوضا عن ذلك سيتخرب سطح العينة.

Clean glass surface: roughness ~ 0.8 nm



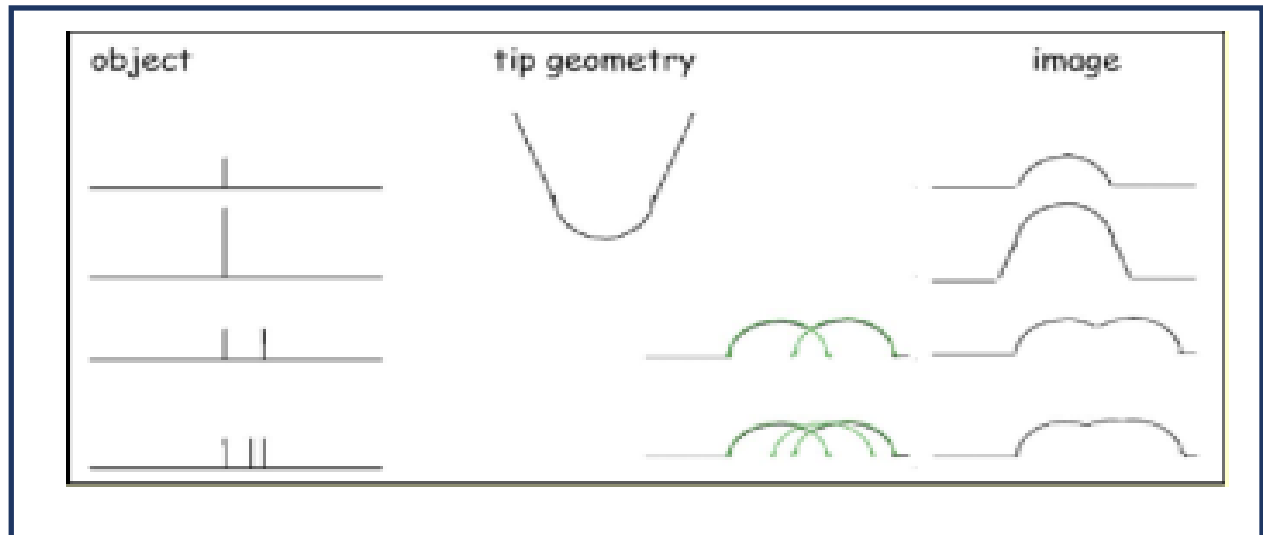
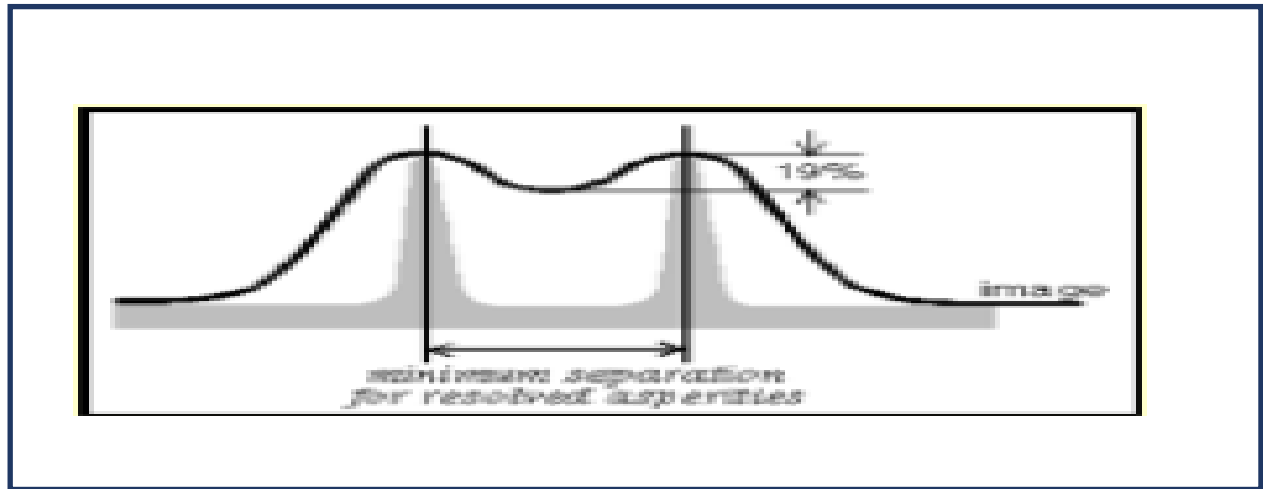
DNA image in fluid at 37°C.
800nm scan size.



مجهر للقوة الذرية للطبقات الدهنية المكونة من DPPC و DOPC (نسبة المولي 3:1) مع إضافة بروتين ECM فيبرونكتين بتركيز 5 ميكروغرام / مل عند 45 درجة مئوية تم تصوير هذه العينة في وضع التنصت في بيئة سائلة (الماء عالي النقاء) عند 20 درجة مئوية عند التكبير العالي المتتالي. يتضح من الصورة d أن مجالات الشحوم الفردية تتجمع لتشكيل الحلقات (وهذا واضح بشكل خاص في الزاوية اليمنى العليا حيث تتناسب الأجزاء الفردية التي تشكل انحناء الدائرة مع بعضها مثل القطع في أحجية بانوراما).

10-1 منحنيات القوة :-

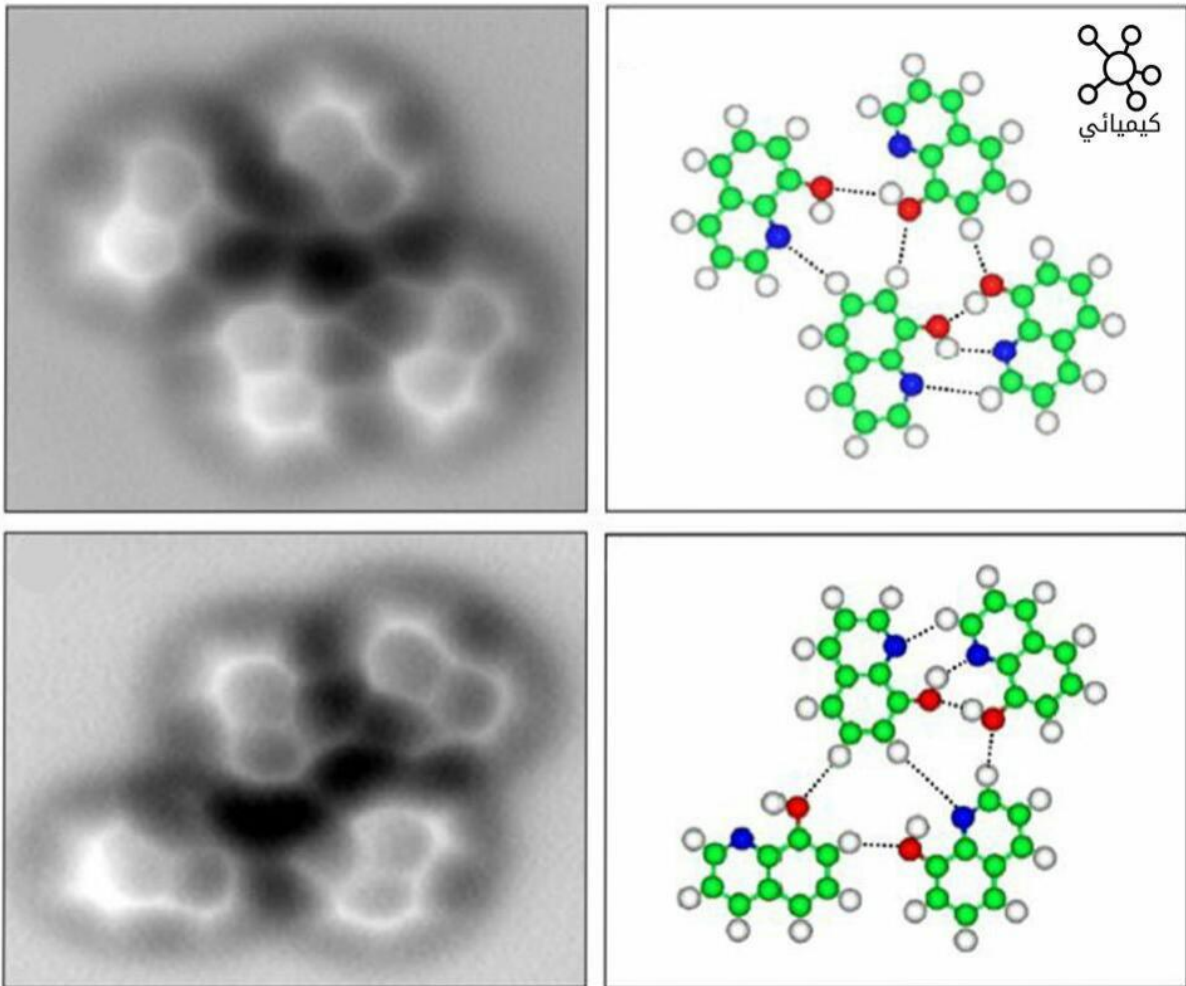
منحنيات القوة تعبر عن كمية القوة المحسوسة بواسطة الكابول اثناء تقريب النهاية المدببة للمسبار من سطح العينة ثم العادة عنها في تحليل منحنى القوة يتم جلب المسبار بشكل متكرر نحو السطح ثم ارجاعه يمكن استخدام تحليل المنحنى القوة في تحديد الخواص الكيميائية والميكانيكية مثل الالتفاف والقساوة والمرونة.



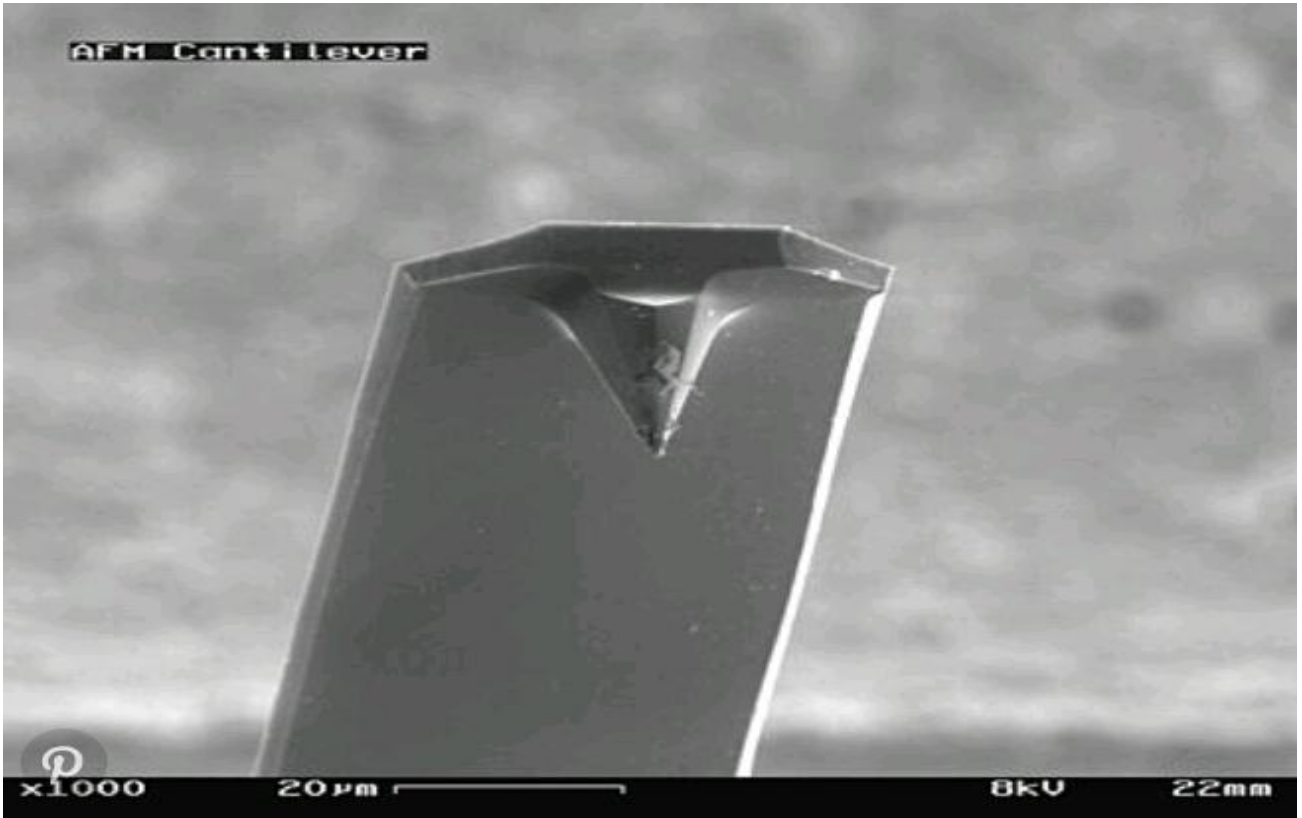
11-1 محددات استخدام مجهر القوة الذرية

يمكن استخدام مجهر القوة الذرية لدراسة مجموعة متنوعة من العينات (كالبلاستيك والمعادن والزجاج والضمامن والنواقل والعيّنات البيولوجية مثل جدران الخلايا والبكتريا) على العكس المجهر الماسح النفقي او المجهر الماسح الالكتروني فإنه لا يتطلب العينة الناقلة مع ذلك يوجد حدود في تحقيق الدقة الذرية .

المسبار المستخدم في التصوير في مجهر القوة الذرية ليس عادة بشكل المثالي . ونتيجة لذلك فإن صور هذا المجهر لا تعكس الطوبوغرافية الحقيقية للعينة و عوضا عن لك تمثل تفاعل المسبار مع سطح العينة.

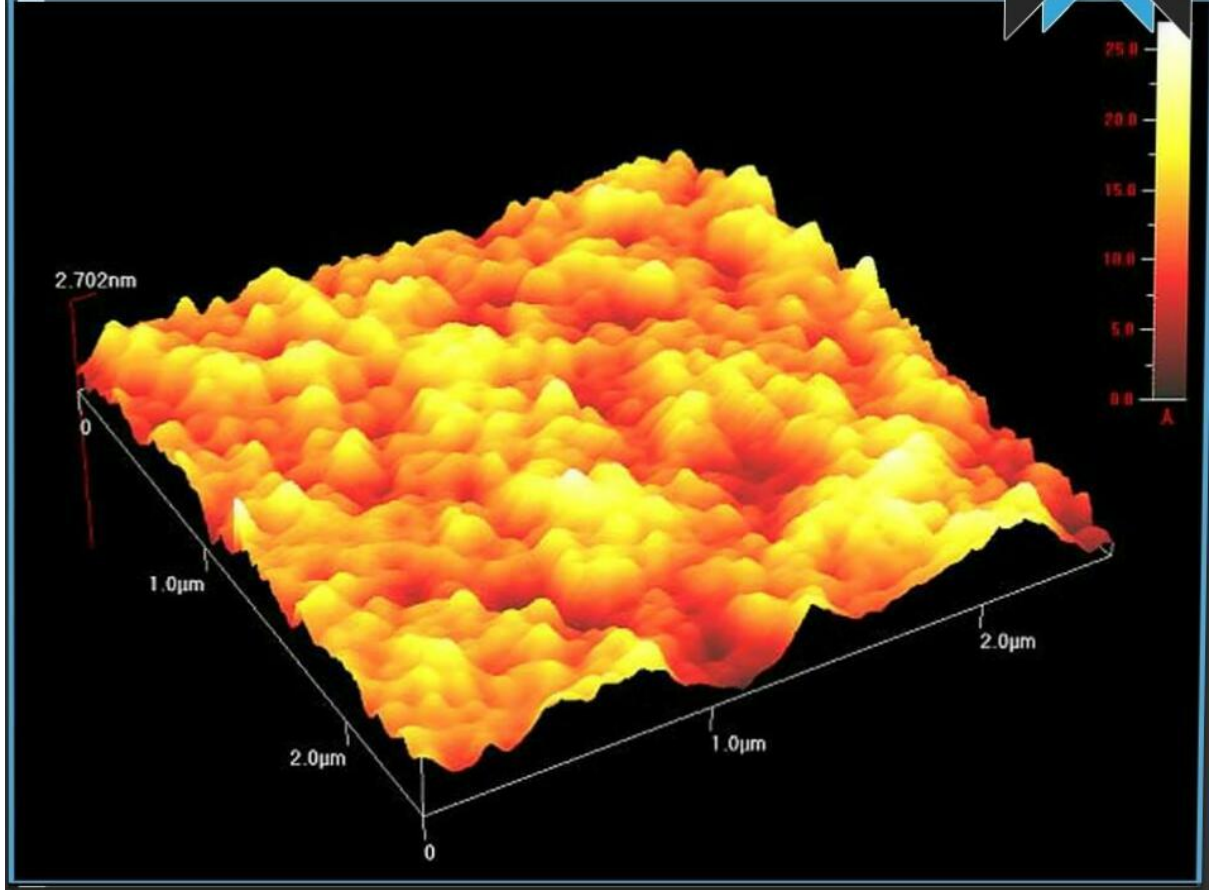


هكذا تبدو الروابط الهيدروجينية تحت مجهر القوة الذرية



صورة توضح ذراع AFM ويبلغ عرضه 100 ميكرومتر ويمكن ان يصل إلى 20 ميكرومتر او اقل

المسابر المتوفرة :- تجاربا أصبحت منتشرة على نطاق أوسع وهي مصنوعة من مواد كأنابيب الكربون النانوية ولكن هذه المسابر لازالت غالية الثمن جدا لأجل الاستخدام اليومي في تحليل الصور



صورة ثلاثية الابعاد لسطح بوليمر فلوري تم الحصول عليها باستخدام مجهر القوة الذرية

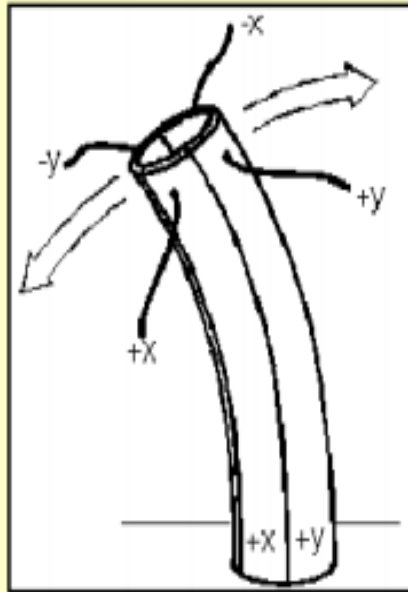
12-1 الكابول

هو قضيب مثبت في احدى نهاياته ليشكل دعامة افقية لينة مثل الجسور والرفوف وهنا هو يشكل دعامة للرأس المدبب للمجهر .

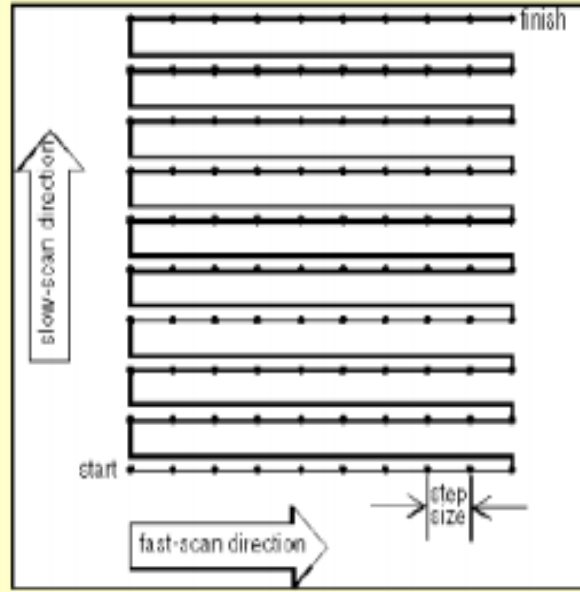
13-1 البيزو كهربائي او كهربائي انضغاطي:

و يحتويمجهر القوة الذرية AFM كذلك على وحدة المسح ثلاثية الإتجاهات piezo – electric xyz و scan driver و تقوم هذه الوحدة بتحريك سطح العينة تحت المجس في جميع الإتجاهات مما يمكن المجس من مسح سطح العينة المدروسة في جميع الإتجاهات ، و يتراوح بعد المسافة بين سطح العينة و رأس المجس ما بين 0 الى 100 نانومتر .

AFM raster scanning by piezoelectric tube (the sample stage)



Piezo tube



Raster scan

المسح النقطي AFM بواسطة أنبوب البيزو كهربائي (مرحلة العينة)

المصادر

1-Basic contact AFM & (Dynamic force) microscope (DFM)

2-Basic to photographic imaging

3-Introduction to scanning probe microscopy (spm) basic theory
(Atomic force microscopy) Afm

Robert A-wilson and heather A.Bullen Department of
chemistry .NovthevuKentucky , University highland
heights.kyp 41099

4-T.J senden and W.A Duckevlangmuir 10.1003(1994)

Y.c-li, N.J .Tao J.pan, A.A garcia and S.M.Lindslylangmuir (1993)

5-J.L Huttevand J- Bechhocfer – Rev.sciinstmm 64.1868 (1993)

6-M.tovtouse and M. Kivk, proc , spie(3009.53)(1997)

The fitting parameters are A wtile , B, wf and Qf.

J.E saderandl white J APPL. PHYS 741(1993)

7-J.E sader. Rev. sci . instumm .66.4583(1995)

8-J.m. neameistev and W.A Ducker Rev.sciinstmm. 65.2527
(1994)

9-S.Timoshenko and s. woinowsky .kriegovTheovy of plates and
shells (mcgvaw – Hill, New yourk 1959)

10-Patent US4724318 – Atomic force microscope and method for imaging surfaces with atomic resolution

11- "IBM's 35 atoms and the rise of nanotech". CNET. Retrieved 2017-08-23.

12- Binnig, G.; Quate, C. F.; Gerber, C. (1986). "Atomic Force Microscope". Physical Review Letters. 56 (9): 930–933.

Bibcode:1986PhRvL..56..930B. doi:10.1103/physrevlett.56.930. PMID 10033323.

13- Lang, K.M.; D. A. Hite; R. W. Simmonds; R. McDermott; D. P. Pappas; John M. Martinis (2004). "Conducting atomic force microscopy for nanoscale tunnel barrier characterization".

Review of Scientific Instruments. 75 (8): 2726–2731.

Bibcode:2004RSci...75.2726L. doi:10.1063/1.1777388. Archived from the original on 2013-02-23.

14- Cappella, B; Dietler, G (1999). "Force-distance curves by atomic force microscopy" (PDF). Surface Science Reports. 34 (1–3): 1–104. Bibcode:1999SurSR..34....1C. doi:10.1016/S0167-5729(99)00003-5. Archived from the original (PDF) on 2012-12-03.

15- Binnig, G.; Quate, C. F.; Gerber, Ch. (1986). "Atomic Force Microscope". Physical Review Letters. 56 (9): 930–933.

Bibcode:1986PhRvL..56..930B. doi:10.1103/PhysRevLett.56.930. ISSN 0031-9007. PMID 10033323.