4.1مقدمة

تقنيات النانو والتي تعرف احيانا باسم"nano techniques" وكذالك يشار اليها باسم "nano tools" يمكن ان نعرفها بانها التقنيات والطرق والاجهزة التي تجعل التعامل مع مواد وجسيمات النانو ممكنا عمليا ، على مستوى التقنيات هناك العديد منها مثل مجاهر المجسات الماسحة والمجاهر الالكترونية ونتجت هذه المجاهر من تطوير المجهر الضوءي البسيط .

المجهر الضوءي هو نوع من المجاهر التي تستخدم الضوء المرئي ونظام العدسات لتكبير الصور من عينات صغيرة .

المجاهر البصرية هي اقدم وابسط المجاهر وهنالك المجاهر الرقمية التي تستخدم كاميرا لفحص العينة ، ويتم عرض الصور مباشرة على شاشة الكمبيوتر دون الحاجة للبصريات مثل عدسة العين.

4.2 مجاهر المجسات الماسحة

مجهر المجس الماسح "scanning probe microscopy" والذي يشار له اختصارا SPM وهوالتقنية "الاب" لعدد واسع من التقنيات التي تسمى مجاهر المجسات الماسحة، وتنقسم هذه التقنية الى قسمين رئيسيين هما:-

- مجهر التأثير النفقي الماسح"scanning tunneling microscopy" والذي يشار له اختصارا STM.
- مجهر القوى الذرية "atomic force microscopy" والذي يشار له AFM.

وفي جميع هذه المجاهر تقوم المجسات "probes" والتي تبلغ سماكة رؤسها الماسحة "tips" بضع ذرات بمسح سطح العينات المدروسة من طرف الى طرف اخر ويتم تسجيل تفاعل "حركة" هذه المجسات خلال عملية المسح ، وفي الظروف المثالية

تستطيع هذه التقنيات ان تعطي حساسية قياس تصل الى مستوى 1nm،وعليه فان كلا الجهازين STM و AFM يستطيعان ان يعطيان صورا دقيقة لذرات في داخل او على اسطح العينات المدروسة.

وفيما يلي شرح مبسط لمبادئ عمل هذين الجهازين

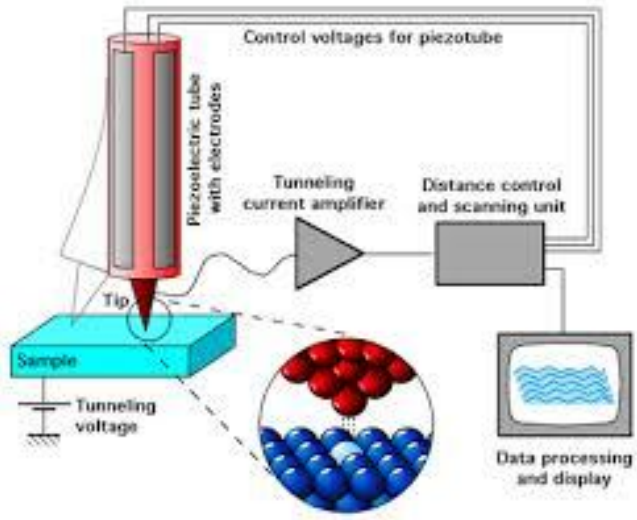
4.2.1 مجهر التأثير النفقي الماسح

تم اختراع وتركيب مجهرالتأثير النفقي الماسح"scanningtunnelingmicroscopy" على يد العالمين Binning وRohrer وذلك في عام 1981م وكان لهذا الاختراع صدا واسعا في الاوساط العلمية حيث تمكن الباحثون ولأول مرة من مشاهدة الذرات والابعاد الثلاثية وقد حصل العالمان Binning و Rohrer على جائزة نوبل في عام 1986م عن هذا الاختراع وبنفس المبأ الذي تحدثنا عنه يقوم رأس المجس "probe tip" بمسح سطح العينة والتفاعل معها وقد وصفت حركة المجس ب" عصى المشي للشخص الاعمى " وتجدر الاشارة هنا الى ان مجاهر التأثير النفقي الماسحة تستعمل لدراسة العينات الموصلة او شبه الموصلة .

المبادئ الاساسية لمجهر التأثير النفقي الماسح

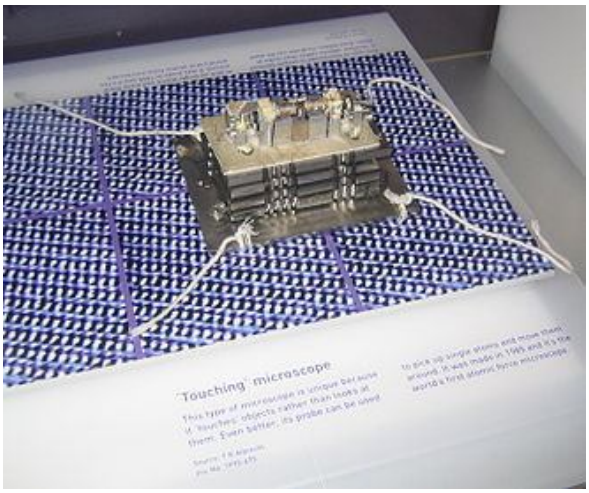
يتكون مجس مجهر التاثير النفقي من ثلاثة اجزاء هي الذراع الناتئ "cantilever" والمجس"probe" و الذي يصنع عادة من التنجستين او البلاتينيوم ويكون حاد للغاية في حدود 10 نانو متر اما الجزءالثالث وهو رأس المجس "probe tip" هو عبارة عن النهاية المدببة للمجس وهو الجزء الذي يتفاعل مع سطح العينة وتكون سماكته في حدود ذرة او ذرتين ،ويتم الحصول علي هذا المجس بعدة طرق اشهرها طريقة النحت الكهروكيميائي واما مبداء عمل هذا الجهاز فيعتمد علي استخدام تيار لذلك يطبق جهد سالب علي سطح العينة وجهد موجب علي رأس المجس ، وعندما تكون المسافة بين

المجس وسطح العينة صغيرة بما فيه الكفاية فان الكترونات سطح العينة من مستوي التوصيل تنتقل الي مستويات الطاقة الغير مشغولة "الفجوات " في راس المجس فيتكون بذلك "التيار النفقي وهو تاثير كمي يسمي علميا "التاثير النفقي لمكانيكا الكم " و عادة تبلغ قيمة هذا التيار 1 نانو امبير "1 nA "وذلك عندما يطبق جهذ كهربائي مقداره واحد فولت "1 V" وتكون المسافة الفاصلة بين رأس المجس وسطح العينة في حدود نصف نانو متر "0.5nm" وتتم العملية في حيز مغلق وعالي التفريق ، ويقوم بعد ذلك المجس بالتحرك فوق سطح العينة بحركة بطيئة جدا في حدود الابعاد الذرية ، و الجدير بالذكر ان هناك نمطين لتشغيل هذا الجهاز فعند تثبيت التيار النفقي تسمي هذه الطريقة "نمط التيار الثابت "وفي هذا النمط يتم تثبيت التيار ومتابعة تغير المسافة ، وعند تثبيتالمسافة تسمي هذه الطريقة "نمط المسافة الثابتة " وفي هذا النمط تثبت المسافة بين راس المجس وسطح العينة ، ويتم متابعة تغير التيار وفي كلا النمطين يتم نقل البيانات عن طريق الذراع الناتئ والذي تتم متابعة حركته بشعاع ليزر ينعكس من قمته الي كاشف ضوئي حساس حيث تنقل هذه المعلومات الي وحدة المعالجة لتكوين الصورة ،وبعد ذلك يمكن للباحثين تصوير الذرات اما منفردة علي اي سطح داعم "substrate" او تصويرها داخل اسطح العينات المدروسة .



شكل 4.1

4.2.2 مجهر القوة الذرية



شكل 4.2

أولمجهرقوةذرية

مِجهر القوة الذرية "Atomic force microscope" أو ما يسمى مجهر الطاقة الذرية AFMهو جهاز يستخدم في مجال تقنية النانو لمعرفة ورسم تضاريس السطوح ذات الأبعاد النانوية والميكرونية.

ميكروسكوب القوة الذرية SFMأو ميكروسكوب القوة الماسحة " scanning force microscopy" 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 إلى 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 العالمين Quate و Gerber 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 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 باستخدام ميكروسكوب AFM.

4.2.2.1 مبدأ عمل الجهاز

يتألف الجهاز من ابرة ذات ابعاد ميكرونية تقوم بالمرور على السطح المراد مسحه، تكون هذه الابرة مثبتة إلى حامل افقي بينما تكون هي نفسها عمودية على هذا الحامل وعلى السطح المراد مسحه، يتم إسقاط شعاع ليزري على الحامل والذي يرتفع

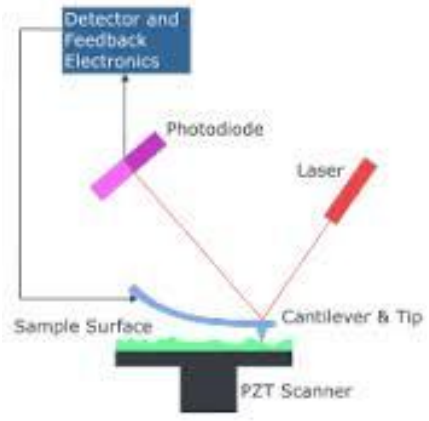
وينخفض مع ارتفاع وانخفاض الابرة وبالتالي مع تنوع تضاريس السطح من ارتفاع وانخفاض، ويتم التقاط منعكس الشعاع الليزري على الحامل على مستقبل وبالتالي يتم تحديد ورسم تضاريس السطح الممسوح تبعا لحركة منعكس الشعاع الليزري.

يستطيع مجهر القوة الذرية رؤية أحجام بين 20 - 300 نانومتر ، وهي أحجام الفيروسات. أما أحجام البروتينات فهي ما بين 1 - 30 نانومتر. وبالمقارنة بأحجام كرات الدم الحمراء فهي تصل إلى نحو 7000 نانومتر (أي 7 ميكرومتر).

4.2.2.2 استخدام الجهاز

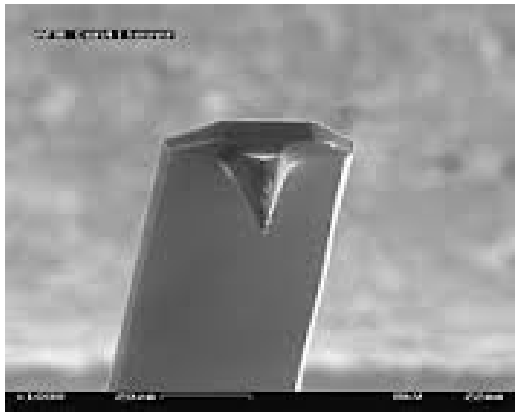
يستخدم مجهر الطاقة الذرية في معرفة تضاريس السطوح ذات الابعاد النانوية وحتى الميكرونية، في السنوات الأخيرة تنوع استخدام هذا الجهاز حيث أصبح يستخدم في قياسات أخرى مثل قياس مرونة الجزيئات النانوية والميكرونية والخلايا كما أصبح يستخدم في قياس طاقة الالتصاق بين الجزيئات الكيميائية والجزيئات النانوية والميكرونية والخلايا أيضا.

4.2.2.3 المبدأ الاساسي



شكل 4.3

مخطط توضيحي لفكرة عمل ميكروسكوب القوة الذرية



شكل 4.4

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

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 انحراف في الذراع بناء على قوة هوك. وقد تكون القوة المتبادلة قوة ميكانيكية أو قوة فاندرفال أو أو قوة شعرية 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 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 أنواعها انحراف في ذراع ميكروسكوب

القوة الذرية يقاس هذا الانحراف بواسطة انحراف شعاع ليزر عن مرأة مثبتة على ذراع الميكروسكوب. وشعاع الليزر المنعكس يرصد على مصفوفة خطية من الفوتودايود "photodiodes". وهناك طرق أخرى لقياس الانحراف مثل مقياس التداخل الضوئي "optical intrerfermetry"، 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. اذا 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 القة 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 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. يمكن تشغيل ميكروسكوب القوة الذريةAFM بعدة انماط تشغيل وهذا حسب الاستخدام المطلوب ونوع الفحص المراد. وبصفة عامة يمكن تقسيم انماط التشغيل بنوعين هما نمط التشغيل الاستاتيكي أو نمط الاتصال والنوع الثاني هو نمط التشغيل الديناميكي أو نمط عدم الاتصال.

4.2.2.4 انماط التشغيل واخذ الصور

ذكرنا ان هناك نمطين أساسيين 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 لتردد المرجعي يعطي معلومات عن خصائص العينة.

- **النمط الاستاتيكي او نمط الاتصال**

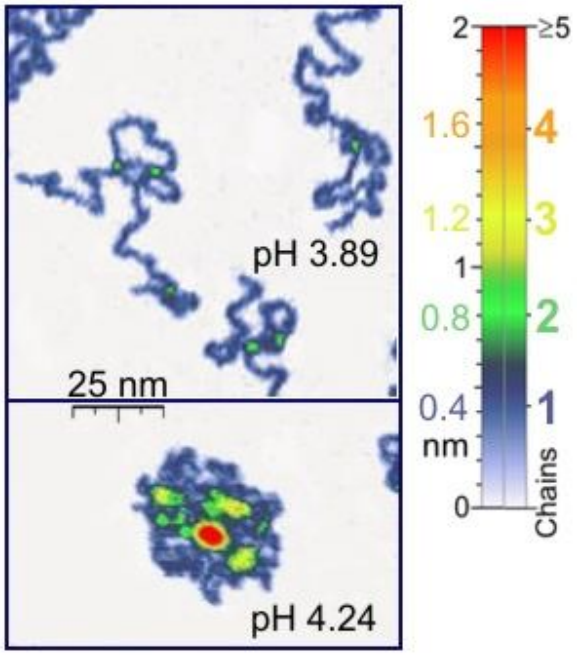
هذا النمط يستخدم الانحراف في رأس المجس كإشارة للتغذية العكسية ولان قياس الإشارة في هذا النمط يتعرض للضجيج يتم استخدام ذراع اقل صلابة لتكبير مقدار إشارة الانحراف. ويقرب المجس من سطح العينة بحيث يحدث قوة تنافر تنتج عن الالكترونات على سطح العينة والكترونات المجس. ويتم الحفاظ على ثبات مقدار القوة التنارية هذه أثناء المسح من خلال المحافظة بقاء الانحراف ثابتاً .

- **النمط الديناميكي او نمط عدم الاتصال**

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 بضع نانومتر (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 إلى 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 جعل سعة الاهتزازة ثابتا من خلال اعادة ضبط المسافة بين المجس والسطح. وبقياس المسافة بين المجس والسطح أثناء المسح في الاتجاهين y،x يتم رسم الصورة لطبغرافية سطح العينة باستخدام برامج معدة لذلك. هذا النمط لا يتعرض رأس المجس

لأي ضرر لا نه لا يحتك مع سطح العينة مثلما يحدث مع النمط السابق. وهذا يجعل من نمط التشغيل الديناميكي مفضل أكثر وخصوصا في حالة التعامل مع العينات اللينة. ولكن في حالة العينات الصلبة فان الصور التي تؤخذ بكلا النمطين تكونا متماثلتين. ولكن إذا وجدت طبقة نانوية من مادة سائلة على سطح العينة فان النمطين سوف يعطيا صورا مختلفة بعض الشيء. لان المجس في النمط المتصل يخترق طبقة السائل ليعطي صورة للسطح الأسفل منها، في حين ان النمط غير المتصل سوف يتذبذب فوق السطح ويعطي صورة لكلا من السائل والسطح معا.

- **نمط النقر**



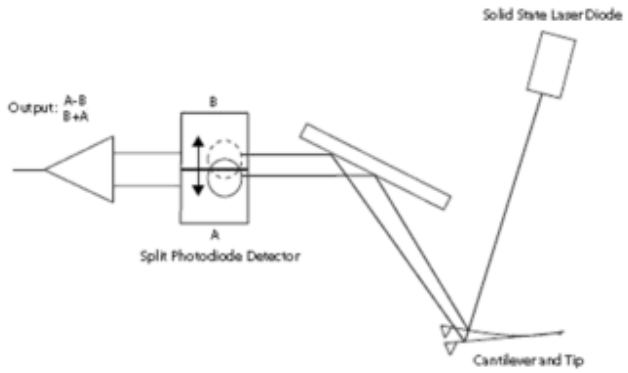
شكل 4.5

سلسلة بوليمر مفرد، (بسمك 0.4nm)، سجلت بنمط النقر "tapping mode" في وسط مائي عند قيم PH مختلفة.

في أغلب الأحيان 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 في العينة ولمنع هذا من الحدوث تم تطوير النمط الغير متصل بنمط النقر "tapping mode" 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. ونظرا للقوة المتبادلة التي تؤثر على الذراع عند اقترابها من سطح العينة فان قوة فاندرفال أو قوة ثنائيات القطب المتفاعلة أو 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 أثناء مسح العينة. ويعتبر نمط التشغيل هذا نمط متطور عن نمط عدم الاتصال.

4.2.2.5 قياس انحراف ذراع ميكروسكوب القوة الذرية



شكل 4.6

قياس انحراف الشعاع في جهاز AFM

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

4.2.2.6 مطياف القوة

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 أثناء مراقبة انحراف الذراع كدالة في ازاحة البيزوالكتريك. هذه الوظيفة استخدمت في قياسات على المستوى النانوي مثل الروابط الذري 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 بجهاز AFMبدقة تحليلية تصل إلى 0.1 نانومتر. يمكن الحصول على قياسات مطياف القوة في كلا نمطي التشغيل الاستاتيكي والديناميكي.

4.2.2.7 التعرف على الذرات وتميزها

يستخدم مقياس القوة الذرية AFM للحصول على صور للذرات ولتحريكها أيضا على اسطح 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 الأساس تم التميز بين ذرات السليكون والتن 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 أثناء مرور رأس المجس على سطح العينة.

4.2.2.8 المزايا والعيوب

ومن عيوب جهاز AFM بالمقارنة مع جهاز SEM هو حجم الصورة. فجهاز SEM قادرا 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 ان استخدام رأس مجس tipغير مناسب قد يعطي بعض العيوب في الصورة الناتجة. بالإضافة إلى ان AFM يعمل ببطء بالمقارنة مع SEM الذي يعطي صورة حية للعينة فان AFMيتطلب ان يعمل لبضعة دقائق حتى يعطي صورة. وهذا التأخير يؤدي إلى انزياح 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 باسم video AFM والتي تعمل بسرعة فاقت سرعة SEM. تتأثر صور AFM بالتخلف "hysteresis" في المواد البيزوالكتريك والتداخل في الإشارات 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. في النهاية نلاحظ كيف ان الميكروسكوبات تختلف باختلاف الطريقة التي تقوم بها بالحصول على الصورة وفي هذا المقال قمنا بشرح فكرة مبسطة عن ميكروسكوب القوة الذرية والذي مكن العلماء من رؤية الذرات والتميز بينها والتحكم بها الذي فتح الباب امام تكنولوجيا النانو لتدرس المواد على المستوى الذري وفهم الكثير من خصائصها.

4.2.2.9 مميزات مجهر القوة الذرية

هناك العديد من المميزات لمجهر القوة الذرية تجعله يتفوق على مجهر التأثير النفقي الماسح و كذلك على تقنيات المجاهر الألكترونية و لعل من أبرزها قوة التمييز resolutionحيث يتميز هذا المجهر بقدرته على إنتاج صور ذات جودة و دقة تمييز عالية جدا تصل كما ذكرنا الى حد 0.2 نانومتر(أفقيا)، و كذلك على تكوين صور ذات دقة تتميز تصل الى حد 0.5 نانومتر (عاموديا)، و كذلك يتميز هذا المجهر بقدرته على العمل في جميع الظروف التجربية فهو قادر على العمل في الفراغ و في الظروف الإعتيادية، كما أن العينات التي يدرسها هذا المجهر لا تحتاج لعمليات تحضير خاصة و التي تؤدي في كثيرا من الحالات الى تشوية العينة الأصلية، و من المميزات الكبيرة لهذا المجهر هي قدرته على دراسة عدد كبير من العينات و التي تشمل العينات الموصلة و غير الموصلة، و كذلك عينات البوليمر و العينات الحيوية و عينات الخزف و غيرها من العينات. هذا كما يمكن أستخدام هذه المجهر في تقنيات أخرى غير تقنيات دراسة و تصوير أسطح العينات فيمكن أستخدام هذا الجهاز في تقنية الحفر النانوية nano-lithographو ذلك في مجال تصنيع الرقائق الإلكترونية و التي تتميز بدقة عالية علما بإن إستخدام مجهر القوة الذرية في هذا المجال مازال في مراحلة الأولى حيث يعكف حاليا العلماء على تطوير سرعة الحفربهذا المجهر.

وتوجد اساليب مجهرية اخري لا تستخدم الضوء المرئي وتشمل المسح بالمجهر الالكتروني الماسح والانتقال المجهري الالكتروني.

4.3 المِجْهَر الإلكتروني

المِجْهَر الإلكتروني "نسبة للإلكترونوليس للإلكترونيات"أو مجهر الإلكترونات أدقّ مجهراختُرع حتى اليوم، يعتمده الفيزيائيون للنظر في داخل الخليةوله تطبيقات كثيرة.

فحص الأشياء الدقيقة الحجم بواسطة المجهر الضوئي تتقيد بقوة التمييز لدى المجاهر الضوئية. فإذا تجاوزت قدرة التكبير 2000× تصبح صورة العينة غير واضحة أو ضبابية. ولفحص عينات أصغر من الخلايا، كمكونات الخلاياأو الفيروسات، قد يختار العلماء واحداً من بضعة أنواع من المجاهر الإلكترونية. في المجهر الإلكتروني تقوم حزمة من الإلكترونات، بدلا من شعاع الضوء، بإعطاء صورة مكبرة للعينة. المجاهر الإلكترونية أقوى بكثير من المجاهر الضوئية.ويرجع ذلك إلى أن طول الموجةالمقترنة بالإلكترون أقصر كثيرا عن طول موجة الضوء المرئي. ويمكن لبعض المجاهر الإلكترونية أن تظهر حتى محيط ذرّات منفصلة في إحدى العينات، يقوم المجهر الإلكتروني النافذ(م.أ.ن) بإرسال حزمة من الإلكترونات عبر شريحة عينة رقيقة جداً، فيما تقوم عدسات مغناطيسيةبتكبير الصورة وضبطها ورؤيتها على شاشة أو تسجيلها على لوح فوتوغرافي . و تنتج من هذه العملية صورة كتلك التي تراها في الصورة أ. يكبر المجهر الإلكتروني النافذ الأشياء حتى 200.000 مرة، لكن من سلبياته أنه لا يمكن استخدامه لمشاهدة العينات وهي حية.

أما المجهر الإلكتروني الماسح(م.أ.م) فيزودنا بصور مجسمة مدهشة كالتي تراها في الصورة ب. لا ضرورة لتقطيع العينة إلى شرائح من أجل رؤيتها، إنما يكفي رشها بطلاء معدني رقيق تـُرسل حزمة من الإلكتروناتلتسقط على سطح العينة، مما يدفع

الطلاء المعدني إلى إطلاق وابل من الإلكترونات نحو شاشة فلورية أو لوحة تصوير فوتوغرافي، فتعطي صورة مكبرة لسطح الشيء. تستطيع المجاهر الإلكترونية الماسحة تكبير الأشياء حتى 100.000 مرة. ولا يمكن استخدامها لمشاهدة العينات وهي حية، كما هي الحال بالنسبة للمجهر الإلكتروني النافذ.

4.3.1 تاريخ المجهر الالكتروني

تم اختراع المجهر الالكتروني وتسليم أول براءة اختراعللعالم الفيزيائي الهنغاري ليو زيلارد الذي رفض صنعه ،وبدلا من ذلك، قام الفيزيائي الألماني إرنست روسكا والمهندس الكهربائي ماكس نول بصنع النموذج الأولي للمجهر الإلكتروني في عام 1931 بقدرة 400طاقة تكبير، كان الجهاز تطبيقاً عملياً وفعالاً لمبادئ الإلكترون المجهري .بعد ذلك بعامين، في عام 1933، بنى روسكا المجهر الإلكتروني الذي تجاوز الدقة التي بلغها مع مجهر بصري (عدسات) ، وعلاوة على ذلك حصل راينولد ردينبيرغ مدير شركة سيمنز-سكاكيرتويرك على براءة اختراعللمجهر الإلكتروني في أيار/مايو .1931 اضطرت الأمراض العائلية إلى اختراع المجاهر الكهربائية وذلك لجعل الفيروساتمثل شلل الأطفالمرئية.

في عام 1932، قام ارنست لوبك من شركة سيمنز، وهالسك بصنع أول نموذج للمجهر الإلكتروني وحصلوا على الصور وتطبيق المفاهيم التي تم وصفها في تطبيقات براءة اختراع ردنبيرغ،بعد خمس سنوات 1937م موّلت الشركة عمل ارنست روسكا وبودو فون بورس، ووظفت هيلمت روسكا(شقيق ارنست)لتطوير تطبيقات للمجهر، خاصة مع العينات البيولوجية أيضاً في عام 1937م، اخترعت مانفريد فون آردن المجهر الإلكتروني الماسح،تم صنع أول مجهر إلكتروني عملي في عام 1938م، في جامعة تورنتوبواسطة إلي فرانكلين بورتون والطلاب كيسل هول، جيمس هيلير وألبرت بريبس، وقامت شركة سيمنزبإنتاج أول نسخة تجارية من المجهر الإلكتروني النافذفي

عام 1939موعلى الرغم من أن المجاهر الإلكترونية الحديثة قادرة على التكبير بقدرة مليوني طاقة تكبير، ولكن كأدوات علمية تظل مبنية على أساس النموذج الأولي لروسكا.

4.3.2 التكبير

يتميز المجهر الإلكتروني بتكبير أكبر بكثير عن التكبير الذي تصل إليه المجاهر الضوئية. وترجع تلك الكفاءة إلى أن المجهر الإلكتروني يستخدم شعاعا من الإلكترونات، ويستفيد من ازدواجية الإلكترونكجسيم وموجة في نفس الوقت) ازدواجية موجة-جسيم .(ويقوم المجهر بمعالجة شعاع الإلكترونات كما لو كان شعاعا ضوئيا مع الفارق أن المجهر الإلكتروني يستعمل عدسات مغناطيسيةلتحزيم وضبط شعاع الإلكترونات بدلا من العدسات الضوئية التي يستعملها المجهر الضوئي المعتاد. ونطرا لأن الإلكترونات لها طول موجةأقصر نحو 100.000 مرة من طول موجة الضوء العادي ففي استطاعتها رؤية أشياء أصغر بكثير عما "يراه" المجهر العادي. وتبلغ تكبير المجهر الإلكتروني نحو 2.000.000مرة بينما يبلغ أقصى تكبير للمجهر الضوئي نحو 2000 مرة فقط.

4.3.3 المجهر الالكتروني الماسح

المجهر الالكتروني الماسح والذي يشار له كما ذكرنا اختصارا SEM من اهم اجهزة التصوير المجهري والتي لها الكثير من التطبيقات الرئيسية والمهمة في مجال علوم المواد والعلوم الطبية ، يتميز هذا المجهر بقدرته التكبيرية والتي تصل الى اكثر من نصف مليون مرة ، ولذلك يدخل هذا المجهر في جميع التطبيقات العلمية وفي شتى مجالات العلوم.

بواسطة المجاهر الالكترونية الماسحة الحديثة نستطيع دراسة اسطح العينات وترياتها الدقيقة ومكوناتها الكيميائية وسماكتها ، وكذلك دراسة احجام الجسيمات والجزيئات والمايكروبات والكثير من التطبيقات الاخرى.

4.3.3.1 المبادئ الاساسية للمجهر الالكتروني الماسح

يتميز هذا المجهر الالكتروني الماسح بقوة تكبير عالية جدا تصل الى اكثر من نصف مليون مرة ، ويرجع السبب في ذلك الى استخدام اشعاع الكتروني عبارة عن حزمة من الالكترونات"electron beam" عالية الطاقة ذات طول موجي قصير جدا في حدود 0.0068nm لذا نجد ان قوة التمييز "resolution" لهذا المجهر تصل الى اقل من 0.5nm ، وقوة التمييز يقصد بها قدرة المجهر على التمييز بين جسمين دقيقين متقاربين حيث يظهران منفصلين ، وهذا يعتمد على الطول الموجي المستخدم.

تعتمد نظرية عمل المجهر الالكتروني الماسح على استخدام حزمة الكترونية عالية الطاقة تصطدم عموديا بسطح العينة المدروسة ، ومن ثم جمع الاشارات "signals" المنعكسة والصادرة من العينة باستخدام الكواشف المختلفة "detectors" .

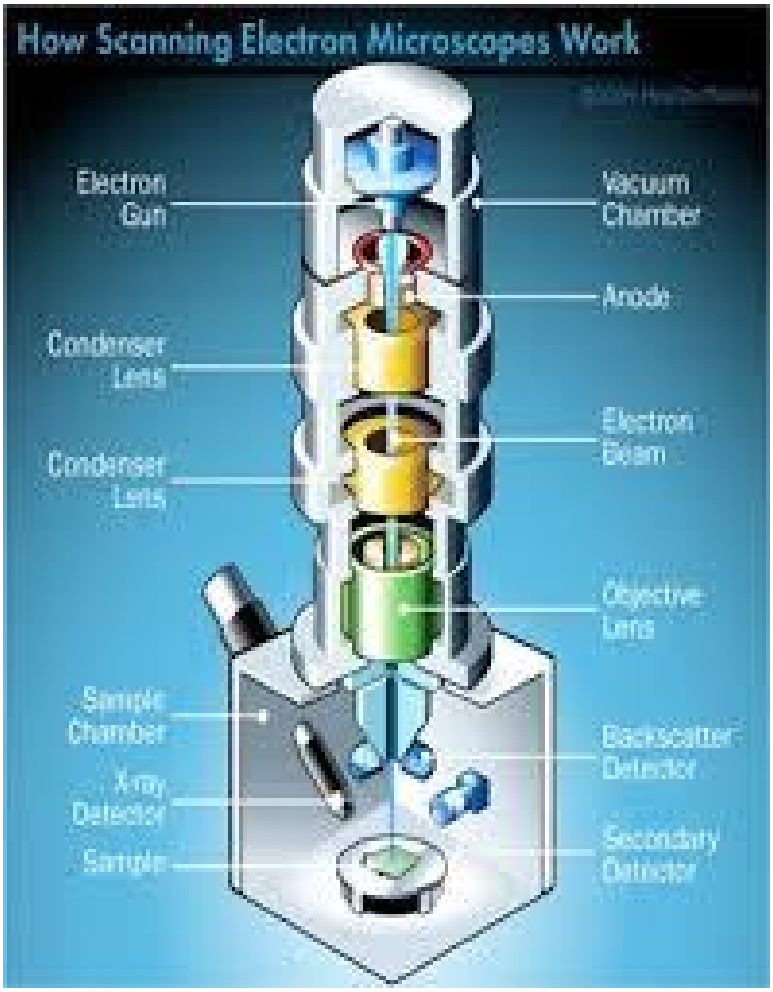
4.3.3.2 كيفية عمل المجهر الالكتروني الماسح

أولا: يتم انتاج الالكترونات عن طريق الانبعاث الحراري وذلك عن طريق فتيلة "filament" تسخين تصنع عادة من التنجستن ويطبق على هذه الفتيلة جهد تعجيل تتفاوت قيمته ما بين 0.1volt الى 30volt .

ثانيا: تمر حزمة الالكترونات خلال عمود المجهر "microscope column" المفرغ ويتم تركيز هذه الحزمة بواسطة مجموعة من العدسات الكهرومغناطيسة"electromagnetic lenses" على طول هذا العمود.

ثالثا:تعمل فتحات التحكم "apertures" الموجوده على طول عمود المجهر على التحكم في عرض حزمة الالكترونات وذلك بحجز الالكترونات المتشتتة والمنحرفة عن مسار الحزمة.

رابعا: تصطدم الحزمة الالكترونية بسطح العينة والتي تكون داخل حيز مغلق وفرغ تماما يسمة غرفة المجهر الالكتروني الماسح "SEM chamber" حيث تتفاعل "interaction" هذه الحزمة على سطح العينة ، وينتج عن هذا التفاعل عدد من الانبعاثات "الاشارات: signals" من اهم هذه الانبعاثات او الاشارات والتي تستخدم في انتاج صور اسطح العينات ، اشارتان هما انبعاث الالكترونات الثانوية "secondary electrns" ويرمز لها اختصارا SE وانبعاث الكترونات الاستطارة الخلفية "back scattered electron" ويرمز لها اختصارا BSE ، وايضا هناك الاشعة السينية المنبعثة من العينة ولها اهمية كبيرة في دراسة ماهية عناصر العينة ونسبها مما يعطي معلومات وافية عن العينة المدروسة ، والجدير بالذكر هنا الى ان ايي اشارة من هذه الاشارات تنبعث من مستوى معين بالنسبة لسطح العينة وتشكل نسبة معينة من عملية التفاعل بين الحزمة الالكترونية الساقطة وسطح العينة وتسمى عملية التفاعل هذه باسم حجم التفاعل "interaction volume" والذي يبين الحيز ثلاثي الابعاد لمدى التفاعل بين الحزمة الالكترونية والعينة وكذلك مستوى حجم كل اشارة من اشارات الانبعاث كما هو موضح في الشكل التالي



شكل 4.7

خامسا: يتم تجميع كل اشارة بواسطة الكاشف الخاص بها حيث يتم بعد ذلك تحليل هذه الاشارات ومعالجتها ومن ثم يتم اظهارها كصور بالنسبة للاشارتين SE و BSE او كطيف تحليل للاشعة السينية.

شرح تفصيلي للاشارات الثلاثة المذكورة

أولاً :انبعاث الالكترونات الثانوية

تنبعث الالكترونات الثانوية من سطح العينة وذلك من عمق يصل الى 10nm وتنتج هذه الالكترونات عن التفاعل بين الكترونات الحزمة الالكترونية الرئيسية " primary

beam" والتي تسمى ايضا الحزمة الساقطة "incident beam" مع المجال الكهربائي لالكترونات المدارات الخارجية في ذرات العينة والتي تتميز بارتباطها الضعيف بذراتها ، وينجم عن هذا التفاعل استطارة غير مرنة ، حيث تنتقل طاقة الالكترونات الساقطة الى ذرات العينة التي بدورها تبعث الكترونات تتميز بانخفاض طاقتها (اقل من 50 ev) وهي الالكترونات الثانوية "secondary electrons " او SE وبانخفاض طاقتها فانه لا تعبر العينة من اعماق كبيرة وعليه فان هذه الالكترونات SE لا تنبعث الا من السطح ، وبالتالي تكون لنا هذه الالكترونات صورة واضحة لسمات وخصائص سطح العينة "surface topography" ويتم تجميعها بواسطة كاشف الالكترونات الثانوية "SE detector" والذي يكون قريبا جدا من سطح العينة لكي يتمكن من جمع اشارات هذه الالكترونات ذات الطاقة المنخفضة.

ثانياً : انبعاث الكترونات الاستطارة الخلفيةBSE

انبعاثها ما بين 1000 نانوميتر الى 2000 نانوميتر ، وتنتج هذه الالكترونات نتيجه لتفاعل بين حزمة الالكترونات الساقطة والمجالات الكهربائية لانوية ذرات العينة ، حيث تنعكس الالكترونات الساقطة خلفيا بدون اي فقد يذكر لطاقاتها ، وتخرج (تنبعث) من العينة مكونة ما يعرف بالكترونات الاستطارة الخلفية "backscattered" او BSE وتتميز هذه الالكترونات بارتفاع طاقتها (اكثر من 50ev) ، ويتم جمعها باستخدام كاشف الكترونات الاستطارة الخلفية "backscatter electron detector" والذي يوضع مباشرة فوق العينة وعلى مسافة كبيرة نسبيا من سطحها ، تتميز الصور الناتجة عن هذه الالكترونات بعدم وجود تفاصيل سطح العينة وذلك لان هذه الالكترونات لا تنبعث من اسطح العينة بل من اعماق اكبر ، حيث تظهر اسطح العينات في هذه الصور مسطحة وخالية من اي سمات ، ولكنها تعطينا معلومات عن العناصر المكونة لهذه العينة وتوزيعها في العينة حيث تظهر مناطق العاصر ذات الاعداد الذرية الكبيرة

(الذرات الثقيلة) ذات لون اسود او رمادي بينمل تظهر العناصر ذات الاعداد الذرية الصغيرة (الذرات الخفيفة) باللون الابيض.

ثالثا: انبعاث الاشعة السينية

في اجهزة المجاهر الالكترونية الماسحة الحديثة يوجد وحدة كشف وتحليل الاشعة السينية "X-ray" وتعتبر هذه المعلومات مكملة للمعلومات التي يتم تحصيلها من التقنيتين السابقتين SE و BSE وتعطي الاشعة السينية معلومات وافية عن ماهية العناصر التي تحتويها المادة وكم نسبتها ايضا.

التقنية الرئيسية المستخدم في وحدة الاشعة السينية تعرف باسم " energy dispersive X-ray analysis" ويرمز لها اختصارا EDX وتعني تحليل الطاقة المتفرغة للاشعة السينية.

تنبع الاشعة السينية من عمق اكبر من انبعاث اشاراتSE و BSE وذلك من عمق يتراوح مداه ما بين 2000nm الى 5000nm ويمثل انبعاثها الجزء الاكبر من حجم التفاعل ويتم بعد ذلك كشفها وتحليلها بواسطة كاشف الاشعة السينية " X-ray detector" وتعطي نتيجة هذا التحليل طيف الاشعة السينية "X-ray spectrum" والذي عن طريقة يمكن معرفة العناصر التي تحتويها العينة وكذلك نسبة وجودها في العينة ، حيث تشير كل موجة "peak" من موجات الطيف الى عنصر من العناصر التي تحتويها العينة المدروسة ، كما يشير ارتفاع الموجة الى نسبة كل عنصر في العينة.

4.3.3.3 أنواعالمجاهرالإلكترونيةالماسحة

تحدثناسابقاعنالنوعالرئيسيللمجاهرالإلكترونيةالماسحةوهوالنوعالذييتطلبتفريغالجهازأثناء دراسةالعيناتلذلككانهذاالأمرسببافيمحدوديةإستخدامهفيبعضالتطبيقاتوخاصةفيالعملمعالعيناد

الحيوية المحتوية على السوائل والغازات والتي تتشوه وفي بعض الأحيان تتناثر عند إستخدامها في حيز مفرغ، لذا فقد تم تطوير نوع آخر من هذه المجاهر يعمل في حدود الضغط الجوي الطبيعي ويستطيع دراسة الكثير من العينات الحيوية مثل الخلايا الحيوية والبكتيريا والأشجار والبلاستك والسوائل وغيرها ويعرف هذا المجهر بأسم المجهر الإلكتروني البيئي الماسح " Environmental Scanning Electron Microscope" ويشار له إختصاراً ESEM

ويعود السبب في ذلك إلى أن هذا المجهر يملك نظام تفريغ خاص به يجعل من الممكن أن تدرس العينات في حيز من الغازات مثل غاز ثاني أكسيد الكربون غاز النتروجين وكذلك بخار الماء.

وإيضاً هناك نوع آخر من المجاهر الإلكترونية الماسحة تعمل في درجات حرارة منخفضة جداً يمكن الباحث ين من دراسة عينات الثلج وبلورات الجليد وكذلك الكثير من العينات في حيز بارد أو متجمد ويطلق على هذا النوع أسم المجهر الإلكتروني الماسح ذو الحرارة المنخفضة" Low Temperature Scanning Electron Microscopy" ويرمز له إختصاراً LTSEM.

4.3.4 المجهر الإلكتروني النفاذي

المجهر الإلكتروني النفاذي" Transmission Electron Microscope" يعرف كذلك إختصاراً TEM، تم بنائه وتطويره على يد الباحثين Knoll و Ruska

وذلك في بداية الثلاثينات من القرن الماضي والجدير بالذكر هذا المجهر قد تم بنائه قبل المجهر الإلكتروني الماسح SEM

بحوالي عشر سنوات ومنذ بنائه تم إستخدامه في الكثير من الطبيقات الطبية وتطبيقات علوم المواد.

ويستخدم TEM

حالياً بشكل كبير في دراسة الخواص التركيبية والبلورية للعينات وغيرها من الخواص.

ويتميز المجهر الإلكتروني النفاذ يبقوة تمييز "Resolution" تصل في المتوسط الى 0.2nm ويستخدم هذا المجهر حزمة إلكترونية قوية تتراوح طاقتها ما بين
30kev الى 350kev مما يعطيه قدرة تمييز تساعد على تحليل المميزات الذرية للعينات المدروسة.
وبالرغم أن هذا المجهر يستخدم المدفع الإلكتروني لإنتاج حزمته الإلكترونية وكذلك يستخدم ات العدسات الكهرومغناطيسية وفتحات التحكم كما هو الحال في المجهر الإلكتروني الماسح SEM ألا إن TEM يعتمد على مبدأ نفاذ الإلكترونات الساقطة منخلال العينة المدروسة ومن ثم تكوين الصور على شاشة فلورسانت أو على الأفلام الفوتوغرافية بواسطة القسم النافذ من الحزمة الإلكترونية وهذا المبدأ يختلف بالطبع عن مبدأ عمل SEM والذي يعتمد على تجميع وتحليل الإشارات المنعكسة من سطح العينة المدروسة.

4.3.4.1 مبادئ عمل المجهر الإلكتروني النفاذي

في المجهر الإلكتروني النفاذي TEM
يتم إنتاج الإلكترونات عن طريق الإنبعاث الحراري من ذلك بتسخين فتيلة تصنع غالبا من التنجستين حيث يتم تطبيق جهد تعجيل على هذه الفتيلة يتراوح ما بين 60 الى 100
فولت وتمتلك الإلكترونات المعجلة طاقة يتحكم بها عن طريق المستخدم تختلف حسب التطبيق المطلوب.
بعد ذلك تمر حزمة الإلكترونات خلال العمود المجهر " microscope
column" المفرغ ويتم تركيز هذه الحزمة بواسطة مجموعة من العدسات الكهرومغناطيسية "
electromagnetic
lenses" على طول هذا العمود، كما تعمل فتحات التحكم "apertures" الموجودة على طول هذا العمود
على التحكم في عرض حزمة الإلكترونات وذلك بحجز الإلكترونات المتشتتة والمنحرفة عن مسار الحزمة
الرئيسية.
بعد ذلك تصل هذه الحزمة الإلكترونية ذات الطاقة العالية والتي تم تركيزها وتوجيهها الى العينة وينتج عن
لكتفاعل لهذه الإلكترونات مع سطح العينة حيث ينفذ جزء من الحزمة الساقطة يسمى الحزمة النافذة "
Transmitted

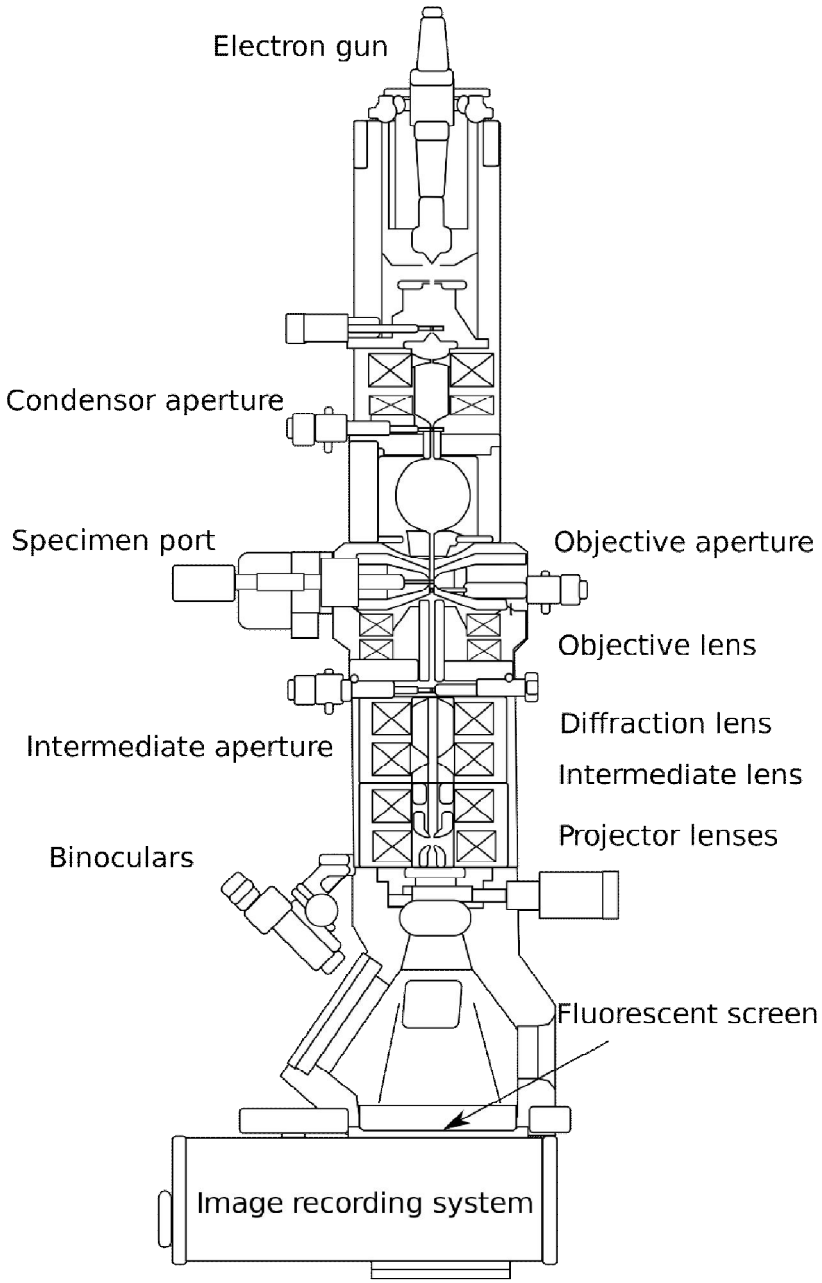
beam"عبارةعنحزمإلكترونيةنافذةبدونإنحرافوحزمإلكترونيةمتشتتةومنحرفةمنذراتوجز يئاتالعينةويتمبعدذلكتحسينهذاالحزمةالنافذةبإستخداماالعدساتالكهرومغناطيسيةوفتحاتالتحكم وإستقبالهاوإظهارهاعلىشاشةفلورسنتبشكلصورة،ويجدرالإشارةهناالىأنالصورةتحتويعلىال مناطقالمظلمة"dark areas" والمناطقالمضيئة" bright areas"علىحسبنوعالعينةونوعالعناصرالتيتحتويهاوببساطةنجدأنالمناطقالمظلمةتشيرإلىإنا لإلكتروناتلمتصل (لمتنفذ)

الىالشاشةمنهذهالمناطقوذلكلإمتصاصهامنذراتهذهالمناطقأوتشتتهابشكلكبيروهذايدلعلىأنالع ينةفيهذهالمناطقالتيتظهربشكلمظلمتحتويعلىعناصرذاتذراتثقيلة (أعدادذريةكبيرة) وبالتاليفإنالمناطقالمضيئةتشيرالىوصول (نفاذ)

أعدادكبيرةمنالإلكتروناتمنهذهالمناطقممايدلعلىأنالإلكتروناتلمتعانيإيإمتصاصأوتشتتكبيرمن ذراتهذهالمناطقممايدلعلىأنالعينةفيهذهالمناطقالتيتظهربشكلمضيءتحتويعلىعناصرذاتذراتخ فيفة(أعدادذريةصغيرة)،ويجدرالإشارةهناالىأنالمناطقشبهةالمظلمة(درجاتمختلفةمناللونالأسـ ود)

تدلعلىدرجاتمختلفةمنالإمتصاصوالتشتتوتدلكذلكعلىأعدادذريةمختلفةلذراتهذهالمناطق،ومنا لمهمأننعرفأنالإلكتروناتالممتصةتظهربشكلحرارةتسخينللعينةأوإنبعاثأنواعمنالموجاتالكهر ومغناطيسيةمثلأشعةأكسكماأنالإلكتروناتالمتشتتةبشكلكبيريتمحجبهابفتحاتالتحكمأوتمتصعند طريقالجدرانالداخليةلعمودالمجهر.

أماالعينةالمستخدمةفيشترطأنتكونذاتسمكرقيقجدايترواحمابين100nm الى200nmويجبالتنبيههناالىأنالعيناتذاتالذراتالخفيفةتكونأكثرسماكةمنالعيناتذاتالذراتالثقيلة وتجريباتكونسماكةالعيناتفيحدود200nm.



شكل 4.8

يوضح الاقسام الرئيسية للمجهر الالكتروني النفاذي TEM