المجهر النفقي الماسح

إعداد : د. حمد البريثن

كيف تعمل الأشياء

تعتمد فكرة المجهر النفقي الماسح (Scanning Tunneling Microscopy -STM) بالاعتماد على ظاهرة النفقية (Tunneling) حيث تنتقل الإلكترونات نفقياً بين الإبرة الماسحة للمجهر وسطح العينة وهي من الظواهر المهمة الناتجة من ميكانيكا الكم التي لا يمكن تفسيرها بالميكانيكا التقليدية.

يمكن توضيح فكرة عمل هذا المجهر بالمثال الموضح في شكل (١)، وذلك كالتالي:

١-حسب الميكانيكا التقليدية لا يمكن للجسم (P) العبور من المنطقة (I) إلى المنطقة (II) لأن طاقته (E) أقل من طاقة الحاجز(Φ) شكل (١ - أ).

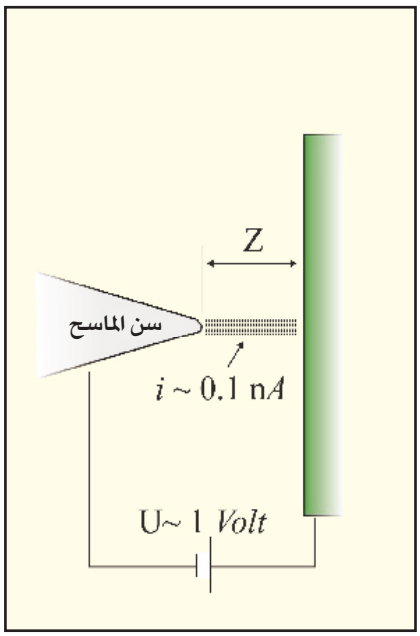
٢-حسب ميكانيكا الكم يمكن للجسم (P) العبور من المنطقة (I) إلى المنطقة (II) رغم أن طاقته (E) أقل من طاقة الحاجز (Φ)، وذلك عن طريق النفقية، شكل (١ - ب) و (١ - ج)، حيث يخترق الجسم (P) الحاجز ذي السمك (Z) بين المنطقة (I) والمنطقة (II)، ولهذا جاءت تسمية هذه الظاهرة بـ " ميكانيكا الكم النفقية (Tunneling)".

تحدث عملية النفقية بشكل غير مستمر لأن قيمة أو احتمالية حدوثها تعتمد على عدة متغيرات، مثل الفرق في الطاقة بين (Φ) و(E) وكذلك سمك الحاجز (Z).

تتمثل المنطقة الأولى (I) في المجهر النفقي الماسح في إبرة حادة مصنوعة من معدن ذي صلابة عالية، مثل التنجستن، بينما تمثل المنطقة الثانية (II) سطح العينة المراد دراسة تركيبه (مادة موصلة أو شبه موصلة)، شكل (٢). أما منطقة الحاجز الجهدي (Z) فهي عبارة عن الفراغ الموجود بين الإبرة وسطح العينة، إذ لا يوجد اتصال ميكانيكي بين الإبرة و ذرات سطح العينة، وعلى افتراض أن المسافة الفاصلة الفعالة تساوي بشكل تقريبي (Z) لأن المدارات الذرية تمتد نظرياً إلى مالانهايه.

ويمثل متوسط دالتي الشغل لمادتي الإبرة والسطح (Φ) الارتفاع الطاقي للحاجز بين المنطقتين، و بذلك فإن الأجسام (في هذه الحالة الإلكترونات) لا تستطيع الانتقال بين السطحين إلا عن طريق الظاهرة النفقية، فعندما يسلط جهد سالب على الإبرة بمقدار (U) فان الإلكترونات تنتقل من الإبرة إلى السطح، وعند تسليط جهد موجب (U) فإن الإلكترونات تنتقل من السطح إلى الإبرة.

يجب أن يكون فرق الجهد (U) صغيراً جداً بالمقارنة مع (Φ) وذلك لضمان انتقال الإلكترونات نفقيا فقط خلال الفراغ الفاصل. ونظراً لأن الإلكترونات تحمل شحنات



● شكل(٢)الإبرة الماسحة على السطح المراد دراسته

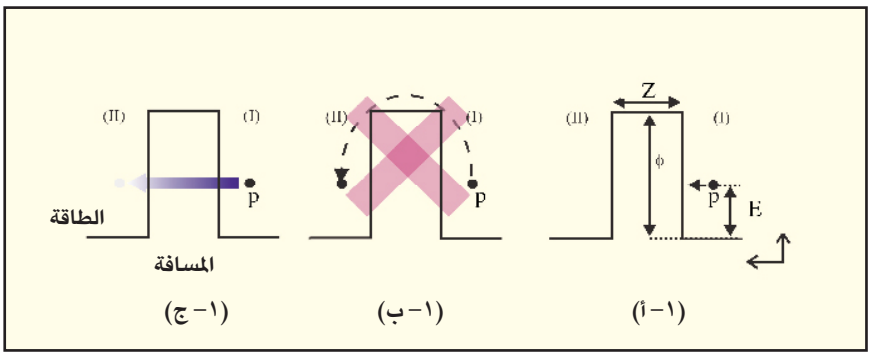
كهربائية فإن انتقالها من مكان لآخر هو عبارة عن تيار كهربائي (i) . يمكن حساب مقداره - بدون الدخول في تفاصيل نظرية - بالعلاقة التالية:

$$i = c\,U\,e^{-A\sqrt{\Phi}\,Z}$$

حيث تمثل (c) و (A) في المعادلة (١) قيما ثابتة.

يعتمد التيار الكهربي خطيا على الجهد المسلط (U) ، ويشبه في ذلك قانون أوم.

يوجد ارتباط وثيق بين التيار النفقي



● شكل (١) انتقال الأجسام خلال حاجز الجهد.

والمسافة الفاصلة (Z)، فكلما زادت (Z) قل مقدار (i) بشكل أسي. وبالتالي فإن هذه المعادلة تمثل تقريبا جيدا لمقدار التيار المار، وهي من حيث المبدأ كافية لفهم فكرة المجهر النفقي الماسح.

طريقة عمل المجهر

يعتمد مبدأ عمل المجهر النفقي – كما اتضح سابقاً – على التيار الناشئ من انتقال الإلكترونات من الإبرة إلى سطح العينة أو العكس، بينما يعتمد مقدار التيار بشكل واضح على المسافة الفاصلة بين الإبرة والسطح (Z).

قبل البدء في شرح طريقة دراسة السطح يجب معرفة كيفية تحرك الإبرة ـ تسمى بالإبرة الماسحة لأنها تقوم بمسح منطقة معينة أي المرور فوقها ـ وجمع معلومات عنها. ومنها جاءت التسمية بالماسح (Scanning) على السطح المراد دراسته.

تعلق الإبرة الماسحة على مادة حديدو كهربائية (Ferro-electric) أو بعض الأحيان تسمى كهروضغطية (Piezo-electric)، الشكل (٣-أ) لها القدرة على التمدد عند تعرضها لفرق جهد، يعتمد هذا التمدد خطيا على مقدار الجهد المسلط، إذ يمكن التحكم بشكل دقيق جدا بالمسافة التي تقوم الإبرة بمسحها عن طريق التحكم بدقة بالجهد المسلط عليها.

فمثلاً عند تسليط جهد (V_x) على هذه المادة فإنها تتمدد بمقدار (ΔX)، الشكل (٣-أ) و(٣-ب)، وعندما يخفض هذا الجهد إلى النصف، على سبيل المثال، فإن التمدد يقل إلى النصف. وبالتالي تستطيع الإبرة دراسة منطقة معينة عند تحريكها إلى اتجاه (Y) وإلى الاتجاه (X) فتعطي وصفاً تاماً لمساحة مقدارها ($\Delta X \times \Delta Y$).

من وجهة نظر عملية هناك طريقتان للتصوير السطحي باستخدام هذا المجهر، هما:

● طريقة الارتفاع الثابت

يتم من خلال طريقة الارتفاع الثابت (Constant Height Mode) تمرير الإبرة على السطح عند جهد معين (U) لمسارات متوازية بارتفاع (H) ثابت، الشكل (٤-أ)، و من ثم يُقاس التيار المار كدالة من المكان. تتغير المسافة الفاصلة (Z) نتيجة لتغير تضاريس السطح (Surface Morphology) من ارتفاعات وانخفاضات معطية قيم مختلفة للتيار كما توضح المعادلة (١). وبالتالي يمكن معرفة شكل السطح برسم التيار كدالة من المكان (X،Y)، أو برسم (Z)، عن طريق المعادلة (١)، كدالة من المكان مما يعطي صورة واضحة للتركيب السطحي.

يجب أن لا يكون هناك خلط بين الارتفاع (H) والمسافة الفاصلة (Z) ، حيث تعبر (Z) عن المسافة بين ذرة رأس الإبرة والذرة التي تقابلها على السطح، بينما تعبر (H) عن المسافة الرأسية الأولية قبل المسح ولا تتأثر بمكان الإبرة.

● طريقة التيار الثابت

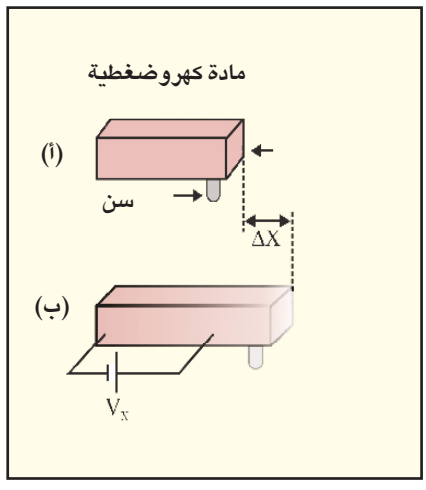
تتمثل طريقة التيار الثابت (Constant Current Mode) بتمرير الإبرة على السطح عند جهد معين في مسارات متوازية مع إبقاء التيار (i) عند قيمة ثابتة. يتم تثبيت التيار عن طريق التحكم بارتفاع الإبرة (H) بواسطة مواد حديدوكهربائية، حيث يسلط عليها جهد كهربي فتتمدد أو تتقلص محدثة تغير في الارتفاع لإبقاء التيار ثابتا. يتم التحكم بهذا الجهد عن طريق دائرة تغذية خلفية (Feedback Circuit)، وهنا يرسم الجهد المتحكم بالارتفاع كدالة من المكان مما يعطي صورة للسطح، الشكل (٤-ب). كذلك من الممكن رسم التغير في الارتفاع (ΔH) كدالة من المكان بمعرفة خواص التمدد للمادة االحديدوكهربائية أو عن طريق معايرة (Calibration) النتائج مع نتائج أخرى معروفة. في كلا الحالتين فان النتيجة النهائية متكافئة – عبارة عن صورة ثلاثية الأبعاد للسطح– ولكن قد تتفوق طريقة على أخرى طبقا لأمور تفصيلية.

استخدامات المجهر النفقي الماسح

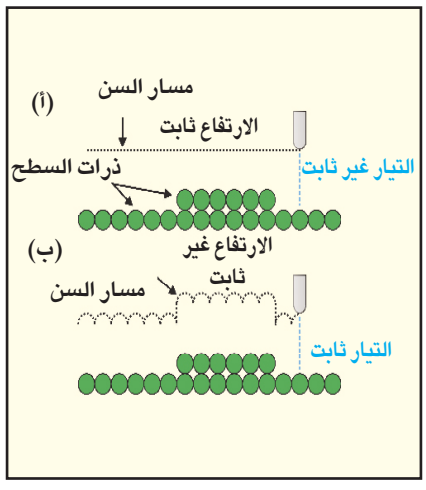
يعتمد عمل المجهر النفقي الماسح اعتمادا كليا على انتقال الإلكترونات نفقيا بين الإبرة الماسحة وسطح العينة، لذلك لا تتم دراسة أي سطح إلا إذا كان موصلا أو شبه موصل. و نظراً لكثرة استخدامات هذا المجهر فإنه سيتم التطرق إلى أهم ثلاث خصائص يمكن تحديدها بواسطته:

● التركيب البلوري السطحي للمادة

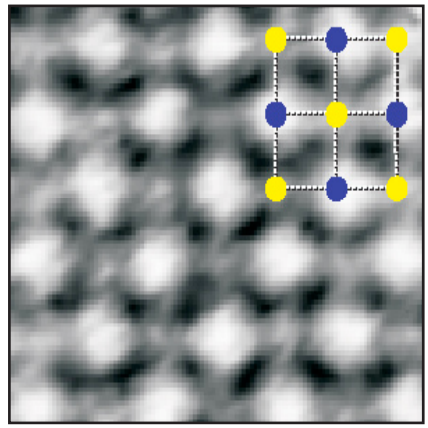
يستخدم المجهر الالكتروني الماسح لعمل صورة ثلاثية الأبعاد للسطوح، حيث يمكن عن طريق معرفة عرض وطول الصورة المأخوذة للسطح تحديد الأبعاد بين أي تركيبين معينين على السطح شاملا



● شكل (٣) تمدد المواد الكهرضغطية عند تسليط جهد كهربي عليها



● شكل (٤) طريقة الارتفاع الثابت والتيار الثابت للمجهر النفقي الماسح

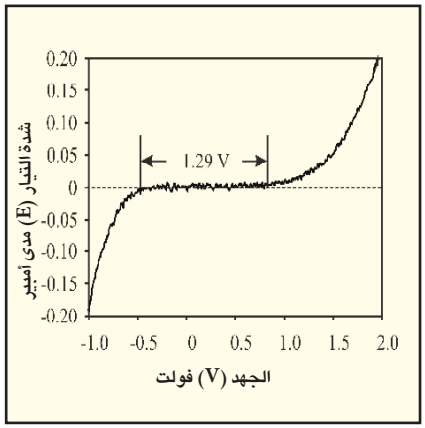


● شكل (٥) صورة لذرات السكانديوم والنيتروجين على سطح مادة NcS ذات التركيب البلوري المكعب.

الأبعاد بين الذرات على نفس المستوى أو في مستويين أفقيين مختلفين معطيا وصفا كيفياً وكمياً للتركيب البلوري بشكل مباشر، الشكل (٥)، ولكن في بعض الأحيان يكون هناك تغير في ترتيب الذرات على السطح بسبب عدم وجود ذرات تعلوها، وفي هذه الحالة لا يمكن تحديد هذا التغير في التركيب البلوري السطحي (Surface Reconstruction) بشكل عملي محدد وواضح إلا عن طريق المجهر الماسح النفقي وبعض المجاهر الماسحة الأخرى. مثل مجهر القوى الذرية (Atomic Force Microscope – AFM) لعمل نفس المهمة في إعطاء وصف لهذا التركيب السطحي.

● التركيب الالكتروني السطحي للمادة

يستطيع المجهر النفقي الماسح إعطاء معلومات مهمة عن التركيب الإلكتروني للسطح، وذلك عن طريق تثبيت الإبرة الماسحة على مسافة ثابتة من السطح وقياس التيار النفقي (i) المار كدالة من الجهد المسلط عليها (U). فإذا كان السطح موصلا فان مقدار التيار لا يساوي صفر إلا عندما يكون الجهد مساويا للصفر. أما بالنسبة للسطوح شبه الموصلة فان التيار يساوي الصفر في منطقة عرضها(ΔU)، حيث أن عرض



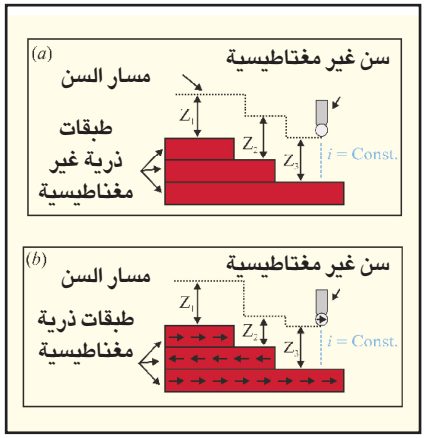
● شكل (٦) التيار النفقي كدالة من الجهد المسلط لسطح NaG الشبه موصل.

هذه المنطقة يساوي طاقة الفجوة السطحية (Surface Band Gap) بوحدة الإلكترون فولت (electron Volt– eV)، أنظر الشكل (٦).

● التركيب المغناطيسي للسطوح

يتم تحديد مغناطيسية السطوح أو الذرات بواسطة المجهر النفقي الماسح بعدة طرق، لكن يمكن التطرق لطريقة واحدة تعد هي الأساس لهذا النوع من القياس، والتي فيها تتحرك الإبرة الماسحة على السطوح، ويمكن تقسيمها إلى ما يلي:

* **سطوح غير مغناطيسية**، وفيها يتم تحريك الإبرة الماسحة على السطوح غير المغناطيسية كما في الشكل (٧–أ) بمسافات رأسية ذات قيم ثابتة، حيث نجد أن القيم(Z_1) و(Z_2) و (Z_3) متساوية، نظراً لأن ارتفاعات طبقات الذرات (Atomic Layers) متشابهة.



● شكل (٧) تغير الارتفاع المقاس بالمجهر النفقي بسبب مغناطيسية الإبرة الماسحة والسطوح

* **سطوح مغناطيسية متعاكسة مع وجود مادة ممغنطة على الإبرة**، وفي هذه الحالة تكون المسافات (Z_1) و (Z_2) مختلفة، مع بقاء المسافات الرأسية التركيبية بين السطوح ثابتة، نظرًا لاحتمالية تغير مرور التيار النفقي تبعاً لاتجاه المغنطة للإبرة الماسحة وذرات السطح. ويعود ذلك إلى قلة مرور التيار النفقي عندما تكون مغناطيسية الإبرة الماسحة معاكسة لمغناطيسية الذرات المقابلة، مما يؤدي إلى اقتراب الإبرة من السطح لإبقاء مقدار التيار ثابتا. ولذا يمكن من خلال هذا الفرق في المسافات المعطاة من قبل المجهر تحديد التركيب المغناطيسي للسطوح بشكل نانومتري.

المصادر:

Roland Wiesendanger, Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy Methods and Applications, (Cambridge University Press, Cambridge, 1998).

– **Hamad A. Al–Brithen, Arthur R. Smith, and Daniel Gall**, Surface and Bulk Electronic Structure of ScN(001) Investigated by Scanning Tunneling Microscopy/Spectroscopy and Optical Absorption Spectroscopy, Physical Review B 70(4), 045303 (2004).

2– **Hamad AL–Brithen, Muhammed Haider, Rong Yang, Costel Constantin, Erdong Lu, Nancy Sandler, Arthur Smith, and Pablo Ordejon**, Scanning Tunneling Microscopy and Surface Simulation of Zinc–Blende GaN(001) Intrinsic 4x Reconstruction: Linear Gallium Tetramers?, Physical Review Letters 95, 146102 (2005).

– **Arthur R. Smith**, Atomic–Scale Spin–polarized Scanning Tunneling Microscopy and Atomic Force Microscopy: A Review, Journal of Scanning Probe Microscopy, 1, 3–20 (2006).