وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة القادسية :

كلية العلوم :

قسم الكيمياء .

بحث بعنوان

المجهر الالكتروني الماسح

بحث مقدم من قبل الطالبة : زهراء فهد داوود

إلى مجلس كلية العلوم / قسم الكيمياء وهو جزء من متطلبات نيل شهادة البكلوريوس في علوم الكيمياء

بأشراف الدكتورة

زينب طارق

2019 م 1440 هـ

الاهداء . . .

كل من نطق بكلمة التوحيد لسانه وصدقها قلبه، الى من صل على خير البرية محمد (صل الله عليه وعلى اهل بيته الاطهار) .

الى من رخصوا دمائهم وضحو بأرواحهم من اجل الوطن

الى ملاكي في الحياة والتي علمتني صدق الايمان والوفاء وألية للوطن . . .الى معنى الحب والى معنى الحنان والتفاني والى بسمة الحياة واسس الوجود

الى من كان دعائها سر نجاحي وحنانها بلسم جراحي الى أغلى الحبايب امي الحبيبة .

الى كل من جمعني معهم المشوار الدراسي من بدايته الي اليوم الى كل من عرفني وسيعرفني ان شاء الله .

شكر و تقدير

أتقدم بالشكر والتقدير الى مشرفي على البحث الدكتورة زينب طارق مهدى لما قدمته لي من نصائح وملاحظات علمية قيمة اثناء البحث، وأقدم

شكري واعتزازي الى اسرتي التي لطالما كانت الى جانبي وساعدتني والى من كانت الأولى والأخيرة اعز الناس قلباً وروحاً والدتي العزيزة والى والدي العزيز الذي لطالما كان السند الدائم والفخر بكل المعاني والى كل من مد يد المساعدة لي.

المقدمة:

المجهر الإلكتروني الماسح والذي يشار له اختصار SEM من أهم أجهزة التصوير المجهري والتي لها الكثير من التطبيقات الرئيسية والمهمة في مجال علوم المواد والعلوم الطبية. وكلمحة تاريخية عن هذا المجهر فقد تم وضع تصور نظرية عمله بشكل كامل في الأربعينات الميلادية، ولم يتم تسويق أول نموذج من هذا الجهاز الا بعد مرور حوالي عشرون سنة إي في الستينات الميلادية. يتميز هذا المجهر بقدرته التكبيرية والتي تصل الى

أكثر من نصف مليون مرة، وعليه فقد وجد هذا المجهر طريقه الى جميع التطبيقات العلمية وفي شتى مجالات العلوم. فبواسطة المجاهر الإلكترونية الماسحة الحديثة نستطيع دراسة أسطح العينات وتركيباتها الدقيقة ومكوناتها الكيميائية وسماكتها، وكذلك دراسة أحجام الجسيمات والجزيئات والميكروبات، وفي تكنولوجيا النانو تتعامل كما يدل اسمها مع المواد بأبعاد لا تتجاوز ال 100 نانومتر.. وللدخول في هذا العالم المجهول لا بد من توفر ادوات قياس تمكننا من رؤية وقياس ومعرفة المواد في هذه الاحجام وإثر ما نقوم به عليها.. ومن هذه الوسائل مجهر المسح الالكتروني (Scanning Electron Microscopy – SEM) الذي يتيح لنا رؤية الاجسام التي لا نراها باستخدام المجهر الضوئي بصور مذهلة ثلاثية الابعاد

الاجزاء الأساسية في جهاز الميكروسكوب الالكتروني الماسح SEM

المدفع الالكتروني Electron Gun:

المدفع الالكتروني عبارة عن سيل من الالكترونات اللازمة لعمل جهاز SEM. المدفع الالكتروني 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 التي في المصباح الكهربي لأنها تمتلك نقطة انصهار عالية، وتعمل الفتيلة عند ارتفاع درجة

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

العدسات Lenses:

مثل الميكروسكوب الضوئي فان جهاز SEM 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 الالكترونات.

وبفعل ذلك تقوم هذه العدسات بتوجيه الالكترونات والتحكم في مسارها، مما يضمن ان تصل الالكترونات 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.

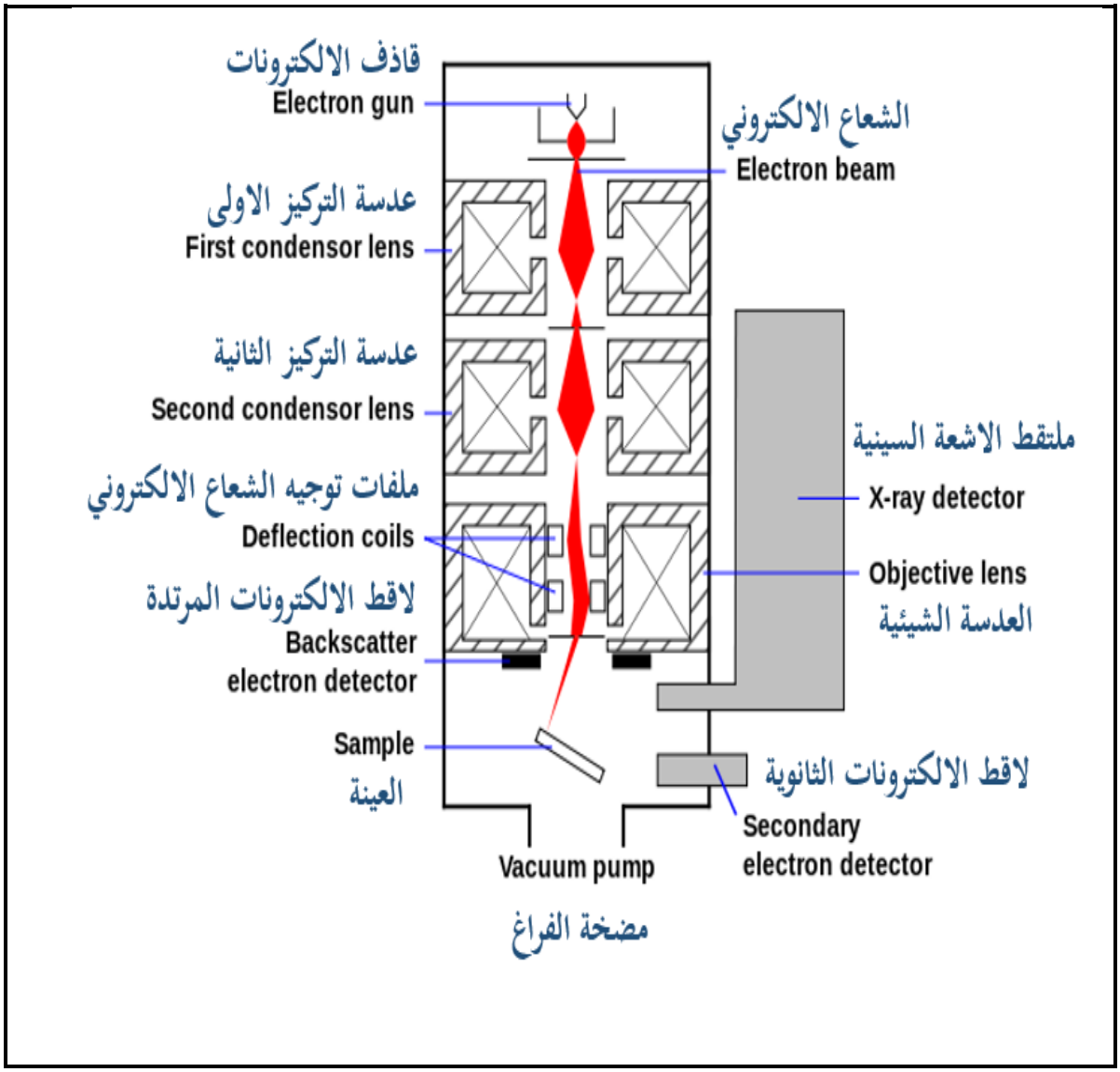
صورة توضح غرفة العينة:

الكواشف Detectors:

الكواشف المستخدمة في جهاز SEM ترصد تفاعل سيل الالكترونات مع العينة بعدة طرق مختلفة. فعلى سبيل المثال كواشف Everhart–Thornley ترصد الالكترونات الثانوية، وهي تلك الالكترونات المتحررة من السطح الخارجي من العينة. هذه الكواشف قادرة على إنتاج أدق الصور لسطح العينة. وهناك كواشف أخرى مثل كواشف الالكترونات ذات الاستطارة الخلفية backscattered electron وكواشف أشعة اكس والتي تمكن العلماء من تحليل العينة ومعرفة المركبات الكيميائية الموجودة في العينة.

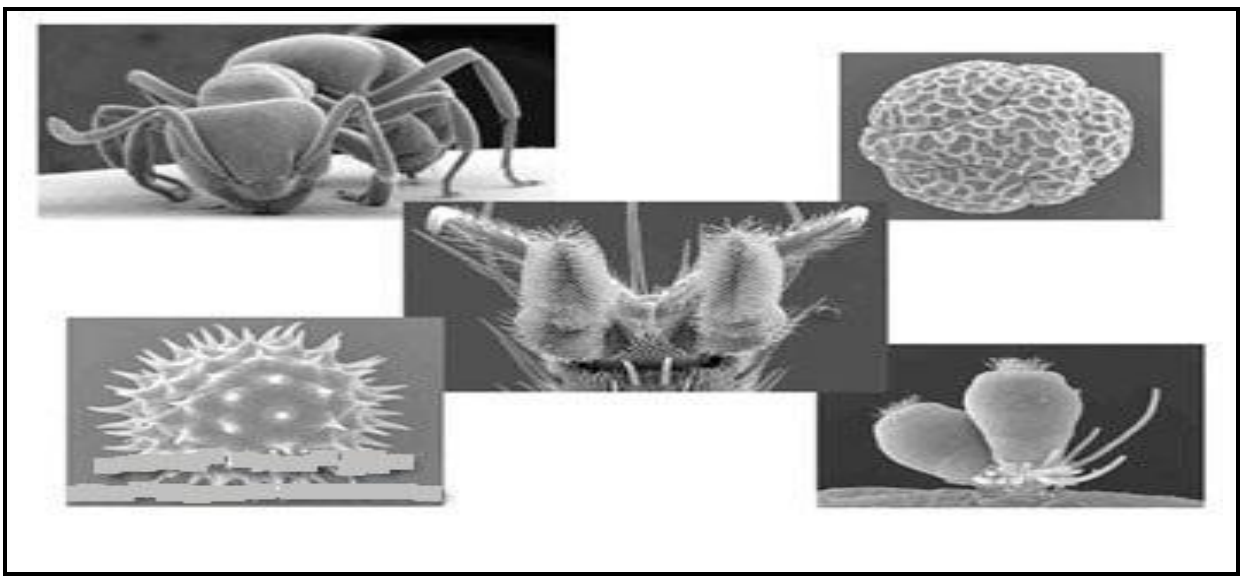
مفرغة الهواء Vacuum chamber:

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



تشغيل الميكروسكوب الالكتروني الماسح SEM:

قبل ان يقوم الباحثون بالحصول على الصور من جهاز SEM ولنفترض صور عن بعوضة، 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 من العينة من ان تصاب بالضرر أثناء الفحص بواسطة الشعاع الالكتروني 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. تكبير

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 والتصغير 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 الالكترونات 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.

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

المبادئ الأساسية للمجهر الإلكتروني الماسح:

كما ذكرنا سابقا يتميز المجهر الإلكتروني الماسح بقوة تكبير عالية جدا تصل الى أكثر من نصف مليون مرة، و يرجع السبب في ذلك الى استخدام أشعاع الكيتروني عبارة عن حزمة من الإلكترونات Electron Beam عالية الطاقة ذات طول موجي قصير جدا في حدود 0.0068 nm لذا نجد أن قوة التمييز Resolution لهذا المجهر تصل الى أقل من 0.5 nmوقوة التمييز يقصد بها قدرة المجهر على التمييز "التفريق" بين جسمين دقيقين متقاربين بحيث يظهران منفصلين، و هذا يعتمد على الطول الموجي المستخدم، و للمقارنة دعنا نتذكر المجهر الضوئي، المجهر الذي يستخدم الضوء الصناعي أو الطبيعي ما هي حدود قدرة تمييزه؟ طبعا قدرة تمييز هذا المجهر محدودة بالطول الموجي لضوء وعليه ستكون قدرة تمييزه محكومة بالأطوال الموجية لطيف المرئي إي ما بين 400 nm الى 700 nm وبالتالي فإن قوة تمييزه في حدود 0.2 مايكرومتر، ولكن الطول الموجي لحزمة الإلكترونات المستخدمة في المجهر الإلكتروني كما ذكرنا سابقا هي 0.0068 nm فقط مما يجعله ذا قوة تمييز فائقة جدا .

تعتمد نظرية عمل المجهر الإلكتروني الماسح على استخدام حزمة اليكترونية عالية الطاقة تصتدم بسطح العينة عاموديا بسطح العينة المدروسة، ومن ثم جمع الإشارات Signalsالمنعكسة والصادرة من العينة باستخدام الكواشف المختلفةDetectors .

وفيما يلي سنقدم شرحا مبسطا لكيفية عمل هذا المجهر :

أولاً: يتم أنتاج الإلكترونات عن طريق الانبعاث الحراري وذلك عن طريقة فتيلة Filament تسخين تصنع عادة من التنجستين، ويطبق على هذه الفتيلة جهد تعجيل تتفاوت قيمته ما بين 0.1 V الى 30 .V

ثانيا: تمر حزمة الإلكترونات خلال عامود المجهر microscope column المفرَغ و يتم تركيز هذه الحزمة بواسطة مجموعة من العدسات الكهرومغناطيسية electromagnetic lenses على طوال هذا العمود .

ثالثاً: تعمل فتحات التحكم apertures الموجودة على طول عمود المجهر على التحكم في عرض حزمة الإلكترونات وذلك بحجز الإلكترونات المتشتتة والمنحرفة عن مسار الحزمة.

رابعاً: تصتدم الحزمة الإلكترونية بسطح العينة و التي تكون داخل حيز مغلق و مفرغ تماما يسمى غرفة المجهر الإلكتروني الماسح SEM chamber حيث تتفاعل interaction هذه الحزمة مع سطح العينة ، و ينتج عن هذا التفاعل عدد من الانبعاثات " الإشارات " signals من أهم هذا الانبعاثات أو الإشارات و التي تستخدم في إنتاج صور أسطح العينات، إشارتان هما انبعاث الإلكترونات الثانويةSecondary Electrons و يرمز لها اختصارا SE و انبعاث إلكترونات الإستطارة الخلفية Backscattered Electron و يرمز لها اختصار BSE ، و أيضا هناك الإشاعة السينية X-rays المنبعثة من العينة و لها أهمية كبيرة في دراسة ما هي عناصر العينة و كذلك نسبها، مما يعطي معلومات وافيه عن

العينة المدروسة، و يجدر الإشارة هنا إلى أن كل إشارة من هذه الإشارات تنبعث من مستوى معين بالنسبة لسطح العينة و تشكل نسبة معينة من عملية التفاعل بين الحزمة الإلكترونية الساقطة و سطح العينة و تسمى عملية التفاعل هذه باسم حجم التفاعل Interaction volumeو الذي يبين الحيز ثلاثي الإبعاد لمدى التفاعل بين الحزمة الإلكترونية و العينة و كذلك مستوى و حجم كل إشارة من إشارات الانبعاث كما هو موضح في الشكل أدناه.

خامسا: يتم تجميع كل إشارة بواسطة الكاشف الخاص بها، حيث يتم بعد ذلك تحليل هذه الإشارات و معالجتها و من ثم يتم إظهارها كصور بالنسبة للإشارتين SE و BSE أو كطيف تحليلي للأشعة السينية Spectrum للأشعة السينية.X-ray

في ما يلي سنتحدث بشيء من التفصيل عن هذه الإشارات التي ذكرناها سابقا:

أولا : انبعاث الإلكترونات الثانوية:SE

تنبعث الإلكترونات الثانوية من سطح العينة و ذلك من عمق قد يصل الى 10 nm و تنتج هذه الإلكترونات عن التفاعل بين الكترونات الحزمة الإلكترونية الرئيسية primary beamو التي تسمى إيضا الحزمة الساقطة incident beam مع المجال الكهربائي لإلكترونات المدارات الخارجية في ذرات العينة و التي تتميز إي هذه الإلكترونات بارتباطها الضعيف بذراتها، و ينجم عن هذا التفاعل إستطارة غير مرنة، حيث تنتقل طاقة الإلكترونات الساقطة الى ذرات العينة و التي بدورها تبعث إلكترونات تتميز بانخفاض طاقتها (أقل من 50 eV) تكون هي الإلكترونات الثانوية Secondary Electron أو SE

و لانخفاض طاقتها فإنه لا تعبر العينة من أعماق كبيرة و عليه فإن هذه الإلكترونات SE لا تنبعث ألا من السطح، و بالتالي تكوّن لنا هذه الإلكترونات صورة واضحة لسمات و خصائص سطح العينة surface topography و يتم تجميعها بواسطة كاشف الإلكترونات الثانوية SE detector و الذي يكون قريبا جدا من سطح العينة لكي يتمكن من جمع إشارات هذه الإلكترونات ذات الطاقة المنخفضة.

ثانيا: انبعاث إلكترونات الإستطارة الخلفية:BSE

تنبعث هذه الإلكترونات من مسافات أعمق في داخل العينة، حيث يصل عمق انبعاثها ما بين 1000 nm الى 2000nm ، و تنتج هذه الإلكترونات نتيجة لتفاعل بين حزمة الإلكترونات الساقطة و المجالات الكهربائية لأنوية ذرات العينة، حيث تنعكس الإلكترونات الساقطة خلفيا بدون إي فقد يذكر في طاقتها، و تخرج "تنبعث" من العينة مكونة ما يعرف بإلكترونات الإستطارة الخلفية Backscattered electrons أو BSE و تتميز هذه الإلكترونات BSE بارتفاع طاقتها (أكثر من 50 eV) و يتراوح عمق انبعاث هذه الإلكترونات من 1000 nm الى 2000 ، و يتم جمعها باستخدام كاشف إلكترونات الإستطارة الخلفية Backscatter electron detector و الذي يوضع مباشرة فوق العينة و على مسافة كبيرة نسبيا من سطحها، و تتميز الصور الناتجة عن هذه الإلكترونات BSE بعدم و جود تفاصيل سطح العينة و ذلك لأن هذه الإلكترونات لا تنبعث من أسطح العينة بل من أعماق أكبر، حيث تظهر أسطح العينات في هذه الصور مسطحة وخالية من إي

سمات، و لكنها تعطينا معلومات عن العناصر المكونة لهذه العينة و توزيعها في العينة حيث تظهر مناطق العناصر ذات الأعداد الذرية الكبيرة "الذرات الثقيلة" ذات لون أسود أو رمادي بينما تظهر العناصر ذات الأعداد الذرية الصغيرة "الذرات الخفيفة" باللون الأبيض .

ثالثاً :انبعاث الأشعة السينية

في أجهزة المجاهر الإلكترونية الماسحة الحديثة يوجد وحدة كشف وتحليل الأشعة السينية X-rayوتعتبر هذه المعلومات مكملة للمعلومات التي يتم تحصيلها من التقنيتين السابقتين SEو BSEوتعطي الأشعة السيئة هذه معلومات وافية عما هي العناصر التي تحتويها المادة وكم نسبتها إيضا. و التقنية الرئيسية المستخدمة في وحدة الأشعة السينية تعرف باسم Energy Dispersive X-ray analysisو يرمز لها اختصارا EDX و تعني تحليل الطاقة المتفرقة للأشعة السينية، و كما ذكرنا سابقا انبعاث الأشعة السينة هو أحد الانبعاثات أو الإشارات الرئيسية التي تصدر من العينة بعد ضربها بالحزمة الإلكترونية عالية الطاقة داخل حجرة المجهر .SEM chamber

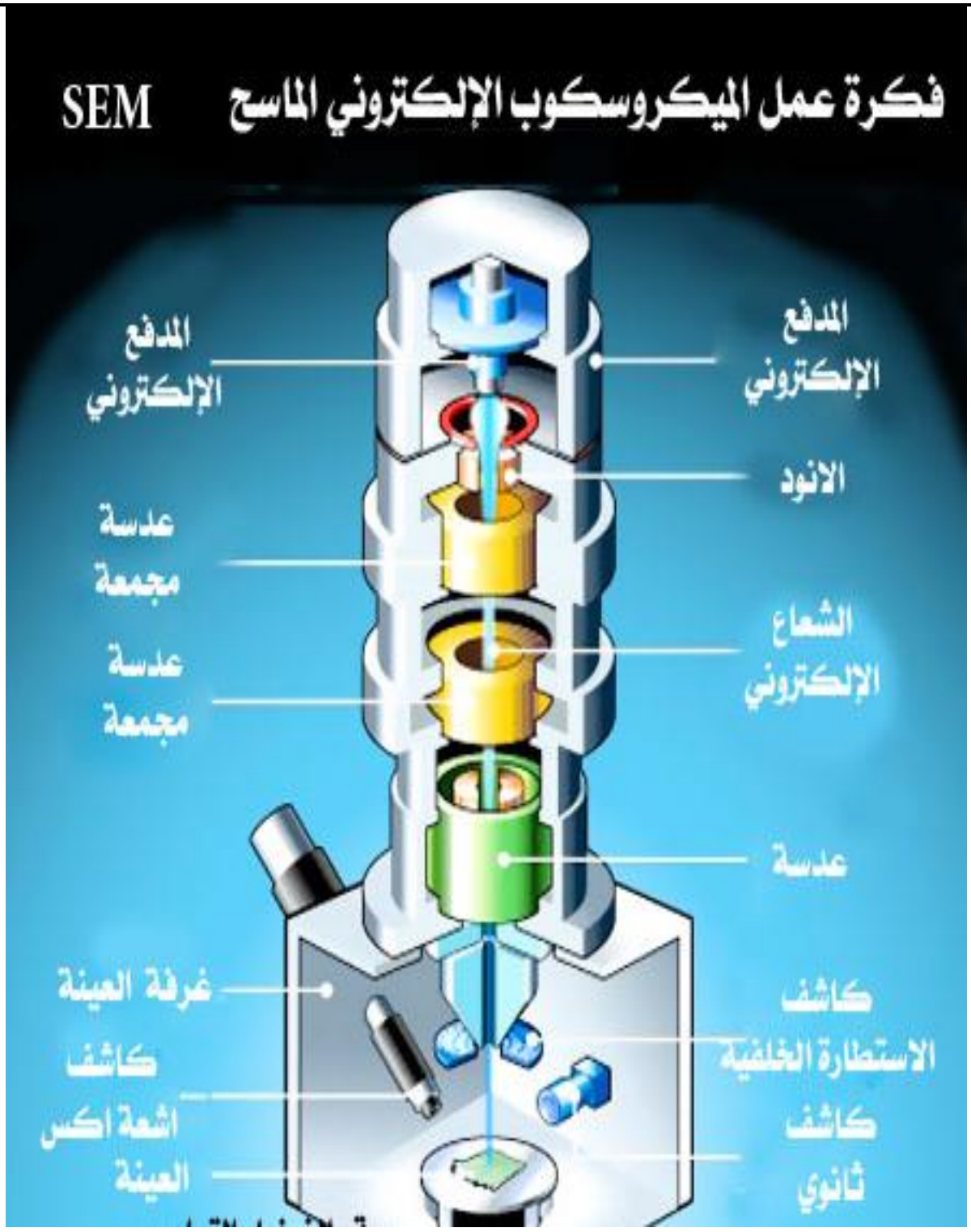
تتبع الأشعة السينية من عمق أكبر من انبعاث إشارات SE و BSE و ذلك من عمق يتراوح مداه ما بين 2000 nm الى 5000 nm و يمثل انبعاثها الجزء الأكبر من حجم التفاعل، و يحدث انبعاث الأشعة السينية هنا عندما تنتقل طاقة الإلكترونات الساقطة الى الإلكترونات الداخلية لذرات العينة حيث تنتقل هذه الإلكترونات الى مستويات طاقة أعلى مما يسبب إثارة لذرات و لك تعود الذرات المثارة الى مستوى طاقتها الأرضي فإنها تبعث

الطاقة على شكل إشعاعات سينية، تنبعث من سطح العينة و يتم بعد ذلك كشفها و تحليلها بواسطة كاشف الأشعة السينية X-ray detector و تعطى نتيجة هذا التحليل طيف الأشعة السينية X-ray Spectrum و الذي عن طريقه يمكن معرفة العناصر التي تحتويها العينة و كذلك 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-**الضوء (الفوتونات) Luminescence**: تنطلق الفوتونات من المواد نتيجة تهيّج الكتروناتها الى مدارات طاقة عليا نتيجة التصادم.. هذا الضوء يعطينا معلومات كثير مثل نوع المادة ومقدار قوى الشد والضغط عليها مثلا.

5- **تيارات العينة Sample Current**: عند قذف سيل من الإلكترونات داخل العينة تنشا تيارات كهربائية داخل العينة نفسها.. كأنها اصيبت بماس كهربائي.. وهذا التيار ضروري لعمل المجهر الماسح الالكتروني.. لأنه إذا لم تكن المادة موصلة للتيار.. ستتجمع الشحنات الكهربائية السالبة الساكنة على سطح العينة.. ولان الشحنات المتشابهة تتنافر.. فان هذه الشحنات على سطح العينة ستقوم بنفر شعاع الالكترونات الساقط عليها الذي نستخدمه للتصوير.. وستقوم بتشويش الصورة.

6- **الالكترونات المنبعثة Transmitted Electrons**: الالكترونات المنبعثة تكون ذات اهمية في العينات البالغة الصغر ذات الثخن القليل.. وتستخدم في نوع اخر من التصوير – وهو ادق واقوى نوع توصل اليه العلم البشري– الذي يعرف بمجهر الالكترونات العابرة Transmission Electron Microscopy – TEM


فكرة عمل الميكروسكوب الإلكتروني الماسح SEM
المدفع الإلكتروني
المدفع الإلكتروني
الانود
عدسة مجمعة
الشعاع الإلكتروني
عدسة مجمعة
عدسة
غرفة العينة
كاشف الاستطارة الخلفية
كاشف اشعة اكس
كاشف ثانوي
العينة

أنواع المجاهر الإلكترونية الماسحة :

تحدثنا سابقا عن النوع الرئيسي للمجاهر الإلكترونية الماسحة و هو النوع الذي يتطلب تفريغ الجهاز أثناء دراسة العينات لذلك كان هذا الأمر سببا في محدودية استخدامه في بعض التطبيقات و خاصة في العمل مع العينات الحيوية المحتوية على السوائل و الغازات و التي تتشوه و في بعض الأحيان تتناثر عند استخدامها في حيز مفرغ، لذا فقد تم تطوير نوع آخر من هذه المجاهر يعمل في حدود الضغط الجوي الطبيعي و يستطيع دراسة الكثير من العينات الحيوية مثل الخلايا الحيوية و البكتيريا و الأشجار و البلاستك و السوائل و غيرها و يعرف هذا المجهر باسم المجهر الإلكتروني البيئي الماسح Environmental Scanning Electron Microscope و يشار له اختصارا ESEM و يعود السبب في ذلك الى أن هذا المجهر يملك نظام تفريغ خاص به يجعل من الممكن أن تدرس العينات في حيز من الغاز مثل غاز ثاني أكسيد الكربون و غاز النتروجين و كذلك بخار الماء.

و إيضا هناك نوع آخر من المجاهر الإلكترونية الماسحة تعمل في درجات حرارة منخفضة جدا يمكن الباحثين من دراسة عينات الثلج و بلورات الجليد و كذلك الكثير من العينات في حيز بارد أو متجمد و يطلق على هذا النوع أسم المجهر الإلكتروني الماسح ذو الحرارة المنخفضة Low Temperature Scanning Electron Microscopy و يرمز له اختصار .LTSEM

المصادر

1. Klein, Tobias; Buhr, Egbert; Frase, Carl G. (2012). TSEM: A Review of Scanning Electron Microscopy in Transmission Mode and Its Applications. Advances in Imaging and Electron Physics. **171**. pp. 297–356.

2. Mignot, Christophe (2018). "Color (and 3D) for Scanning Electron Microscopy". Microscopy Today. **26** (3): 12–17. .
3. "Introduction to Electron Microscopy" (PDF). FEI Company. p. 15. Retrieved 12 December 2012.

4. "Next Monday, Digital Surf to Launch Revolutionary SEM Image Colorization". AZO Materials. 22 January 2016. Retrieved 23 January 2016.
5. Antonovsky, A. (1984). "The application of colour to SEM imaging for increased definition". Micron and Microscopica Acta. **15** (2): 77–84.

6. Bertazzo, S.; Gentleman, E.; Cloyd, K. L.; Chester, A. H.; Yacoub, M. H.; Stevens, M. M. (2013). "Nano-analytical electron microscopy reveals fundamental insights into human cardiovascular tissue calcification". Nature Materials. **12** (6): 576–583.

7. Butterfield, Nicholas; Rowe, Penny M.; Stewart, Emily; Roesel, David; Neshyba, Steven (16 March 2017). "Quantitative three-dimensional ice roughness from scanning electron microscopy". Journal of Geophysical Research: Atmospheres. **122** (5): 3023–3025. .