جمهورية العراق

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة القادسية

كلية العلوم / قسم الكيمياء

بحث حول

المجهر الإلكتروني الماسح Scanning Electron Microscope

بحث مقدم الى مجلس كلية العلوم /قسم علوم الكيمياء /جامعة القادسية وهو جزء من متطلبات نيل درجة البكالوريوس في علوم الكيمياء

مقدم من قبل الطالبة

علا علي نعمة

بأشرف الأستاذ

أ.م.د. أوراس عدنان حاتم

1440هـ **2019م**

وَلِيَعْلَمَ الَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ أَنَّهُ الْحَقُّ مِن رَّبِّكَ فَيُؤْمِنُوا بِهِ فَتُخْبِتَ لَهُ قُلُوبُهُمْ وَإِنَّ اللَّهَ لَهَادِ
الَّذِينَ آمَنُوا إِلَىٰ صِرَاطٍ مُّسْتَقِيمٍ

سوره الحج

الآية54

إهداء

أهدي هذا الإنجاز الى امي الحبيبه و أبي الغالي

وهذا الانجاز صغير بحقهما على كل ما قدماه لي من دعم معنوي

ومادي ووقوفهما بجانبي وتقديمهما ما يستطيعان من صغير وكبير حتى

انهي هذا المشوار الصعب الذي دام اعوام عديديه وكان له عقبات كثيره

وأود ان اهدي هذا الانجاز الى اخوتي و وأخواني أصدقائي الذين

وقفو بجانبي سواء بتشجيع او بدعوه في

وجهي او في غيابي اشكركم من اعماق قلبي.

شكر وتقدير

الحمد لله حمداً كثيراً طيباً غير مكفي ولا مستغنى عنه والصلاة والسلام على نبينا محمد وعلى أله وسلم

فالشكر لله الذي منَ علينا بسابغ فضله وأجل نعمه ، حيث هدانا للعلم وبلغنا مناهله، ومن ثم فإن وافر شكري وكثير امتناني أقدمه إلى من مد لي يده داعماً جهودي المبذولة ومباركاً خطا هذا العمل.

وأخص بالشكر سعادة الدكتورة/ **أ.م. د. أوراس عدنان حاتم** التي تفضلت بالإشراف على هذه الدراسة ، ومنحتني جهداً ووقتاً ،ولم تدخر وسعاً في توجيهي ومتابعتي.

كما أتقدم ببالغ الشكر وكثير الامتنان إلى من أعانني وقدم دعماً أو تسهيلات لهذه الدراسة أما فيض شكري وامتناني وفائق تقديري وعرفاني

فلوالدي الحبيب وأمي الحبيبة اللذين أفاضا علي بدعائهما الدائم لي بالتوفيق ،

ولأختي الحبيبة زهراء التي ذللت كثير من الصعوبات

أمامي ودعمتني وساندتني بكل ما تملك من جهد،

وما هذا الجهد الذي أضعه بين أيديكم إلا مساهمة أردت بها التطوير

فإن وفقت فبفضل من الله ونعمه وإن كان عدا ذلك فحسبي أن النقص سمة أعمال البشر.

وآخر دعوانا أن الحمد لله رب العالمين والصلاة والسلام على أشرف المرسلين سيدنا محمد وعلى اله وسلم.

المحتويات

م	الموضوع	رقم الصفحة
.1	مقدمة .	3-4
.2	المجهر الإلكتروني Electron microscope	5
.2.1	التطبيقات الاساسية للمجهر الإلكتروني	5
.2.2	أنواع المواد الممكن فحصها بالمجهر الالكتروني	6
.2.3	المجهر الالكتروني النافذ	7
.2.4	المجهر الالكتروني الماسح SEM	8
.2.4.1	تاريخ المجهر الالكتروني الماسح SEM	10-9
.2.4.2	تركيب المجهر الالكتروني الماسح SEM	12-10
.2.4.3	مبدأ المجهر الالكتروني الماسح SEM	12-14
.2.4.4	المسح الضوئي المجهري	15-14
.2.4.5	حزم الجسيمات المشحونة	15
.2.4.6	شعاع الالكترون الماسح الضوئي	15-17
.2.4.7	مجهر فون اردين المسح الالكتروني	18-21
.2.4.8	المجهر الالكتروني الماسح RCA	21-23
.2.4.9	كامبردج المجهر الالكتروني	24-29
.2.4.10	مسبار الاشعة السينية	30-29
.2.4.11	تحضير العينة	32-31

.2.4.12	تشغيل المجهر الالكتروني الماسح SEM	33-32
.2.5	المجهر الالكتروني النافذ- الماسح	34
.3	الحفاظ على المجهر	35
.4	المصادر.	36-38

1. المقدمة

منذ بداية الفحص المجهري للإلكترون ، كان تصوير العينات الصلبة هدفًا مهمًا ، خاصة وأن طرق إنتاج العينات الرقيقة طورت فقط لاحقًا .كانت المحاولة الأولى من قبل روسكا (1933) حيث كان سطح العينة طبيعيًا لاتجاه الرؤية والإضاءة بواسطة شعاع إلكتروني عند حدوث رعي على السطح ؛ حصل على صور للأسطح النحاسية والذهبية ولكن بتكبير قدره 10 Xفقط .بعد بضع سنوات قام بمحاولة ثانية (روسكا ومولر 1940) بنفس الهندسة وبنتائج هامشية فقط .كان Von Borries (1940) أكثر نجاحًا من خلال طريقة الإصابة بالرعي في مجهر الإلكترون (TEM) حيث يكون سطح العينة ببضع درجات في اتجاه المشاهدة وحزمة الإضاءة .هذا لا يزال أسلوب مهم.

كان الاختراق في التصوير المجهري لطبوغرافيا السطح في TEM هو تقديم النسخ المتماثلة بواسطة Mahl (1941)وهذه المعايير المعيارية للـ 25 عامًا القادمة على الرغم من أنها كانت مملة لصنعها ويمكن أن تخضع لأعمال فنية خطيرة .ويرد مثال في (الشكل1) .

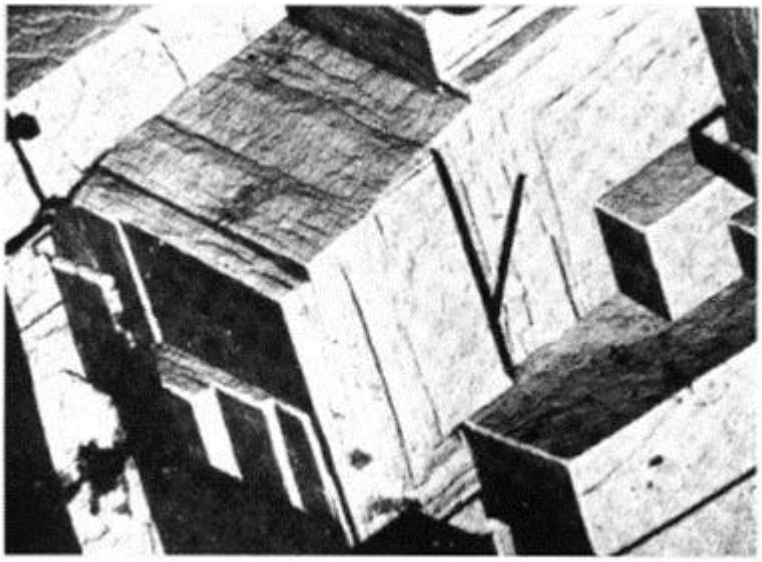


FIG. 1 TEM image of an early oxide replica of etched aluminum (Mahl 1941); horizontal field width = 9 μm.

شكل (1)

خلال ثلاثينيات القرن العشرين اخترع Knoll (1935) طريقة مختلفة تمامًا لتصوير العينات الصلبة ، وهي المسح المجهري للإلكترون ، لدراسة أهداف أنابيب الكاميرا التلفزيونية .بعد ذلك بعامين ، قام فون أردين (1938 a، ب) ببناء مجهر إلكترونى باستخدام مسبار منزوع النواة للغاية لمسح المجهر الإلكتروني للإرسال (STEM) ، كما جربه أيضًا باعتباره .SEM وبعد ذلك بوقت قصير ، طور زوريكين وآخرون (1942 (aنموذجًا مخصصًا لوزارة التعليم العالي .يمكن تأريخ بداية الاستخدام العام لـ

(SEM)بدقة حتى عام 1965 عندما قامت شركة Cambridge Instrument Company في المملكة المتحدة بتسويق جهاز Stereoscan 1 SEM الخاص بهم (ستتبعه JEOL بعد حوالي 6 أشهر في اليابان .(كان هذا بعد ثلاثين عامًا من التطورات الأولية في ألمانيا والولايات المتحدة الأمريكية ، الغرض من هذا البحث هو تتبع تطور SEM حتى بيع أول SEMs التجارية في عام 1965. بالمناسبة ، سيتبين أن العديد من الأفكار التي طرحها العمال الأوائل كانت قبل وقتهم بكثير ، وأصبحت تقنياً عملي فقط في وقت لاحق .يتم تلخيص تطوير أدوات التحقيق التحليلية بإيجاز فقط.

2. المجهر الإلكتروني Electron microscope

تستخدم الإلكترونات بدلاً من الأشعة الضوئية في هذا النوع من المجاهر حيث أن الإلكترونات ذات طول موجي قصير فتعطي هذه المجاهر قوة تكبيرية عالية تصل لأكثر من نصف مليون مرة أي حوالي 1000 ضعف عن المجاهر العادية. وفي الميكروسكوب الإلكتروني تمر الإلكترونات من خلال سلسلة من المجالات المغناطيسية تشبه في عملها نظام العدسات في المجهر الضوئي وبذلك فالإلكترونات التي تنعكس عن العينة والتي تنفذ من خلالها تبعاً لكثافة التراكيب في العينة المفحوصة يمكن استقبالها على لوحات حساسة أو مشاهدتها على شاشات خاصة مفسفرة تسمح برؤية الصورة لامعة وهي على عدة أنواع منها:

1. المجهر الالكتروني النافذ Transmission Electron microscope(TEM) يستخدم لدراسة المحتويات الداخلية للخلية.
2. المجهر الالكتروني الماسح Scanning electron microscope(SEM) يستخدم لدراسة السطح الخارجي للخلية.
3. المجهر الالكتروني النافذ- الماسح Scanning -Transmission Electron microscope(STEM) الذي يجمع بين النوعين اعلاه .

2.1. التطبيقات الاساسية للمجهر الالكتروني

- تكبير ووضوحية الصور
- تحليل التركيب
- دراسة الشكل الظاهري للسطح
- دراسة شكل المسحوق وتحليل الجزيئات ومعرفة احجامها
- تشخيص المعادن والمواد
- تصنيف المواد
- تحليل العناصر لمواد معروفة وغير معروفة
- التحليل النوعي والكمي للعناصر

2.2. انواع المواد الممكن فحصها بالمجهر الالكتروني

- العينات الطبية والبيولوجية
- المساحيق والغبار
- المعادن والزجاج والسيراميك
- المواد شبه الموصلة
- البلاستيك والبوليمرات
- المواد المركبة
- الالياف

شكل (2)

شكل (3)

2.3. المجهر الإلكتروني النافذ Transmission electron microscope

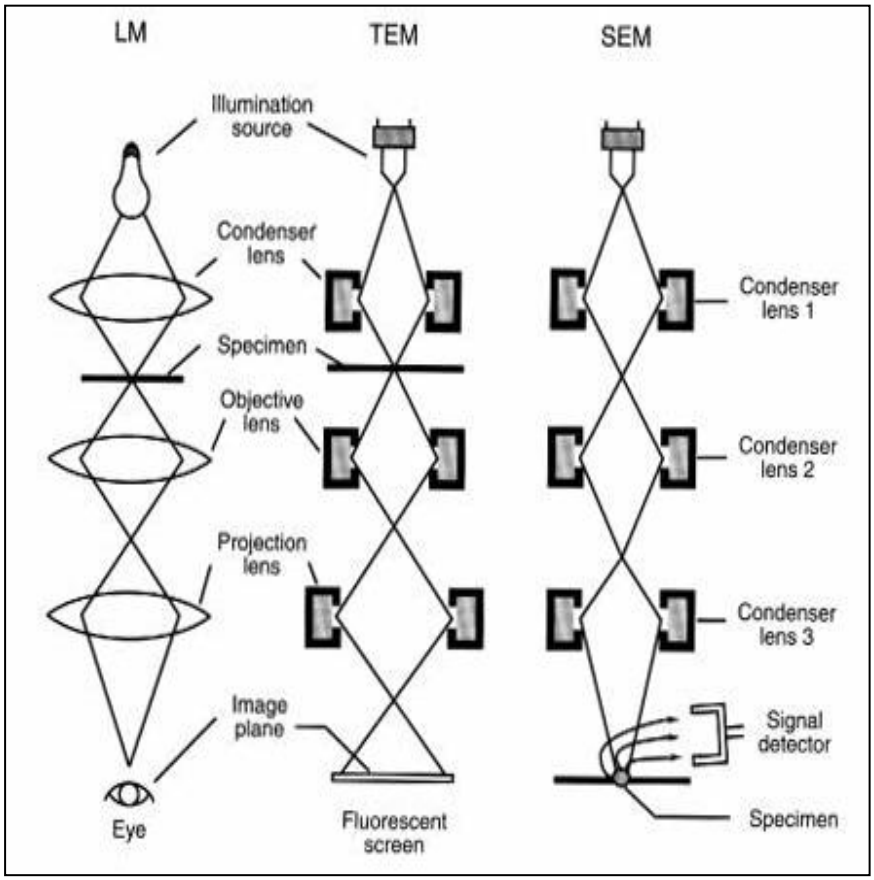
في حالة المجهر الالكتروني النافذ تتعرض العينة كلياً للإشعاع الإلكتروني الذي ينفذ أو يمر من العينة ليكوّن الصورة على شاشة العرض ويأتي التباين في الصورة من الإختلافات في الكثافة الإلكترونية للعينة ، أو من كمية الإلكترونات التي تمر من خلال العينة. ومما هو جدير بالذكر أن الفحص بالمجهر الإلكتروني يحتاج إلى معاملات خاصة سواءاً في تحضير العينة أو في إعداد المجهر للفحص.

ان استعمال سيل او تيار من الالكترونات والتي لها طول موجة قصير جداً تمكن من الحصول على قدرة تمييز عالية جداً وبهذا فان المجهر الالكتروني له قدرة او قوة تمييز عالية تصل الى حوالي 10-20 انكستروم مع قوة تكبير عالية تصل الى 50 ألف او أكثر. يستخدم تيار كهربائي بقوة آلاف الفولتات عوضاً عن الضوء المستخدم في المجهر الضوئي ويكون طول موجة شعاع الالكترونات قصيراً جداً لذلك يستطيع تحطيم أي شئ يوضع مقابل هذه الالكترونات ولهذا لا تستخدم عدسات زجاجية بل تستخدم ملفات كهربائية مغناطيسية Electromagnetic fields تقوم مقام العدسات الزجاجية. ان المجاهر الالكترونية معقدة كثيراً وغالية الثمن وصعبة الاستعمال ولكن أسسها العامة تشبه في كثير من الوجوه المجهر الضوئي حيث يتكون المجهر الالكتروني من أنبوبة عمودية محكمة القفل وتنبثق الالكترونات من مصدر كهربائي قوي يعرف electron gum والذي هو عبارة عن خيط معدني مسخن لدرجة حرارة عالية في مجال مفرغ من الهواء تماماً إضافة إلى ملفات كهرومغناطيسية تعمل عمل العدسة المكثفة تدعى بعدسات المكثف الكهرومغناطيسية electromagnetic condenser lenses ثم تمر حزمة الالكترونات على العينة المراد فحصها ثم يضبط مسار الالكترونات بملف كهربائي آخر يقوم مقام العدسة الشيئية حيث تكبر الصورة ثم تضبط الالكترونات بملفات كهربائية أخرى تقوم مقام العدسة العينية وتستقبل الالكترونات الخارجة على شاشة متفلورة Fluorescent screen يمكن النظر اليها مباشرة أو باستخدام عدسات مكبرة وتوجد آلة تصوير فيها أفلام حساسة تستطيع التقاط الصورة المتكونة.

بعكس المجهر الضوئي فان قدرة التمييز العالية للمجهر الالكتروني النافذ تمكن من مشاهدة تفاصيل أكثر للخلية. لا يمكن تكبير سيل الالكترونات الا في الفراغ التام لان الالكترونات تفقد سرعتها وتتباعد اذا اصطدمت بجزيئات الأوكسجين والنتروجين المتفرقة وبقية جزيئات الهواء. يغلف الجهاز أنبوب محكم صلد قوي ويحافظ على استمرارية تفريغه من الهواء بصورة ثابتة . بالإضافة إلى ان التفريغ يحتاج إلى تبريد مائي وان التيارات الكهربائية العالية يجب أن تكون مستقرة ومتوازنة.

2.4. المجهر الإلكتروني الماسح Scanning electron microscope

تقوم كمية قليلة من الإشعاع الإلكتروني بمسح العينة فتتجمع الإلكترونات المنبعثة من العينة لتكون الصورة المنبعثة على أنبوبة أشعة المهبط. إن الصفة الرئيسية المميزة فـي جهـاز (SEM) أنه تستخدم فيه حزمة الكترونية ضيقة لمسح النموذج البايولوجي وهذه الحزمة تتحرك الى الامام والخلف اثناء عبورها الجسم المفحوص الذي سوف يبعث الالكترونات ثانوية تستخدم لتكوين الصورة اي أن العينة تتسبب في عكس الإلكترونات الثانوية ويمكن استخدامها لإنتاج الصورة . عند استعمال المجهر الالكتروني الماسح تظهر الصورة بأبعادها الثلاثة حيث يمكن فحص السطح الخارجي للخلايا . يحتوى المجهر الإلكتروني على الأدوات المنتجة للإلكترونات ، والمستخدمة لمسح العينة المراد فحصها ، هذه الإلكترونات تتمثل في مدفعة الإلكترونات المنطلقة وتمر بالعمود المفرغ تماما من الهواء حتى لا تعيق مرور الإلكترونات وعند وصول الحزمة تصطدم بالعينة المراد فحصها ، حيث تنتج عدة اشعاعات منها الالكترونات الثانوية المسئولة عن انتاج خيال الصورة ، وأي اختلاف في كثافة الالكترونات الثانوية المنبعثة من العينة يظهر لنا اختلاف في البريق على الشاشة .



شكل (4) يوضح مقارنة بين المجهر الضوئي والالكتروني النافذ والماسح.

2.4.1. تاريخ المجهر الالكتروني الماسحSEM

تطور جهاز SEM بدأ ببطأ شديد ولم يظهر بشكل مفاجأة. فعندما تم الكشف عن هذه التقنية لأول مرة في عام 1935، توجه المهتمين بهذه التقنية إلى محترفي التسويق وطلبوا منهم أن يقيموا هذه الجهاز الجديد ومدى أهميته وتقدير مدى احتياج السوق له. وبعد الدراسات والأبحاث المتخصص 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 لتطوير هذه التقنية. والآن يصل عدد أجهزة SEM المستخدمة في مختلف المختبرات والمراكز البحثية بأكثر من 50,000 جهاز. والسؤال الآن كيف تمكن هذا الجهاز من الانتشار بهذا القدر بعد ان كانت التوقعات انه 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 من عقود من الزمن، ولازلنا نراهم في المختبرات المدرسية ومختبرات البحثية، إلا ان اعتماد هذه الأجهزة على الضوء شكل لها عقبة أمام التطور والوصول إلى قدرات تكبيريه كبيرة. فالضوء يميل إلى ان يحيد diffract أو ينحني عن مساره حول حواف العدسات، وهذا السلوك حدد القوة التكبيريه والقدرة التحليلية لها بشكل كبير لا يمكن التغلب عليه عند الوصول إلى أقصى قدرة تكبيريه أو تحليلية لهذه الأجهزة. ونتيجة لذلك بدأ العلماء في تطوير طرق جديدة لفحص العالم المجهري، ففي العام 1932، تم إنتاج أول جهاز ميكروسكوب الكتروني نافذ transmission electron microscopeوالذي يعرف بالاختصار TEM وسوف نقوم بشرحه في مقالة منفصلة تحت باب كيف تعمل الأشياء في موقع الفيزياء التعليمي. هذه الأداة توجه شعاع من الالكترونات خلال العينة التي تفحص ومن ثم يتم عرض الصورة الناتجة على شاشة فلوريسنت. أجهزة TEM تشبه كثيرا أجهزة SEMوالتي ظهرت أجهزة SEM 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 الالكتروني 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 الالكترونية الدقيقة وحتى الكشف عن كيف تعمل الحشرات.

شكل(5) من اليسار إلى اليمين Oliver C. Wells وبجانبه Thomas E. Everhart و R.K. Matta في العام 1963 حول أول نجاح لتطوير جهاز الميكروسكوب الالكتروني الماسح

2.4.1.1. تطور SEM حتى عام 1965

تطورت SEM في المختبرات الأخرى حتى عام 1965 ، كما يتضح من المنشورات العلمية ، ما يلي .تم بناء SEM في فرنسا من قبل برنارد و Davoine (1957) في المعهد الوطني للعلوم التطبيقية في ليون: كان حجم المسبار من أجل 1 ميكرون واستخدم على مدى سنوات أساسا لدراسات تلألؤ الكاثود .في المملكة المتحدة ، طورت شركة AEI ، التي كانت آنذاك شركة تصنيع TEM رئيسية ، جهاز SEM لكنها لم تتابع بعد أن تبين أن الأداة الأولى ، التي تم بيعها في عام 1959 ، غير مرضية .(Jervis 1971)في أوائل الستينيات من القرن العشرين ، في مختبرات ويستنجهاوس في بيتسبيرج ، ويلز ، وإيفرهارت ، وماتا وغيرها قاموا بإنشاء SEM متطور لدراسات أشباه الموصلات والتصنيع المصغر وعرض التصوير EBIC (Wells وآخرون 1965 .(وفي الاتحاد السوفيتي ، كان هناك SEMفي جامعة موسكو منذ حوالي عام 1960 (كوشنير وآخرون) .

2.4.2. تركيب المجهر الالكتروني الماسح

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.

1. المدفع الالكترونيElectron Gun

المدفع الالكتروني ليس سلاحا كما يبدو من الاسم إلا انه عبارة عن سيل من الالكترونات اللازمة لعمل جهاز .SEM المدفع الالكتروني قد يكون احد 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.

2. العدساتLenses

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.

3. غرفة العينةSample 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.

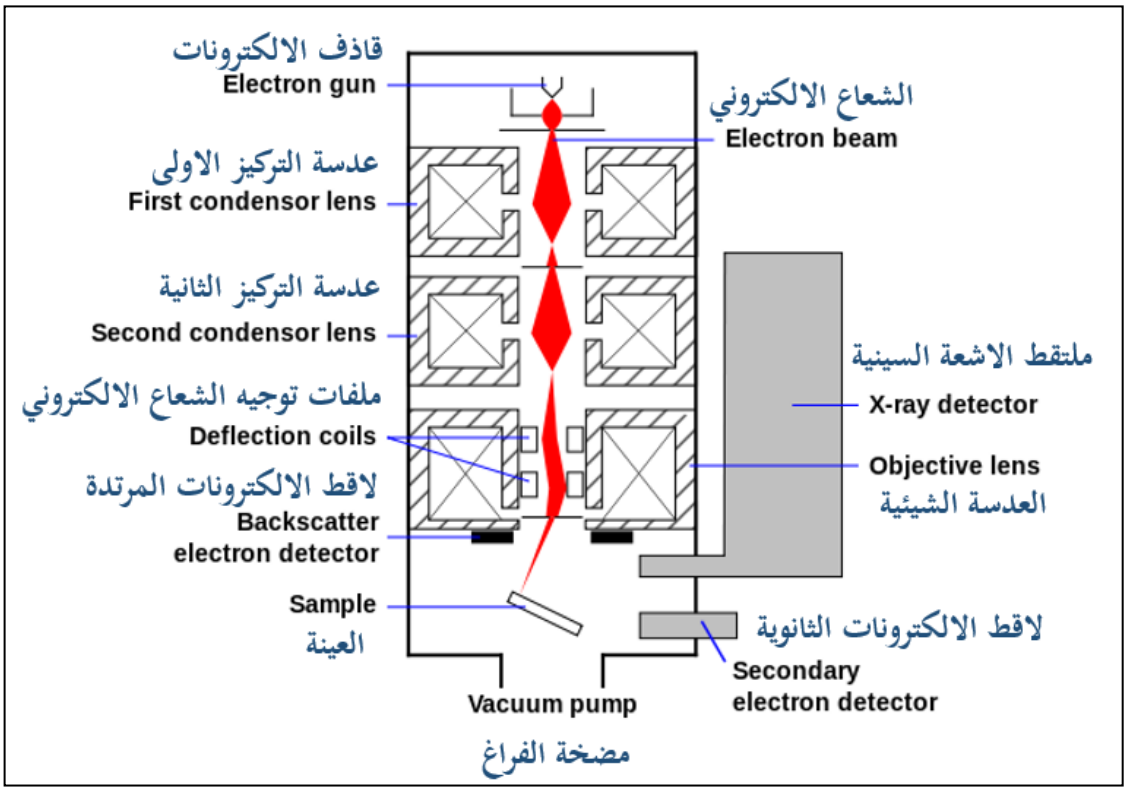
شكل (6) صورة توضح غرفة العينة

4. 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 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.

5. 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.

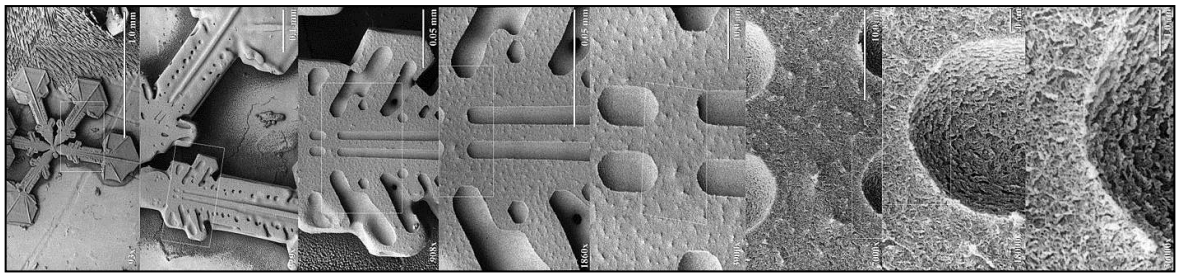


شكل (7) يوضح أجزاء المجهر الإلكتروني الماسح

2.4.3. مبدأ المجهر الالكتروني الماسح

يقوم على توجيه سيل من الالكترونات ينطلق من مدفع الالكترونات- فلنتخيله على انه قلم رصاص رأسه الذي يكتب من الكترونات تتركز في نقطة قطرها بضع نانومترات – على العينة المراد فحصها،

بحيث يمر هذا الشعاع بمرحلتين من التركيز او التكثيف ليتم تجميعه في نقطة لا يتجاوز قطرها بضعة نانومترات باستخدام عدسات التركيز.. و من ثمّ يقوم بعملية مسح scan للعينة من أعلى لاسفل و من اليمين لليسار كما لو انك تكتب بهذا القلم على ورقة. يتم توجيه الشعاع على العينة باستخدام ملفات التوجيه التي تحرك الشعاع بخطوة لا تزيد ايضا عن بضعة نانومترات.. و عندما يقوم سيل الاكترونات المركّز بضرب العينة في كل نقطة نحصل على عدّة انبعاثات تعتمد على طبيعة المادة .. و من ثم نقوم بجمع هذه الانبعاثات و عدّها .. و بعدها نعطي لكل مربّع تم مسحه درجة لون معين بين الابيض و الاسود .. بحيث تتناسب شدة البياض مع عدد الانبعاثات التي تم تسجيلها في كل مربع.. و هذه الانبعاثات تعطي معلومات مختلفة عن العينة و كل منها تفيد في نوع معين من الدراسات .. و هذه الانبعاثات الناتجة عن صدم العينة بالكترونات هي:



شكل(8) بلّورة من الثلج تحت قدرات تكبيرية مختلفة كما تبدو بالمجهر الماسح الالكتروني

1. **الالكترونات الثانوية Secondary Electrons :**

عندما يمر سيل الالكترونات الذي يقذفه المجهر خلال العينة .. تتحرر بعض الالكترونات من ذرات العينة نتيجة هذا التصادم و تنبعث من سطح العينة.. فيتم التقاطها و عدّها واحدا واحدا (تقريبا) .. لاحظ ان المواد التي تحوي الكثير من الالكترونات كالذهب ستطلق الكثير من الاكترونات الثانوية (و ستبدوا اكثير بياضا) بينما المواد العازلة او قليلة الالكترونات الحرة ستطلق عددا اقل (و ستبدوا اكثر سوادا) .. و هذه هي اهم التكرونات لعمل هذا المجهر.

2. **الالكترونات المرتدة Back-Scattered Electrons :**

الالتكرونات التي يقذفها المجهر بطاقة عالية قد ترتد من سطح العينة .. و يتم التقاطها و عدها ايضا .. فالذرات الكبيرة ستؤدي الى ارتداد عدد اكبر من هذه الالكترونات .. بينما الذرات الصغيرة ستقوم بالعكس.. و كلما زاد حجم ذرات العينة (زاد عدد الكتروناتها و بروتوناتها) زاد عدد الالتكرونات المرتدة و بالتالي ستبدو اكثر بياضاً.

3. **الاشعة السينية أو أشعة إكس :x-rays :**

تعطي معلومات دقيقة عن نوع المواد في العينة.. أي انواع الذرات و العناصر بدقة و ليس شكل سطح 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 و مقدار قوى الشد و الضغط عليها مثلا.

5. **تيارات العينة Sample Current :**

عند قذف سيل من الاكترونات داخل العينة تنشا تيارات كهربائية داخل العينة نفسها.. كانها اصيبت بماس كهربائي .. و هذا التيار ضروري لعمل المجهر الماسح الالكتروني .. لانه اذا 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 .. و ستقوم بتشويش الصورة.

6. **الالكترونات المنبعثة Transmitted Electrons:**

الالكترونات المنبعثة تكون ذات اهمية في العينات البالغة الصغر ذات الثخن القليل .. و تستخدم في نوع اخر من التصوير – و هو ادق و اقوى نوع توصل اليه العلم البشري- الذي يعرف بمجهر الالكترونات العابرة Transmission Electron Microscopy – TEM

2.4.4. المسح الضوئي المجهري

تم تقديم الاقتراح الأول في الطباعة لتطبيق المسح على الفحص المجهري بواسطة (1928) Synge في دبلن .كان هذا مجهرًا ضوئيًا تم مسحه ضوئيًا وكان هدفه هو تجاوز حد Abbe لقرار ما يسمى الآن "المجهر القريب من الحقل" ، وهو إنتاج مسبار ضوئي صغير جدًا عن طريق موازاة الفتحة من خلال فتحة أصغر من طول الموجة الضوء.

كان Synge مقامرًا علميًا كان لديه أفكار أصلية في العديد من المجالات العلمية ولكنه لم يحاول وضعها موضع التنفيذ .(McMullan 1990) ومع ذلك ، فقد نظر في بعض المشكلات التي قد تواجهها مع مجهر المسح واقترح استخدام مشغلات كهربائية بيزو (Synge 1932) ، كما يتم استخدامها الآن بنجاح كبير في مجهر المسح النفقي وأدوات التحقيق الأخرى ، بما في ذلك بالطبع المجهر الضوئي القريب من المجال نفسه .لقد توخى إجراء مسح سريع للعينة بحيث يمكن عرض صورة مرئية على

شاشة الفسفور ، كما أشار إلى إمكانية توسيع التباين لتعزيز الصورة من عينة تباين منخفض - ربما أول ذكر لمعالجة الصور بالوسائل الإلكترونية (كما تختلف عن التصوير الفوتوغرافي).

2.4.5. الحزم الجسيمات المشحونة

وصف Stintzing 1929 ، من جامعة غيسن في براءات الاختراع الألمانية اقتراحًا لاستخدام حزمة الإلكترون في أداة المسح .كانت براءات الاختراع هذه معنية بالكشف عن الجسيمات وتغيير حجمها وحسابها تلقائيًا باستخدام حزمة ضوئية ، أو تلك الخاصة بالحجم المجهري تحت الضوء ، وهي حزمة من الإلكترونات .كان تركيز الإلكترونات في ذلك التاريخ غير معروف له ، كما هو الحال بالنسبة لمعظم الآخرين ، واقترح الحصول على مسبار ذي قطر صغير من خلال الشقوق المتقاطعة .كان من المقرر أن يتم فحص العينة ميكانيكياً في حالة شعاع الضوء ، وأن المجالات الكهربائية أو المغناطيسية ستحول شعاع الإلكترون .كان يجب استخدام كاشفات مناسبة للكشف عن الحزمة المرسلة التي قد تكون مخففة بواسطة الامتصاص أو الانتثار .كان يجب تسجيل الخرج على مسجل الرسم البياني بحيث يتم إعطاء البعد الخطي للجسيم بواسطة عرض انحراف ، وسمك السعة ؛ لم يتم اقتراح إنتاج صورة ثنائية الأبعاد .يبدو أن Stintzing لم يحاول إنشاء هذا الصك ولا توجد رسومات ترافق مواصفات البراءة.

2.4.6. شعاع الإلكترون الماسح الضوئي

كانت Knoll ، المخترع المشارك لـ TEM مع Ruska ، أول من نشر صورًا من عينات صلبة تم الحصول عليها عن طريق مسح شعاع الإلكترون .(Knoll 1935) في عام 1932 ، بعد فترة وجيزة من بناء أول TEM في برلين تكنيش Hochschule ، انتقل إلى شركة Telefunken للعمل على أنابيب الكاميرا التلفزيونية .هناك طور ماسح شعاع الإلكترون لدراسة أهداف هذه الأنابيب .تم تركيب العينة في أحد طرفي أنبوب زجاجي مغلق (الشكل 9) ومسدس إلكترون في الطرف الآخر ؛ كانت إمكانات التسارع في حدود 500 - 4000 فولت. تم تركيز حزمة الإلكترون على سطح العينة وتم مسحها ضوئيًا بواسطة لفائف انحراف في خطوط من 200 خط و 50 إطار / ثانية .تم تضخيم التيار الذي تم جمعه بواسطة العينة (فرق الحادث وتيارات المنبعثة الثانوية) بواسطة مضخم أنبوب حراري وشكل أنبوب أشعة كاثود معدلة الكثافة تم مسحه ضوئيًا بواسطة لفائف انحراف متصلة في سلسلة مع تلك الموجودة على الماسح الضوئي ذي الحزمة الإلكترونية . عن طريق تغيير نسبة اتساع المسح ،

يمكن أن يتغير التكبير ، وهو مبدأ أظهره Zworykin (1934 ,1942a) على مجهر بصري مزود بكاميرا تلفزيون.

استخدم Knoll وحدة التكبير في معظم الأوقات ، لكنه كان بإمكانه زيادتها إلى حوالي 10 مرات قبل أن يتم تحديد الدقة بقطر مسبار المسح .مبدأ تم إظهاره بواسطة Zworykin (1934 ,1942a) على مجهر بصري مزود بكاميرا تلفزيون .استخدم Knoll وحدة التكبير في معظم الأوقات ، لكنه كان بإمكانه زيادتها إلى حوالي 10 مرات قبل أن يتم تحديد الدقة بقطر مسبار المسح .مبدأ تم إظهاره بواسطة Zworykin (1934 ,1942a) على مجهر بصري مزود بكاميرا تلفزيون .استخدم Knoll وحدة التكبير في معظم الأوقات ، لكنه كان بإمكانه زيادتها إلى حوالي 10 مرات قبل أن يتم تحديد الدقة بقطر مسبار المسح.

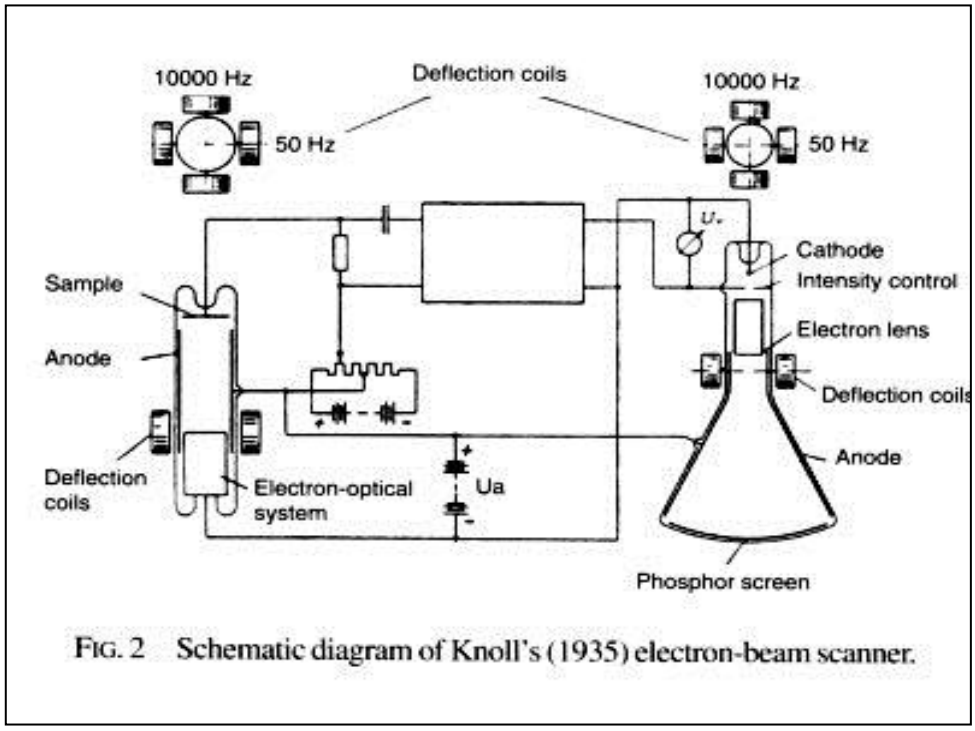


FIG. 2 Schematic diagram of Knoll's (1935) electron-beam scanner.

شكل (9)

كان لهذا الجهاز جميع ميزات SEM تقريبًا ، لكن نظرًا لعمله السابق على TEM ، لم يستخدم Knoll عدسات إلكترونية إضافية لتقليل حجم المجس الذي يقل عن 100 ميكرون ؛ لكن القرار الذي حصل عليه كان كافيا تماما لغرضه .كان تيار الشعاع مرتفعًا نسبيًا ، وفقًا لترتيب microamps ، وبالتالي يمكن استخدام الأنابيب الحرارية لتضخيم إشارة الإشارة على الرغم من معدل المسح السريع.

لا شك أن صورًا مماثلة أنتجها آخرون ممن عملوا على تطوير كاميرات التلفزيون في الثلاثينيات من القرن الماضي ، لكن كنول كانت الوحيدة في ذلك الوقت التي نظرت إلى عينات غير أهداف أنبوب

الكاميرا ، مثل حديد السيليكون (الشكل 10) ، كما أوضح آليات التباين: معامل الإلكترون الثانوي والطوبوغرافيا .

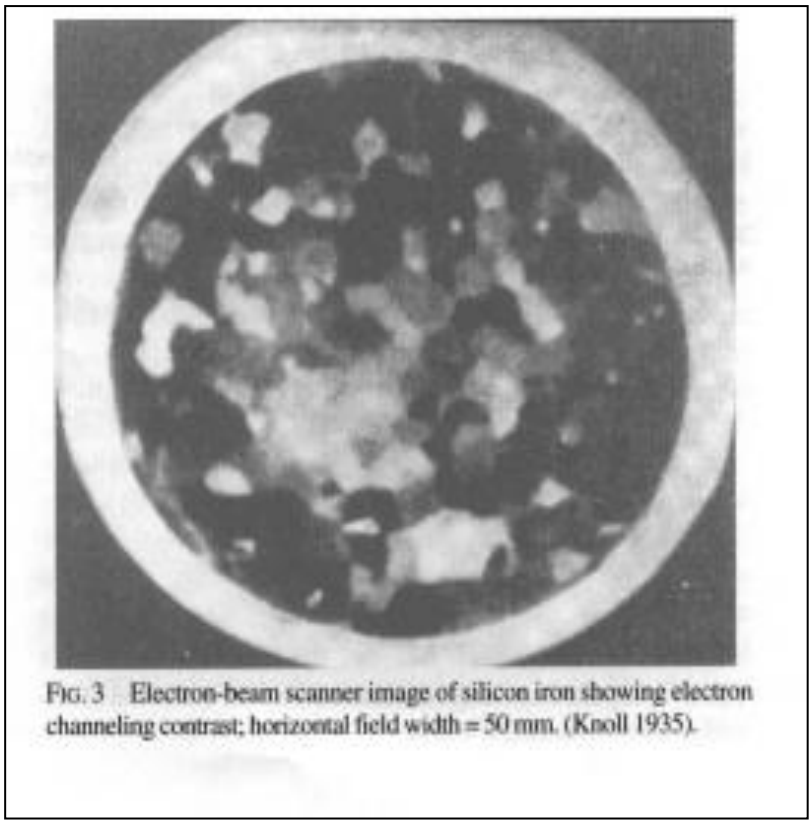


FIG. 3 Electron-beam scanner image of silicon iron showing electron channeling contrast; horizontal field width = 50 mm. (Knoll 1935).

شكل (10)

كانت الصور التي شاهدها صورًا حقيقية للإلكترون الثانوي لأن مسدس الإلكترون وعينته كانا محاطين بالمغلف الزجاجي المفرغ للغاية والمخبوزة ، وبالتالي كان هناك تلوث ضئيل أو معدوم للتلوث على السطح .في الآونة الأخيرة فقط نسبيا التي كانت متاحة UHV SEMs التي يمكن أن تعمل في هذا النظام التصوير.

واصل Knoll استخدام ماسح شعاع الإلكترون له الذي أطلق عليه ("der Elektronenabtaster") لعدد من الأغراض بما في ذلك دراسة طبقات الأكسيد على المعادن.(Knoll 1941)

2.4.7. مجهر فون اردين المسح الإلكتروني

تم تطوير أول مجهر مسح إلكتروني باستخدام مسبار دون ميكرون بواسطة von Ardenne ، وهو استشاري خاص كان له مختبره الخاص في برلين ، على مدى فترة قصيرة جدًا تبلغ حوالي عامين ؛ كان لديه أيضًا خبرة في تطوير أنابيب كاميرات التلفزيون .(von Ardenne 1985) في عام 1936 تم التعاقد معه من قبل شركة Siemens و Halske AG للتحقيق في إمكانية استخدام مسبار إلكتروني ممسوح ضوئيًا لتجنب آثار انحراف لوني موضوعي مع عينات سميكة في .TEM خلال هذا العمل ، وضع الأسس المجهريّة لمسبار الإلكترون من خلال إجراء ونشر (von Ardenne 1938a ,b) تحليلاً مفصلاً لتصميم وأداء البصريات الإلكترونية التي تشكل مسبار باستخدام العدسات المغناطيسية .غطى التحليل القيود المفروضة على قطر المسبار بسبب انحرافات العدسة وحساب التيار في المسبار .

من أجل الوفاء بعقد Siemens ، قام ببناء أول STEM وأظهر تشكيل مجسات حتى قطر 4 نانومتر .ولكن في الوقت القصير المتاح كان يقتصر على استخدام التكنولوجيا الحالية ، ولأنه لم يكن هناك كاشف إلكتروني منخفض الضوضاء مناسب ، استخدم فيلما فوتوغرافيا لتسجيل الصورة.

وبالتالي لم يكن هناك صورة مرئية على الفور .يظهر تخطيطي لعمود المجهر في الشكل .10 :تم تركيز صورة مزيفة من كروس مدفع الإلكترون على العينة بواسطة عدستين مغنطيسيتين ، وتم تركيب ملفات انحراف XY فوق الثانية مباشرة .أسفل العينة مباشرة كان هناك أسطوانة حولها كانت ملفوفة لفيلم التصوير الفوتوغرافي. تم تسجيل الصورة عن طريق تدوير الأسطوانة وتحريكها بشكل أفقي في وقت واحد عن طريق المسمار بينما كان يتم التحكم في التيارات في ملفات الانحراف بواسطة مقاييس الجهد مقترنة ميكانيكيا بآلية الطبل . كانت شدة الشعاع منخفضة جدًا حوالي 10 (E-13 A)* وكان من الضروري تسجيل الصورة على مدار حوالي 20 دقيقة .نظرًا لأن الصورة لم تكن مرئية حتى تم تطوير الفيلم ، لا يمكن تحقيق التركيز بشكل غير مباشر إلا باستخدام المسبار الثابت لإنتاج صورة ظل لمساحة صغيرة من العينة على شاشة ZnS أحادية البلورة تمت ملاحظتها من خلال المجهر الضوئي ونظام المنشور .كانت التسجيلات أقل من تلك الموجودة في TEM التي تم بناؤها بواسطة روسكا وفون بوريز في شركة سيمنز ، ولم يتم الوفاء بالمزايا المرجوة من STEM مع عينات سميكة. لقد قضى وقتًا قصيرًا في محاولة استخدام الأداة في وضع SEM على عينات كبيرة الحجم ، ولكن يمكن الحصول على صور ذات دقة منخفضة فقط بسبب مشكلة الكاشف: تم تضخيم تيار العينة بواسطة أنابيب حرارية وكان هناك حاجة لتيار مسبار كبير .لم ينشر أي صور.

في الإجمال ، عمل فون أردين لمدة تقل عن عامين على مسح المجهر الإلكتروني قبل التركيز على تطوير TEM العالمي (von Ardenne 1985) ؛ وبعد ذلك ، مع بداية الحرب ، لبناء فواصل السيكلوترون والنظائر لمشاريع الطاقة النووية .إذا كان قادرًا على المتابعة ، فلا شك في أنه كان بإمكانه إنشاء SEM فعال خلال عام أو عامين: ويتضح ذلك من خلال براءة اختراع (von Ardenne 1937) والتي تضمنت اقتراحًا للمسح الضوئي مزدوج الانحراف ، ورقتين(von Ardenne 1938a) ، (b، وكتاب .(von Ardenne 1940) كان اثنان من فصول الكتاب يتناولان المسح المجهري واستندتا إلى أوراق 1938 ، لكنهما اشتملا على مواد إضافية تتعلق بتصوير أسطح العينات الصلبة .والأهم من ذلك أنه اقترح كاشفًا باستخدام مُضاعِف إلكتروني مع ديناميات نحاس البريليوم (انظر الشكل 11).التي يمكن أن تفتح على الغلاف الجوي وتعمل بكفاءة في ظل ظروف فراغ سيئة .تم الإبلاغ أولاً عن قياسات نسبة الانبعاث الثانوية لنحاس البريليوم واستقراره عند تعرضه للغلاف الجوي فقط في عام 1942 من قبل آي. ماتيس من معهد أبحاث AEG في برلين ، ولكن فون آردن كان على الأرجح على دراية بهذا البحث قبل عام أو عامين.

وناقش في كتابه أيضًا التفاعل بين إلكترونات الحزمة والعينة واقترح أن الانتثار الخلفي قد يتسبب في فقد الدقة ، موضحًا ذلك بمخطط بياني له نظرة حديثة تمامًا (الشكل 13) .وجادل بأن إلكترونات الحزمة العارضة تنتج إلكترونات ثانوية عند أو بالقرب من السطح من منطقة تساوي تقريبًا قطر الشعاع وتعطي صورة عالية الدقة ("nutzbare Strahlung") ؛ ثم تخترق إلكترونات الشعاع العينة وتكون نسبة منها مبعثرة إلى الوراء وتصل إلى السطح حيث تنتج ثواني ثانوية أخرى .يشار الآن إلى هاتين الإشارات بشكل عام SE-I و SE-II على التوالي

(Drescher et al. 1970 ,Peters 1982) تنبعث الإلكترونات المبعثرة في الخلف من منطقة قطرها قابلة للمقارنة مع عمق الاختراق ، والثواني التي تنتجها ("schadliche Strahlung") قد تضعف الدقة (ومع ذلك لم يفكر في حالة عينة ذات شوائب صغيرة أسفل السطح). وخلص إلى أنه يمكن الحصول على دقة جيدة إما مع شعاع طاقة منخفضة للغاية (1 كيلو فولت) ، أو مع وجود طاقة عالية (50 كيلو فولت) .في الحالة الأولى ، ستخرج الإلكترونات المبعثرة من مساحة سطح أكبر قليلاً من الحزمة العارضة ولن يتأثر القرار .من ناحية أخرى مع حزمة 50 كيلوفولت ، سوف تنتج الإلكترونات الثانوية بواسطة الإلكترونات المبعثرة في الخلف على مساحة أكبر بكثير ؛ علاوة على ذلك ، سيتم توزيعها بالتساوي بحيث يكون تأثيرها الرئيسي هو زيادة الخلفية (تقليل التباين) بدلاً من التأثير على الدقة.

تم تدمير مجهر المسح الضوئي لفون أردين في غارة جوية على برلين في عام 1944 ، وبعد الحرب لم يستأنف عمله في المجهر الإلكتروني ، لكنه بحث في مجالات أخرى: أولاً في روسيا ومن عام 1955 في درسدن ، والتي كانت آنذاك في .DDR تم تقديم معلومات إضافية حول العمل العلمي لفون آردن في سيرته الذاتية (فون آردن (1972)) وماكمولان 1988.

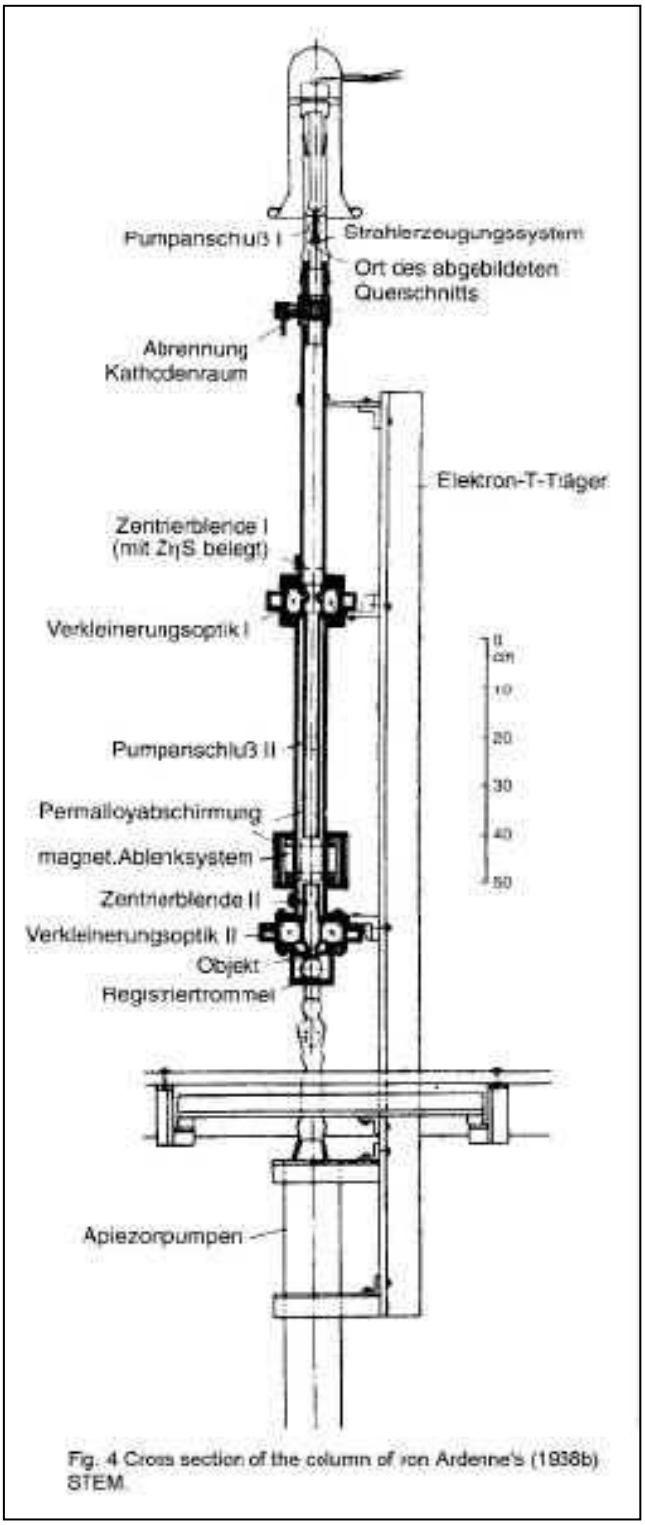
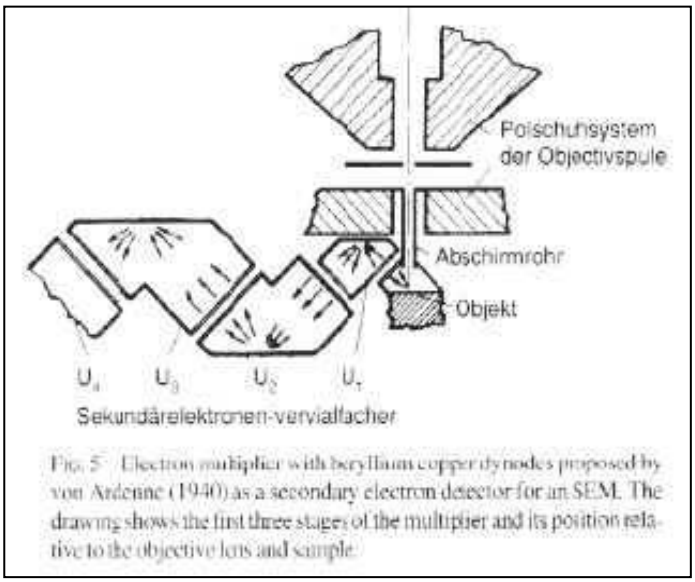
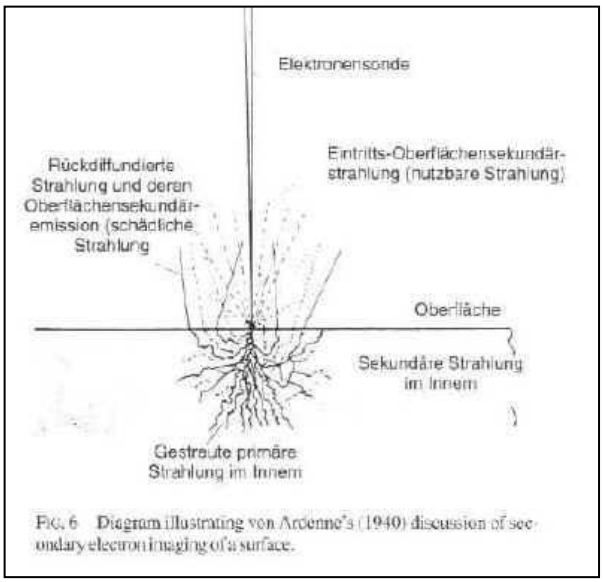


Fig. 4 Cross section of the column of von Ardenne's (1938b) STEM.

شكل (11)



شكل (12)



شكل (13)

2.4.8. المسح الإلكتروني المجهر RCA

وفي الوقت نفسه ، في أمريكا ، بدأ زوريكين ، مدير الأبحاث في مختبرات RCA Camden NJ ، في عام 1938 برنامج تطوير حول SEM (Zworykin et al. 1942a) استمر حتى عام 1942. وقد تم هذا العمل بالتوازي مع تطوير TEM وبواسطة نفس الموظفين ، ولا سيما هيلير ورامبرغ وفانس وسنايدر وكذلك زوريكين نفسه.

على الرغم من أن Zworykin قام بترجمة كل ورقة مجهرية من ألمانيا بمجرد استلامها (Reisner 1989) ، إلا أنه لم يتأثر على ما يبدو بعمل von Ardenne على .SEM وبدلاً من ذلك ، بدأ بتكرار تجارب ماسحة شعاع Knoll باستخدام "Monoscope" ؛ كان هذا أنبوبًا لإنتاج أشعة الكاثود تم إنشاؤه بواسطة RCA للاستخدام التلفزيوني (Burnett 1938) وكان مشابهًا جدًا لجهاز .Knollثم بنى SEM بناءً على Monoscope ولكن مع عدستين مغناطيسيتين لإنتاج مسبار شديد التركيز ، ونظام فراغ قابل للفك حتى يمكن تغيير العينة .(Zworykin et al. 1942a) كان معدل المسح هو معيار تلفزيون الولايات المتحدة ، و 441 خطًا و 30 إطارًا / ثانية ، وتم تكبير الإشارة بواسطة مضخم فيديو للأنبوب الحراري .

حاول بعد ذلك الحصول على تيار عالٍ في مسبار أصغر باستخدام مسدس انبعاث ميداني ذي نقطة تنجستين أحادية البلورة (Zworykin et al. 1942a) ، استنادًا إلى تجربة مجهر الإسقاط النقطي الذي تم بناؤه في .RCA Laboratories by Morton and Ramberg (1939) للحصول على فراغ

عالٍ بما فيه الكفاية ، اضطر إلى العودة إلى امتلاك السلاح والعينة في مظروف زجاجي كان مخبوزًا ومغلقًا .تم استخدام عدسة مغناطيسية واحدة ، وتم الحصول على صور عابرة بمعدل التكبير 8000 X مع المسح بمعدل التلفزيون ومضخم الأنبوب الحراري .لا شك أن الصور الثابتة قد تحققت ، لكن في ذلك الوقت لم يكن المجهر العملي سينتج بسبب عدم وجود تقنيات UHV القابلة للفك.

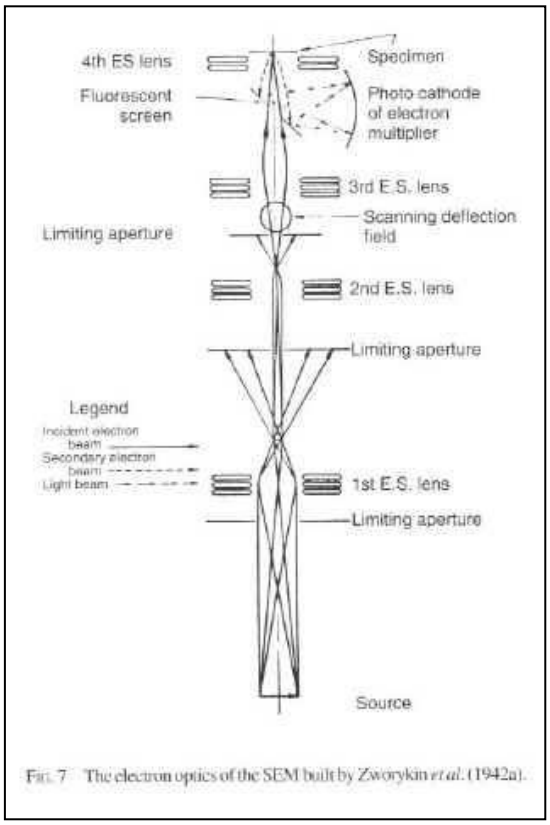


Fig. 7 The electron optics of the SEM built by Zworykin *et al.* (1942a).

شكل (14)

للتغلب على مشكلة الضوضاء ، قررت Zworykin بناء SEM باستخدام كاشف إلكتروني فعال وفحص بطيء .كان الكاشف عبارة عن مزيج من الفوسفور ومضاعف الضوء الذي استخدمه كل من Everhartو Thornley بعد حوالي عشرين عامًا في شكل محسّن .من أجل إحضار الإلكترونات الثانوية إليها ، صمم عدسة غاطسة إلكتروستاتيكية أعاقت إلكترونات الحزمة وعجلت المرتبات الثانية.يوضح الشكل 7 الترتيب النهائي للإلكترون البصري: تم استخدام العدسات الإلكتروستاتيكية لإنتاج صورة مغمدة من المصدر على العينة والتي عقدت عند +800 فولت بالنسبة لكاثود المسدس المؤرض.تم تسريع حزمة الإلكترون الخارجة من البندقية إلى 10 كيلو فولت في البصريات الإلكترونية المتداخلة.

في الصك الأول تم إجراء المسح عن طريق تحريك العينة بالنسبة إلى الحزمة الكهربائية ميكانيكياً باستخدام ملفات صوت مكبر الصوت والمحركات الهيدروليكية لاحقًا ؛ كان فقط في النسخة النهائية التي

تم استخدام المسح المغناطيسي للشعاع .تم إصلاح وقت الفحص في 10 دقائق بواسطة مسجل الفاكس الذي تم استخدامه لتسجيل الصور والذي يتحكم أيضًا في عمليات المسح المجهر .لم يكن هناك نص لإجراء مسح أسرع وإنتاج صورة مرئية على شاشة تلفزيون ؛ يبدو هذا غريباً أن نتذكر خلفية تليفزيون زوريكين ، ولكن ربما كان ذلك بسبب أن عرض النطاق الترددي للإشارة كان محدودًا بوقت تحلل الفوسفور كما تم العثور عليه في العمل اللاحق بجامعة كامبريدج .(McMullan 1952) تم العثور على إعداد التركيز من خلال تعظيم مكونات التردد العالي في شكل موجة فيديو لوحظ على الذبذبات ، على الرغم من أن القصد من ذلك هو إنتاج التباين من خلال الاختلافات في نسبة الانبعاثات الثانوية للمكونات السطحية ، وتم اختيار طاقة الحزمة العارضة 800 فولت مع أخذ هذا في الاعتبار ، فإن تلوث السطح في الفراغ السيئ إلى حدٍ ما حال دون الحصول على تباين تركيبي ذي معنى .في الواقع ، كانت جميع الصور المجهرية المنشورة في Zworykin من عينات محفورة أو متقشرة ، وكان التباين طبوغرافيا (Zworykin et al. 1942b) ، على سبيل المثال النحاس المحفور (الشكل 15).كانت جودة الصور المسجلة مخيبة للآمال إلى حد ما ، وجنبا إلى جنب مع عدم وجود صورة مرئية يجب أن يكون عاملا في قرار RCA لوقف المشروع .ولكن هناك سبب آخر هو بلا شك النتائج الممتازة التي ، كما ذكر في المقدمة ، يتم الحصول عليها بنسخ متماثلة في .TEMs

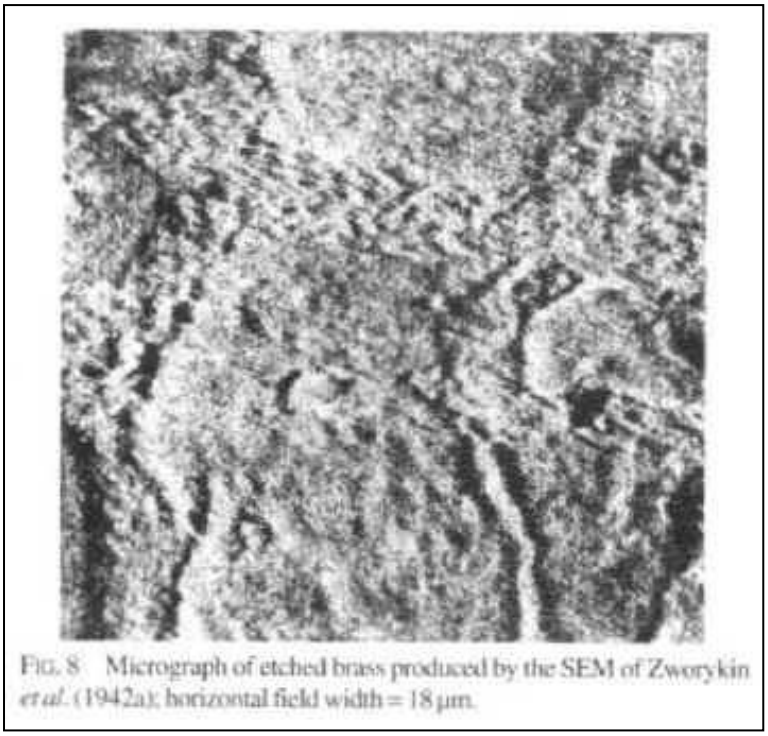


FIG. 8 Micrograph of etched brass produced by the SEM of Zworykin *et al.* (1942a); horizontal field width = 18 μm.

شكل (15)

2.4.9. كامبردج المسح الالكتروني المجاهر

بصرف النظر عن التحليل النظري لحل السلطة من قبل مؤلف فرنسي (Brachet 1946) ، لم يتم الإبلاغ عن أي عمل آخر حول SEM بحلول عام 1948. بدا الشعور بين المجهرين الإلكترونيين أنه لا يستحق المزيد من النظر في ضوء الفشل الواضح من - RCA SEM إذا لم ينجح هذا الفريق ذو الخبرة ، فمن غير المرجح أن يتمكن أي شخص آخر من إنتاج أداة فعالة ؛ كان غابور (1945) استثناءً ملحوظًا لهذا الرأي العام .عندها قرر تشارلز أوتلي في المختبرات الهندسية بجامعة كامبريدج أن إلقاء نظرة أخرى على SEM قد يكون مفيدًا ، على الرغم من أنه ، كما قال ، "أعرب العديد من الخبراء عن وجهة نظر مفادها أن هذا بناء(SEM) سيكون مضيعة كاملة للوقت .(Oatley et al 1985)" وقد أوضح بإسهاب بعض الأسباب التي دفعته إلى اتخاذ هذا القرار ولكن الأسباب التكنولوجية الرئيسية هي أن Zworykin"ومعاونيه أظهروا أن مبدأ المسح سليم في الأساس ويمكن أن يقدم قرارًا مفيدًا في فحص الأسطح الصلبة" و "التحسينات" في التقنيات والمكونات الإلكترونية قد نتجت عن العمل أثناء الحرب .(Oatley 1982)"وكان يرى أيضًا أن كاشف RCA كان ذا كفاءة منخفضة وأن نسبة صغيرة فقط من المرتبات الثانية كانت تصل إليه ، مما أدى إلى أن الصور كانت مزعجة على الرغم من وقت التسجيل الطويل.

تم اختياري من قبل Oatley لبناء SEM كدكتوراه مشروع ، مهمة صعبة لأن الفحص المجهري الإلكتروني كان موضوعًا جديدًا تمامًا للجميع في المختبر ، على الرغم من أنني اكتسبت بعض الخبرة في صناعات الرادار والتلفزيون بما في ذلك تطوير وتصنيع أنابيب أشعة الكاثود .أكملت لأول مرة اختبار TEM الذي يركز على 40 كيلو فولت والذي بدأه طالب آخر لدرجة الدكتوراه ، وهو KF Sander؛ لقد تخلى عنها في مرحلة مبكرة وقام بتغيير موضوع مشروعه البحثي إلى التخطيط لمسار الإلكترون .(Sander 1951) قمت بتحويله إلى STEM ، ثم إلى SEM ، بإضافة ملفات المسح الضوئي ، كاشف مضاعف الإلكترون وجهاز أنبوب أشعة الكاثود المستمر طويل الأمد McMullan) 1952). لا يزال من غير الواضح كيف يمكن تحسين نتائج .Zworykin من المتوقع أن تكون طاقة الحزمة العارضة الأعلى مفيدة ، لكن لم يتضح كيف سيتم تشكيل تباين الصورة .أظهر Bruining and de Boer (1938)أن الانبعاث الثانوي من سطح ما يعتمد بشكل أساسي على ظروف الفراغ وكان من الواضح أنه لا يمكن تحقيق فراغ عالي بما فيه الكفاية ليكون هناك تباين تركيبي إلكترون ثانوي ذي مغزى من عينة مصقولة.

تم الحصول على صور للأسطح عند حدوث الرعي واتجاه العرض (2 درجة) في TEM بواسطة von Borries (1940)، وغيرها ، ويبدو أنه من المحتمل أن يتم إنتاج صور مماثلة في SEM. لذلك قمت بتركيب عينة من الألمونيوم المحفور بزاوية أكبر (30 درجة)، لأن الإلكترونات المبعثرة في الخلف لم تكن بحاجة إلى التركيز) ومكافأتها بمظهر ثلاثي الأبعاد شائع الآن وهو علامة قاعة صور SEM . هذا هو نتيجة لعمق كبير من التركيز .تظهر إحدى الصور الأولى من الألومنيوم المحفور في (الشكل a16) صورة العرض المباشر ، فترة الإطار 1.8 ثانية ، و (b) تسجيل 5 دقائق.كانت طاقة الشعاع 16 كيلو فولت والقرار حوالي 50 نانومتر ، محدودة بسبب الاستجماتيزم في العدسة الموضوعية وعدم كفاية التدريع المغناطيسي.

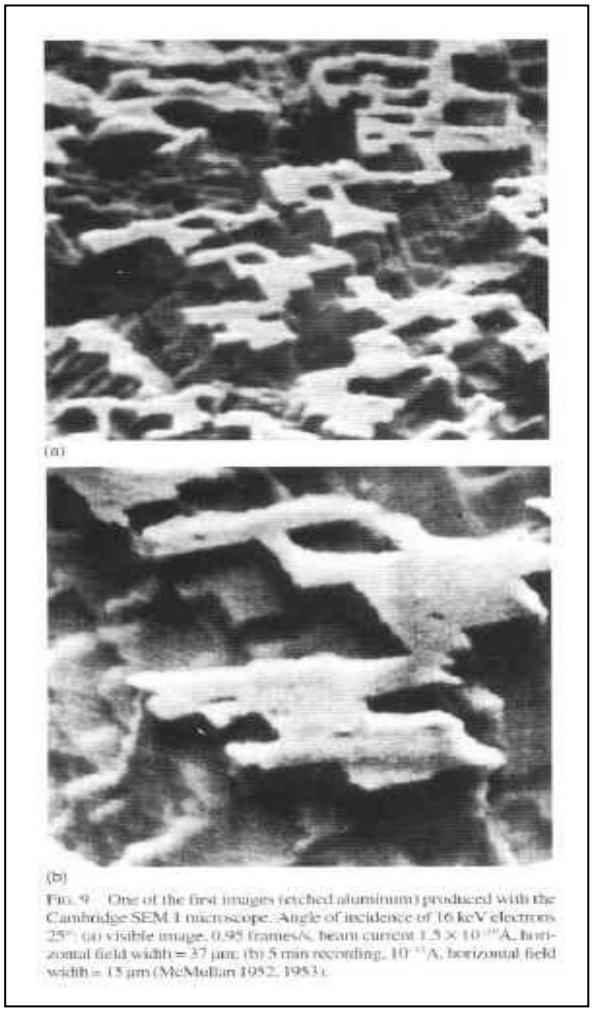


FIG. 9. One of the first images (etched aluminum) produced with the Cambridge SEM 1 microscope. Angle of incidence of 16 keV electrons 25°. (a) visible image, 0.95 frames/s, beam current 1.5×10^{-10} A, horizontal field width = 37 μm; (b) 5 min recording, 10^{-11} A, horizontal field width = 15 μm (McMullan 1952, 1953).

شكل (16)

يظهر مخطط كتلة SEM في (الشكل 17)(McMullan 1953) .وقطاع مستعرض من العمود في الشكل18 .كان هناك عرض لأنبوب أشعة الكاثود طويل الأمد سريع المسح نسبيًا (405 خطوطًا ، 1.9 حقل / ثانية متداخلة) وشاشة عرض بطيئة (5 دقائق) للتسجيل الفوتوغرافي ؛ وشملت الميزات الأخرى مكبر للصوت غير الخطية للسيطرة على جاما ، وإزالة الشعاع لاستعادة العاصمة .تمت إضافة ملفات

مسح انحراف مزدوج لاحقًا .كانت أهم الاختلافات بين هذا الصك و Zworykin هي طاقة الحزمة العارضة أعلى بكثير في العينة (15-20 كيلو فولت) وتم إنتاج التباين بشكل رئيسي بواسطة الإلكترونات المتناثرة .تم التحقيق في آلية تشكيل التباين وظهرت لتكون طبوغرافية .لم تبذل أي محاولة لجمع المرتبات منخفضة الطاقة وفي الواقع اعتقدت أنها ستكون ضارة بسبب التلوث الذي لا مفر منه على سطح العينة .تجاهلت الزيادة في الإشارة التي تم الحصول عليها من المرتبات المنخفضة الطاقة.

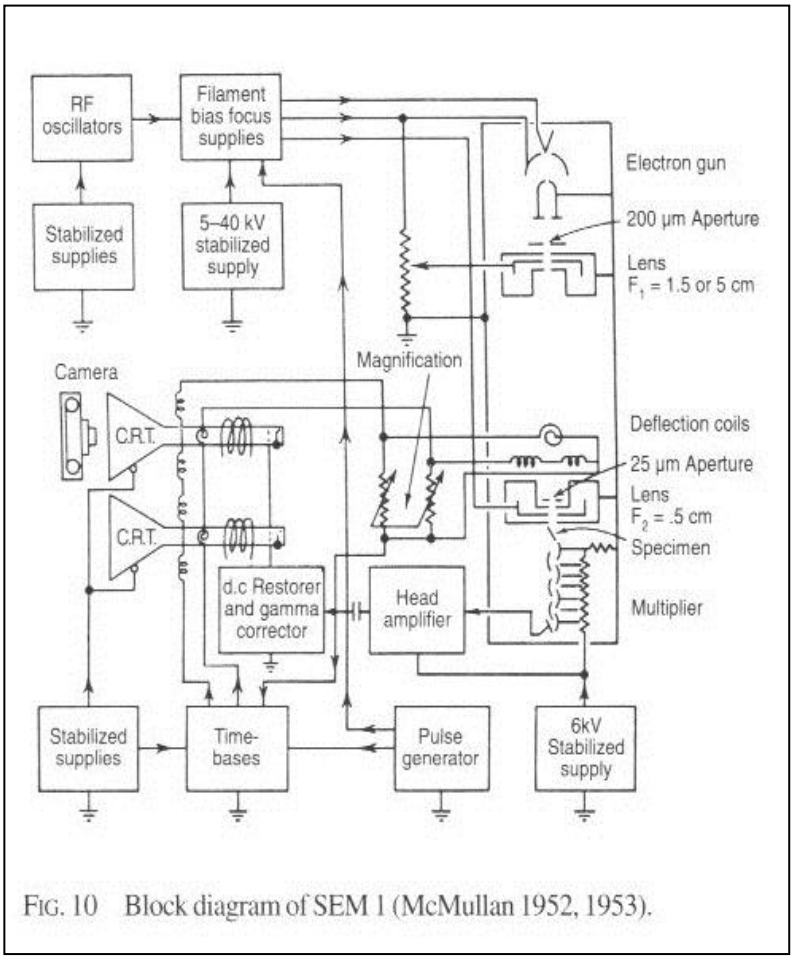


FIG. 10 Block diagram of SEM 1 (McMullan 1952, 1953).

شكل (17)

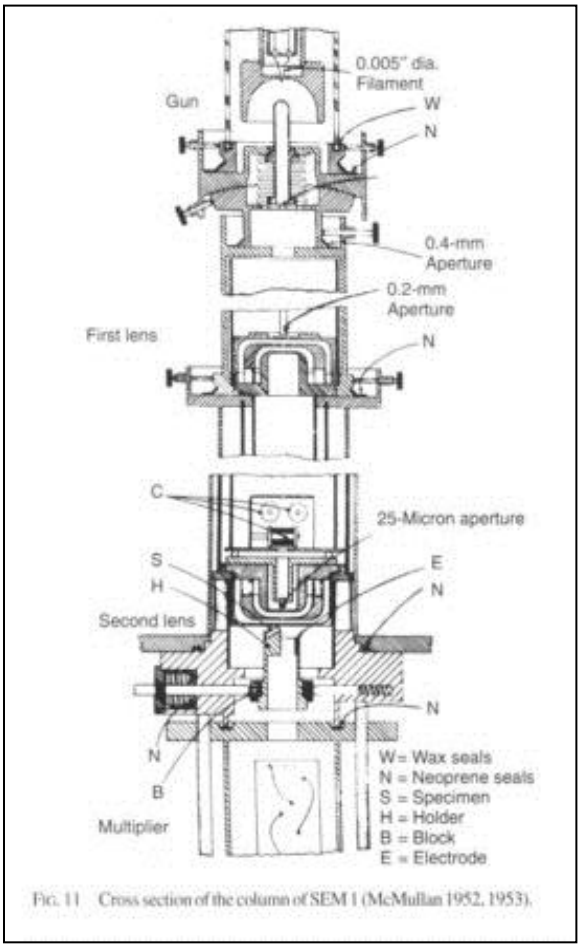


FIG. 11 Cross section of the column of SEM 1 (McMullan 1952, 1953).

شكل (18)

أدركت أن هناك ميزة أخرى في استخدام حزمة مسح ضوئي عالية الطاقة: كان ذلك من حيث المبدأ أن تباين الأرقام الذرية كان ممكنًا باستخدام الإلكترونات المبعثرة .قام بالو (1947) مؤخرًا بنشر منحنى تجريبي لنسبة الانبعاثات (للأعداد الأولية 20 كيلوفولت) مقابل العدد الذري ، ولكن فشلت محاولة الحصول على تباين الرقم الذري ؛ بعد بضع سنوات كان ويلز (1957) أكثر نجاحًا .كان العيب الواضح للطاقات ذات الشعاع العالي هو أن الدقة كانت محدودة باختراق الإلكترونات الأولية واقترحت تصوير إلكترون منخفض الخسارة لتقليل ذلك ، لكن لم يكن باستطاعته تنفيذه .إحدى آليات التباين الأخرى التي

جربتها كانت تلألؤ الكاثود وتمكنت من إظهار أن الفوسفور الذي كان له ثبات طويل للغاية بحيث لا يمكن استخدامه لإنتاج 1.

(الشكل 19)هو صورة لـ SEM تم التقاطها في عام 1953 قبل فترة قصيرة من تولي KCA Smith المسؤولية عنها وتحويل هذه الأداة الأولى إلى SEM التي يمكن أن تنتج صورًا مماثلة لصور المجاهر الحديثة .لقد أدخل تحسينات بما في ذلك جهاز الوصم ومرحلة العينة المائلة ، وزاد من كفاءة نظام الكشف عن طريق تحريك مضاعف الإلكترون بالقرب من العينة بحيث يمكن جمع الإلكترونات الثانوية منخفضة الطاقة ، وبالتالي زيادة تيار الإشارة .كما أظهر أنه يمكن تصوير العينات العازلة الممعدنة ، وقد فحص مجموعة كبيرة من العينات بما في ذلك التحلل الحراري لأزيد من الفضة ومعدلات التلامس بنقاط الجرمانيوم وجراثيم الفطر في بخار الماء في خلية بيئية

. (Smith 1956 ، Smith Oatley 1955)

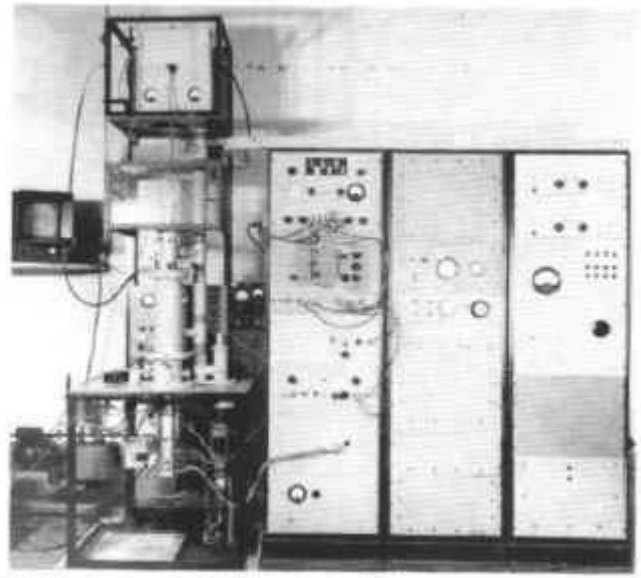


Fig. 12 Photograph of SEM 1 taken in 1953.

شكل (19)

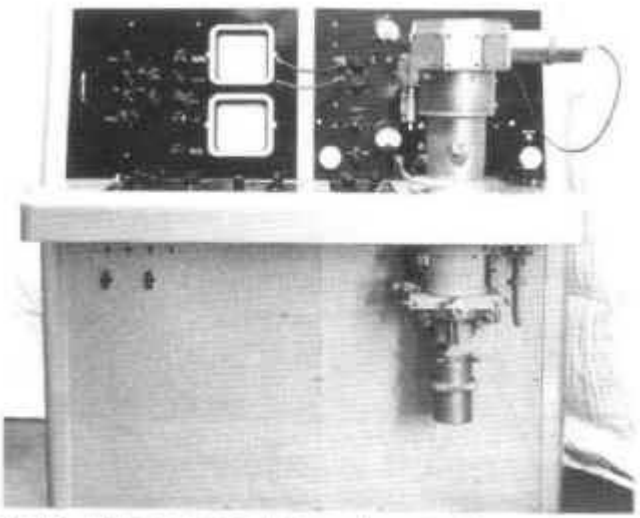


Fig. 13 The first magnetically focussed scanning electron microscope (SEM 3) built by K.C.A. Smith for the Pulp and Paper Research Institute of Canada (Smith 1959, 1961).

شكل 20)

كان مضاعف الإلكترون جهازًا ضخمًا ، وفي عام 1956 ، اقترح أتلي أن جهاز التلألؤ البلاستيكي ذو فترة زمنية قصيرة من التحلل بالإضافة إلى المضاعف الضوئي قد يكون جديراً بالتحقيق .استخدم سميث هذا المزيج أولاً للكشف عن الإلكترونات المتناثرة ذات الطاقة العالية ثم طورها لاحقًا اثنان من طلاب Oatley، هما Everhart و Thornley ، ليصبحا كاشفًا ثانويًا للإلكترون يحمل اسمه

. (Everhart and Thornley 1960)

تم إنشاء SEMs إضافية في قسم الهندسة SEM 2 (Wells 1957) :و SEM 3 (Smith 1961) و SEM 4 (Stewart 1962)و SEM 5 (Pease and Nixon 1965). استخدمت جميعها على مجموعة واسعة من العينات ، ولتطوير تقنيات جديدة .من التطورات المهمة الأخرى التي حققتها مجموعة Oatley خلال الفترة المتبقية من الخمسينيات وحتى عام 1965 ما يلي: تباين الرقم الذري (Wells 1957)؛ التنظير المجسم (آبار 1960) ؛ تباين الجهد Oatley) و (Everhart 1957 ؛ الجهد المنخفض (1 كيلو فولت) ووزارة شؤون المرأة (ثورنلي 1961) ؛ التصوير بدرجة حرارة عالية (1200 درجة مئوية) للكاثودات الحرارية في نظام) SEM أحمد 1962) ؛ عالية الدقة (10 نانومتر SEM (Pease و (Nixon 1965) حفر الأسطح في SEM عن طريق القصف الأيوني (ستيوارت 1962) ؛ النقش الأيوني والتصنيع الدقيق في (SEM (Broers 1965 الإلكترونيات الدقيقة في) SEM تشانغ ونيكسون 1956 .(بالإضافة إلى ذلك ، تم عرض التصوير EBIC لأول مرة بواسطة (Wells et al. (1963 ، ولكن ليس في كامبريدج .تم وصف معظم هذا العمل في أوراق كتبها Oatley (1982) Oatley et al. (1965) ، (1985)

أكمل سميث) 3 SEM شكل 13) في عام 1958 ؛ كان هذا هو أول SEM يركز مغناطيسيا سميث (1959، 1961). يتكون الجزء السفلي من العمود أسفل الجدول من نوع مطور متروبوليتان فيكرز لاحقًا ((AEI من نوع) EM4 TEM صفحة 1954) ويحتوي على مسدس الإلكترون وعدسة المكثف ومرحلة عينة الإرسال والعدسة الموضوعية وعدسة جهاز الإسقاط مزدوجة القطب .من أجل تشغيل المسح الضوئي ، تم استخدام هدف الإرسال وجهاز العرض المزدوج معًا في مجموعات مختلفة وقدرات وفقًا لقطر التركيز المطلوب لتوفير المرحلة الأولى من إزالة البقعة .مباشرة فوق الطاولة ، كان هناك قسم من العمود يحتوي على ملفات المسح الضوئي والعدسة الموضوعية التي كانت من نوع ثقب الدبوس (Liebmann 1955) مع ثلاث فتحات قابلة للتعديل.

تم تكليف شركة3 SEM ، التي كانت أول شركة SEM مصممة بالكامل ، بتكليف من Thiesmayer و Atack من المعهد الكندي لبحوث الورق والورق ، وتم استخدامه لفحص ألياف الخشب في مختبراتهما في أوتاوا: كان هذا أول استخدام صناعي لـ SEM على أساس يومي .كانوا من بين القلائل الذين رأوا في ذلك الوقت الإمكانات الكبيرة لـ SEM Atack و (Smith 1956)على الرغم من أن مجموعة Oatley قد أنتجت ونشرت صورًا مجهرية عالية الجودة ، من العديد من العينات المختلفة ، لا تزال هناك مقاومة كبيرة لـ .SEM على مدى عدة سنوات ، بذل Oatley الكثير من الجهد في محاولة إقناع مصنعي مجهر الإلكترون بتسويق SEM (Jervis 1971, Oatley 1982) لكنه لم ينجح أخيرًا

إلا في عام 1962 عندما قررت شركة Cambridge Instrument Company المضي قدمًا في إنتاج " ذهب النموذج الأولي إلى شركة دوبونت للكيماويات في الولايات المتحدة الأمريكية في عام 1964 ، وفي العام التالي ، تم بيع أول طرازين لإنتاج إلى ثورنتون في جامعة شمال ويلز وإلى سيكورسكي بجامعة ليدز في المملكة المتحدة ، والثالثة لفيفركورن في مونستر. جامعة في ألمانيا .قامت الشركة اليابانية JEOL بتسويق JSM-1 SEM بعد حوالي 6 أشهر .ذهب النموذج الأولي إلى شركة دوبونت للكيماويات في الولايات المتحدة الأمريكية في عام 1964 ، وفي العام التالي ، تم بيع أول طرازين لإنتاج إلى ثورنتون في جامعة شمال ويلز وإلى سيكورسكي بجامعة ليدز في المملكة المتحدة ، والثالثة لفيفركورن في مونستر. جامعة في ألمانيا .قامت الشركة اليابانية JEOL بتسويق JSM-1 SEMبعد حوالي 6 أشهر

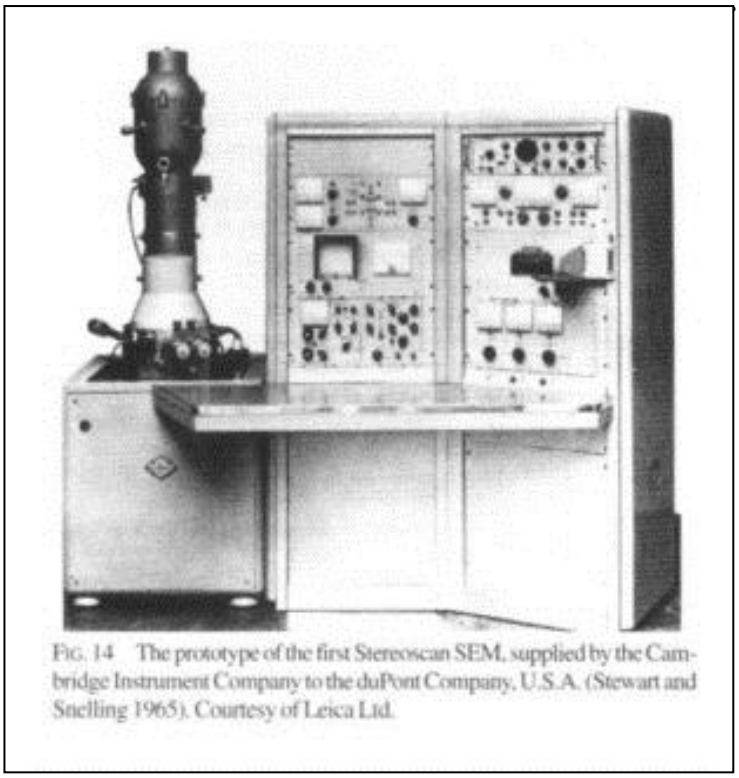


FIG. 14 The prototype of the first Stereoscan SEM, supplied by the Cambridge Instrument Company to the duPont Company, U.S.A. (Stewart and Snelling 1965). Courtesy of Leica Ltd.

شكل (21)

2.4.10. مسبار الأشعة السينية الكترون مسبار

على الرغم من كونه هامشيًا لموضوع هذه البحث، إلا أن الأحداث البارزة في تطوير المجهر الصغير للأشعة السينية مسبار الإلكترون سيتم تلخيصها بإيجاز .تم اقتراحه من قِبل هيلير في عام 1947 ، تم تطوير أداة تحقيق ثابتة بواسطة Castaing و Guinier في باريس في عام 1949 وتسويقها من قبل الشركة الفرنسية Cameca في عام 1956 Cosslett .في مختبر Cavendish في كامبريدج بدأ برنامج بحثي في عام 1953 والذي أدى بعد ذلك بعامين إلى أداة تحليل مجهرية تم إنشاؤها بواسطة Duncumb (Cosslett and Duncumb 1956).تم تطوير هذا الأمر بشكل أكبر في مختبرات

Tube Investments Researchبالقرب من كامبريدج Duncumb) و (1960 Melford وتم تسويقه كـ "Microscan" بواسطة شركة Cambridge Instrument في عام 1960. في الولايات المتحدة الأمريكية ، تم تطويره بواسطة بيركس آند بروكس (1957) في الولايات المتحدة الأمريكية .كانت الشركات في العديد من البلدان تقوم بتسويق أدوات تحليل دقيقة بحلول عام 1965 ؛ كانت أحجام مسبار عموما حوالي 1 ميكرون والتصوير الإلكترون كان فقط مساعد .بعد مرور بضع سنوات ، تم تجهيز SEMs بمطياف ديود السيليكون المشتت حديثًا في مجال الطاقة ، وأصبح التحليل الدقيق للأشعة السينية في عينات SEM روتينًا الآن.

2.4.11. تحضير العينةTissue Processing

لمشاهده العينه تحت المجهر الالكتروني الماسح لابد من اجراء المعاملات التاليه:

1. قمنا بعمل طرد مركزي للبيئه البكتيريه لمده 5 دقائق.
2. نتخلص من الرائق ونضع Buffer phosphate (PH=7.2) للمحافظه على اسموزيه الخلايا البكتيريه.
3. نعمل طرد مركزي للتخلص من المحلول المنظم.
4. نقوم بعملية التثبيت Fixation ويتم باستخدام Bufferd Glutraaldhyd 2 %لمده ساعه وله اهميه في تثبيت الجليكوجين والبروتين في الخلايا وهذه الخطوه هي ماتعرف بالتثبيت الاولي، ثم نعمل طرد مركزي للتخلص من السائل.
5. ثم نقوم بعمليه التثبيت الثانوي ويتم باستخدام Bufferd Osmic acid 1%لمده نصف ساعه ولها اهميه في تثبيت الماده الدهنيه في الخلايا وتستخدم كصبغه اوليه وتساعد على زياده عمليه التوصيل الكهربائي بين العينه وشعاع الحزم الالكترونيه ممايؤدي الى زياده التباين، ثم نقوم بعمليه الطرد المركزي للتخلص من السائل.
6. ثم نضيف المحلول المنظم ونضعها في الثلاجه (وضعت في الثلاجه فقط لحفظها لليوم التالي لاكمال خطوات التجفيف)
7. .نقوم بعمليه التجفيف فنعمل طرد مركزي للتخلص من المحلول المنظم ثم نبداء باضافه الكحول من التركيز 30% وتترك 10 دقائق ثم نعمل طرد مركزي ونتخلص من الكحول ثم نضيف تركيز 50% ونتركها 10 دقائق ثم نعمل طرد مركزي ونتخلص من الكحول ثم نضيف تركيز 70% ونتركها 10 دقائق ثم نعمل طرد مركزي ونتخلص من الكحول ثم نضيف 90% ونتركها 10 دقائق ثم نعمل طرد مركزي ونتخلص من الكحول ثم نضيف 95% ونتركها 10 دقائق ثم نعمل طرد مركزي ثم نضيف 100% ونتركها 10 دقائق ونعيد تركيز100 مره اخرى.
8. قمنا بسحب الخلايا والكحول بمحقنه ثم قمنا يتمريرها من خلال مرشح يحتوي على ورقه ملي بور صغيره وهي السطح التي تحتوي على الخلايا البكتيريه ثم نظعها في طبق بتري حتى تجف من الكحول.
9. نقوم بتحميل الخلايا على حوامل العينات وذالك بالصق بشريط لاصق مزدوج الوجه فيلتصق الورقه من الجهه السفليه بالحامل وتقص الزوائد من ورقه الترشيح بواسطه المقص وتوضع في

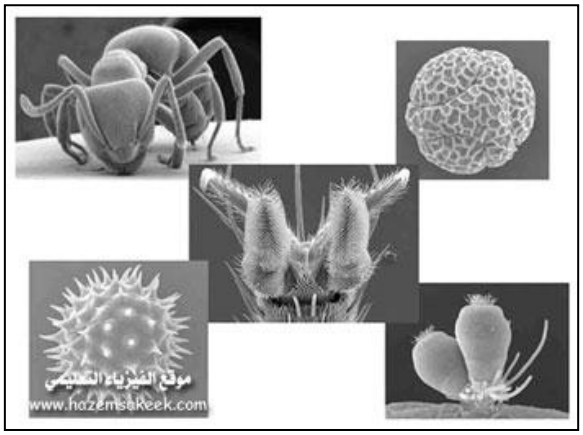
غرفه التبخير بالتفريغ حيث يتم تبخير العينه باحد المعادن وتطلى بطبقه من الذهب او البلاتين وتتراوح سمكها من 10-30 نانوميتر.

ثم توضع العينات في المكان المخصص لها ويتم فحصها تحت المجهر.

(شكل 22)جزء من قطاع في صورة مجهريه يبين مكونات الخلايا والأنسجة

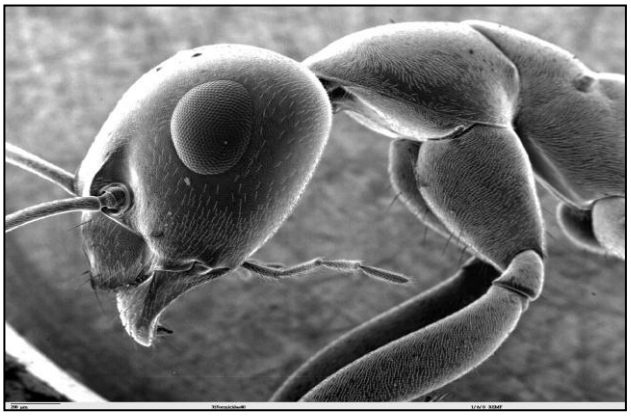
2.4.12. تشغيل المجهر الالكتروني الماسح SEM

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 من العينة من ان تصاب بالضرر أثناء الفحص بواسطة الشعاع الالكتروني الموجه عليها.



شكل 23

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.



شكل (24) صورة لنملة

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 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.

2.5. المجهر الالكتروني النافذ- الماسح Scanning -Transmission Electron microscope(STEM)

هو نوع من المجاهر الإلكترونية النافذة TEM حيث يتخلل الشعاع الإلكتروني العينة التي لا بد وأن تكون رقيقة جدا. ويختلف المجهر الإلكتروني النافذ الماسح عن المجهر الإلكتروني النافذ المعتاد TEM في أنه يركز فيض الإلكترونات على بقعة صغيرة من العينة ويصورها ثم ينتقل إلى بقعة أخرى حتى يصور جميع البقع المشكلة للعينة. تعود التسمية "نافذ " إلى أن المجهر يرى داخل العينة حيث يمر الشعاع الإلكتروني خلالها، لذلك يجب أن يكون سمك العينة قليل. وتعود التسمية "ماسح " إلى أن المجهر يلتقط صورة بقعة صغيرة من العينة، قم ينتقل إلى باقي النقط الأخرى ويقوم بتصويرها نقطة تلو نقطة. بذلك فلا يوجد في المجهر صورة كاملة للعينة. ولكن يقوم حاسوب بتجميع النقط التي قام المجهر بتصويرها ويرتبها فتظهر الصورة كاملة على شاشة الحاسوب.

3. الحفاظ على المجهر

- لا تلمس العدسات بأصابعك حتى لا تعلوها سحابة تمنع وضوح الرؤية. وإذا اتسخت امسحها برفق بالورق الخاص بتنظيف العدسات.
- لا تترك الشريحة على المسرح بعد الانتهاء من فحصها.
- امسح الزيت من على العدسة الزيتية بعد الاستعمال بواسطة الورق الخاص بتنظيف العدسات، إذا جف الزيت استخدمي الورق المبلل قليلا بالزيلول، مع مراعاة عدم الإكثار منه لأنه قد يتسبب بإذابة المواد اللاصقة للعدسات.
- يجب الاحتفاظ بالمسرح نظيفا وجافا على الدوام.
- احمل المجهر بعناية عند نقله من مكان لآخر، ضع إحدى يديك أسفل القاعدة وباليد الأخرى امسك ذراع المجهر.
- عند عدم استعمال المجهر، احتفظ به مغطى.
- طريقة فحص الغشاء باستعمال العدسة الزيتية:

1-توضع الشريحة على مسرح الميكروسكوب.

2- يضبط الضوء بالاستعانة بالعدسة الشيئية الصغرى والمكثف حتى يشاهد المجال الميكروسكوبي ومنطقة الغشاء مضاء إضاءة عالية ومتجانسة.

3-توضع نقطة زيت سيدر oilعلى الغشاء ثم تحرك القطعة الأنفية لوضع العدسة الزيتية في وضع الاستعمال ويدار الضابط الكبير حتى تنغمس العدسة في نقطة الزيت وتلامس سطح الشريحة ، يجب أن لا يدار الضابط بسرعة حتى لا تنكسر الشريحة . ونقوم بهذه الخطوة ونحن نراقب الشريحة والعدسة الزيتية من الخارج.

4-ننظر من خلال العدسة العينية ونحرك الضابط الدقيق لرفع أنبوبة الميكروسكوب إلى أعلى حتى نرى الخلايا البكتيرية بوضوح.

4. مصادر

1. McMullan, D. (2006). "Scanning electron microscopy 1928–1965". Scanning. 17 (3): 175–185. PMC 2496789Freely accessible. doi:10.1002/sca.4950170309.
2. McMullan, D. (1988). "Von Ardenne and the scanning electron microscope". Proc Roy Microsc Soc. 23: 283–288.
3. Knoll، Max (1935). "Aufladepotentiel und Sekundäremission elektronenbestrahlter Körper". Zeitschrift für technische Physik. 16: 467–475.
4. von Ardenne M. Improvements in electron microscopes. GB 511204, convention date (Germany) 18 February 1937
5. von Ardenne، Manfred (1938). "Das Elektronen-Rastermikroskop. Theoretische Grundlagen". Zeitschrift für Physik (باللغة الألمانية). 109 (9–10): 553–572. Bibcode:1938ZPhy..109..553V. doi:10.1007/BF01341584.
6. von Ardenne، Manfred (1938). "Das Elektronen-Rastermikroskop. Praktische Ausführung". Zeitschrift für technische Physik (باللغة الألمانية). 19: 407–416.
7. Zworykin VA, Hillier J, Snyder RL (1942) A scanning electron microscope. ASTM Bull 117, 15–23.
8. McMullan, D. (1953). "An improved scanning electron microscope for opaque specimens". Proceedings of the IEE – Part II: Power Engineering. 100 (75): 245–256. doi:10.1049/pi-2.1953.0095.
9. Oatley CW, Nixon WC, Pease RFW (1965) Scanning electron microscopy. Adv Electronics Electron Phys 21, 181–247.
10. Smith KCA, Oatley, CW (1955). "The scanning electron microscope and its fields of application". British Journal of Applied Physics. 6 (11): 391–399. Bibcode:1955BJAP....6..391S. doi:10.1088/0508-3443/6/11/304.
11. Stokes, Debbie J. (2008). Principles and Practice of Variable Pressure Environmental Scanning Electron Microscopy (VP-ESEM). Chichester: John Wiley & Sons. ISBN 978-0470758748.
12. McMullan, D. (2006). "Scanning electron microscopy 1928–1965". Scanning. 17 (3): 175–185. doi:10.1002/sca.4950170309. PMC 2496789.
13. McMullan, D. (1988). "Von Ardenne and the scanning electron microscope". Proc Roy Microsc Soc. 23: 283–288.

14. Knoll, Max (1935). "Aufladepotentiel und Sekundäremission elektronenbestrahlter Körper". Zeitschrift für Technische Physik. 16: 467–475.
15. von Ardenne M. Improvements in electron microscopes. GB 511204, convention date (Germany) 18 February 1937
16. von Ardenne, Manfred (1938). "Das Elektronen-Rastermikroskop. Theoretische Grundlagen". Zeitschrift für Physik (in German). 109 (9–10): 553–572. Bibcode:1938ZPhy..109..553V. doi:10.1007/BF01341584.
17. von Ardenne, Manfred (1938). "Das Elektronen-Rastermikroskop. Praktische Ausführung". Zeitschrift für Technische Physik (in German). 19: 407–416.
18. Zworykin VA, Hillier J, Snyder RL (1942) A scanning electron microscope. ASTM Bull 117, 15–23.
19. McMullan, D. (1953). "An improved scanning electron microscope for opaque specimens". Proceedings of the IEE – Part II: Power Engineering. 100 (75): 245–256. doi:10.1049/pi-2.1953.0095.
20. Oatley CW, Nixon WC, Pease RFW (1965) Scanning electron microscopy. Adv Electronics Electron Phys 21, 181–247.
21. Smith KCA, Oatley, CW (1955). "The scanning electron microscope and its fields of application". British Journal of Applied Physics. 6 (11): 391–399. Bibcode:1955BJAP....6..391S. doi:10.1088/0508-3443/6/11/304.
22. Wells OC (1957) The construction of a scanning electron microscope and its application to the study of fibres. PhD Dissertation, Cambridge University.
23. Suzuki, E. (2002). "High-resolution scanning electron microscopy of immunogold-labelled cells by the use of thin plasma coating of osmium". Journal of Microscopy. 208 (3): 153–157. doi:10.1046/j.1365-2818.2002.01082.x.
24. Seligman, Arnold M.; Wasserkrug, Hannah L.; Hanker, Jacob S. (1966). "A new staining method for enhancing contrast of lipid-containing membranes and droplets in osmium tetroxide-fixed tissue with osmiophilic thiocarbohydrazide (TCH)". Journal of Cell Biology. 30 (2): 424–432. doi:10.1083/jcb.30.2.424. PMC 2106998. PMID 4165523.

25. Malick, Linda E.; Wilson, Richard B.; Stetson, David (1975). "Modified Thiocarbohydrazide Procedure for Scanning Electron Microscopy: Routine use for Normal, Pathological, or Experimental Tissues". Biotechnic & Histochemistry. 50 (4): 265–269. doi:10.3109/10520297509117069.

26. Hortolà, Policarp (2005). "SEM Examination of Human Erythrocytes in Uncoated Bloodstains on Stone: Use of Conventional as Environmental-like SEM in a Soft Biological Tissue (and Hard Inorganic Material)". Journal of Microscopy. 218 (2): 94–103. doi:10.1111/j.1365-2818.2005.01477.x. PMID 15857371.

27. Conrad, Cyler; Jones, Emily Lena; Newsome, Seth D.; Schwartz, Douglas W. (2016). "Bone isotopes, eggshell and turkey husbandry at Arroyo Hondo Pueblo". Journal of Archaeological Science: Reports. 10: 566–574. doi:10.1016/j.jasrep.2016.06.016