

走査型 電子顯微鏡の 應用分野

金 龍 洛

(大韓結核協會 結核研究院 檢査科)

Applications of the Scanning Electron Microscope

Kim Yong Nak

Laboratory Service Section, Department of Bacteriology, The Korean Institute of
Tuberculosis, Korean National Tuberculosis Association, Seoul, Korea.

1971. 9. 5 接受

Abstract

There are many kinds of microscopes suitable for general studies; optical microscopes(OM), conventional transmission electron microscopes(TEM), and scanning electron microscopes(SEM). The optical microscopes and the conventional transmission electron microscopes are very familiar. The images of these microscopes are directly formed on an image plane with one or more image forming lenses.

On the other hand, the image of the scanning electron microscope is formed on a fluorescent screen of a cathode ray tube using a scanning system similar to television technique.

In this paper, the features and some applications of the scanning electron microscope will be discussed briefly.

The recently available scanning electron microscope, combining a resolution of about 200Å with great depth of field, is favorable when compared to the replica technique. It avoids the problem of specimen damage and the introduction of artifacts. In addition, it permits the examination of many samples that can not be replicated, and provides a broader range of information. The scanning electron microscope has found application in diverse fields of study including biology, chemistry, materials science, semiconductor technology, and many others.

In scanning electron microscopy, the secondary electron method, the backscattered electron method, and the electromotive force method are most widely used, and the transmitted electron method will become more useful. Change-over of magnification can be easily done by controlling the scanning width of the electron probe. It is possible to continuously vary the magnification over the range from 100 times to 100,000 times without readjustment of focusing.

Conclusion: With the development of a scanning electron microscope, it is now possible to observe almost all information produced through interactions between substances and electrons in the form of image. When the probe is properly focused on the specimen, changing magnification of specimen orientation does not require any change in focus. This is quite different from the conventional transmission electron microscope. It is worthwhile to note that the typical probe currents of 10^{-10} to 10^{-12} Å are far below the 10^{-5} to 10^{-7} Å of a conventional transmission microscope. This reduces specimen contamination and specimen damage due to heatings.

Outstanding features of the scanning electron microscope include the "stereoscopic observation"

of a bulky or fiber specimen in high resolution" and "observation of potential distribution and electromotive force in semiconductor devices".

1. 緒論

微生物界를 觀察하는 手段으로 從來의 光學顯微鏡과 電子顯微鏡이 널리 實用되고 있으나 最近 脚光을 받으며 登場케된 走查型 電子顯微鏡도 亦是 微細한 物體를 擴大하여 觀察할 수 있는 裝置이다. (Fig. 1) 光學顯微鏡과 렌즈結像型 電子顯微鏡은 이미 널리 利用되고 있고 그 原理 및 使用法도 잘 알려져 있다.

光學顯微鏡과 렌즈結像型 電子顯微鏡은 몇개의 結像 렌즈에 依해 像平面上에 直接像을 맺는 것이 特徵이다. 그러나 이에 對하여 走查型 電子顯微鏡은 텔레비죤(T.V.)과 같이 走查技術을 應用 Braun 管의 螢光面上에 像을 맺게 된다. 이에 編者는 最近 實用化되고 있는 走查型 電子顯微鏡에 關해 그 原理 特徵 및 그 應用 分野에 對해 簡單히 紹介하고자 한다. 走查型 電子顯微鏡의 原理는 乍ら 簡單하게 이미 40년전에 發表되었으나 當時의 走查型 顯微鏡은 그 分解能이 通常의 렌즈結像型 電子顯微鏡에 比해 越等히 뒤떨어져서 實用化되지 못하였다.

그러나 近年에 이르러 電子理論學 및 電子工學의 發達에 따라 走查型 電子顯微鏡의 開發가 急速하게 發展 現在 그 分解能이 100\AA 에 到達하고 있다.

走查型 電子顯微鏡은 焦點 深度가 크고 分解能이 높으며 試料準備가 簡單하여 그 應用分解가 날로 廣範해 가고 또한 많은 優秀한 特徵을 가지고 있다.

2. 原理

試料로부터 情報를 얻기 為한 方法의 概略은 Fig. 1에 表示되어 있다. 電子 Probe試料에 照射시키면 2次電子, 反射電子, 吸收電子, 陰極發光(Cathodoluminescence), 및 X-線等을 通한 各種 情報를 얻을 수 있다. 또한 極히 簡單한 試料를 使用하면 透過電子에 依해 試料 觀察도 可能하고 半導體 및 集積回路의 研究에는 内部 起電力法이 主로 使用되고 있으나 透過電子法도 實用段階에 들어가고 있다.

走查電子顯微鏡은 本體, 操作一表示裝置 및 電源裝置로 이루어져 있다.

이 裝置의 簡單한 Block Diagram은 Fig. 2에 表示되어 있다.

電子銃의 filament에서 放射된 電子線은 5KV에서 50KV의 加速電壓으로 加速되고 集中렌즈(Condenser lens)와 對物レンズ(Objective lens)로 이루어진 2段レンズ에 依해 試料表面上에 細微하게 죄여(絞)진다.

微細하게 죄여진 電子 Probe는 2段의 走查 Coil에 依해 T.V의 raster와 같이 試料 表面上을 走查한다.

電子 Probe의 照射에 依해 試料表面에서 2次電子 또는 反射電子가 放射된다.

이 放射되는 電子의 量은 試料의 形狀 또는 物理的, 化學的 性質에 따라 取る다. 電子檢出器는 이들의 電子를 받아 그 量의 變化를 電氣 信號로 變換시킨다. 이 變換된 信號로 Broun 管의 光線의 輝度를 變調하는 것으로 試料 表面의 像이 얻어진다. 이때에 Broun 管의 Beam은 電子 Probe의 走查와 同期에 走查하게 된다.

像의 倍率은 電子 Probe의 走查 振幅을 制御하는 것으로 簡單히 바꿀수가 있다. 또한 一旦 焦點을 맞추면 100倍에서 100,000倍까지 連續的으로 倍率을 맞춰도 像이 흐려지는 일이 없다.

2次電子 檢出器의 構成은 Fig. 3에 表示된 바와 같이 2次電子를 위한 集束 focussing 電極 또한 Energy에 依한 2次電子와 反射電子를 區別하고 2次電子를 効率의으로 集束할수 있도록 設計된 Slit로 形成되어 있다.

2次電子의 集束効率은 4個의 集束電極에 주어진 電位를 바꿈에 따라서 制御된다. 集束된 2次電子는 光電子 增倍管에 接續되어 있는 light-pipe 上의 Scintillator를 勵起시키기 為해 10KV를 加速케 된다.

反射電子 檢出器로서 한쌍의 Silicon p-n接合, 또는 2次電子用과 같은 閃光(Scintillation)檢出器의 어느것이나 使用할 수 있으나 本實驗에서는 2次電子 反應電子에 對해서 共通의 Scintillation 檢出器를 使用하고 있다.

3. 特徵

走查電子顯微鏡은 主로 다음과 같은 特徵을 가지고 있다.

(1) 부피가 큰 Bulk 狀 試料表面을 直接 觀察할 수 있으므로 試料表面의 replica를 뜯는가 試料를 薄片으로 削는必要가 없이 試料準備가 極히 簡便하다.

(2) 走查電子顯微鏡은 極히 큰 焦點深度를 가지고 있다. 이를테면 1000倍인 景遇 試料上의 焦點深度는 35μ 을 超過한다. 따라서 凹凸이 甚한 試料를 立體의으로 觀察할 수가 있다.

(3) 走查電子顯微鏡의 分解能은 光學顯微鏡의 分解能보다 훨씬 優秀하다. 더욱이 走查電子顯微鏡은 試料를 直接 觀察할 수 있으므로 그 分解能은 렌즈에

스结像型 電子顯微鏡을 使用하여 replica 法에 依해 試料를 觀察했을 境遇의 實效 分解能에 匹敵한다.

(4) 試料表面上의 電位分布를 2次電子像으로부터 認知할 수가 있다. 이때 0.5V의 電位差를 識別할 수가 있다.

(5) P-N 接合 部分에서의 內部 起電力像을 能動 狀態로 研究할 수가 있다.

끝으로 4,5,項의 特徵을 利用하여 試料局部의 電氣的, 物理的 性質을 研究할 수가 있다.

現在一般的으로 電子顯微鏡이라 부르는 것은 透過型 電子顯微鏡으로서 分解能은 數 A°程度까지 얻을 수 있고 走查型 電子顯微鏡으로는 分解能이 100A°나 이 透過型電子顯微鏡에서는 試料를 透過한 電子線에 따라 像을 形成하기 때문에 試料는 極히 薄은 것이 아니면 안된다. 또한 薄片으로 만들 수 없는 試料等에 對해서는 表面의 replica를 떠서 이를 試料代身 觀察하지 않으면 안된다. 이와 같이 試料의 準備는 相當히 複雜할 때가 많고 더우기 replica 法을 利用할 때는 應當 試料의 凹凸을 觀察하게 되는데 特히 凹凸이 基한 것은 replica 를 뜯을 수 없을 뿐 아니라 그 狀態가 實際의 試料 表面과 틀리게 떠지는 경우도 일어날 수 있다. 이에 反해 走查型 電子顯微鏡에서는 試料를 直接 觀察할 수가 있고 薄片으로 만들거나 또는 replica 를 뜯 필요도 없이 簡單히 觀察할 수가 있다. 미리 試料에 對해 準備할 것은 電氣的 不良導體에 對한 導電性 物質을 coating 하는 程度이고 점차 이런 處理도 不必要的 경우가 많아지고 있다.

試料 表面의 幾何學的 形狀을 直接 觀察할 때는 그 顯微鏡의 焦點深度가 問題가 된다. 一般 光學顯微鏡을 使用하여, 試料를 直接 觀察할 수가 있으나 그 倍率은 1,000倍 程度가 그 實用限界이고 그 分解能은 數千A° 程度가 限界이다.

凹凸이 있는 試料를 焦點depth가 薄은 顯微鏡으로 觀察한즉 視野의 一點에만 焦點이 맞을 뿐 全體를 鮮明하게 볼 수는 없다. 또한 이 焦點depth도 높아질수록 着여져서 光學顯微鏡에 있어서는 倍率 100倍일 때 10μ 程度 1000倍일 때는 1μ以下로 된다. 이에 對해 走查型 電子顯微鏡에서는 100倍에서 約 300μ, 1,000倍에서 35μ이고 5,000倍일 때도 1μ程度의 크기로 光學顯微鏡에 比해 數10倍나 優秀하다는 것을 알 수 있다. 이와 같이 走查型電子顯微鏡에 있어서는 焦點depth가 깊기 때문에 立體的인 試料의 觀察이 可能하게 된다.

走查型 電子顯微鏡으로 觀察되는 試料像是 上述 것과 같이 表面의 幾何學的인 形狀外에도 表面의 化學的 性質의 差를 나타낼 수도 있다. 즉 試料에서 放

射되는 電子線의 量은 試料를 構成하는 物質에 따라 差異가 生기며 따라서 像의 Contrast는 그 相違點을 나타내게 된다. 또한 試料表面에서 放射되는 電子中 2次電子라고 부르는 Energy가 낮은 電子에 依한 信號는 試料表面의 僅少한 電位差에 따라서도 그 放出率이 틀리기 때문에 表面에 電位分布를 가질 수 있는 試料에 있어서는 그 分布狀態도 調査할 수가 있다. 이 特徵은 最近小型化 되어가는 電氣部分品 特히 transistor 또는 集積回路等의 檢查, 研究에 最適한 裝置로서 注目되고 있다.

4. 像의 質

走射型 電子顯微鏡의 像의 質은 分解能, 焦點深度 照明效果, Contrast 및 S/N比(Signal to noise ratio) 等의 諸要素에 따라 左右된다.

(1) 分解能

2次電子像의 1例로서 Fig 3에 表示되어 있는 것은 酸化亞鉛의 試料像이다.

分解能은 200Å보다도 優秀하다.

入射電子 Probe의 Energy는 25KV로 照射電流強度는 10-11Å 程度로 觀察된 것이다.

以下の 實驗은 全部 上述한바와 같은 電子 Probe 條件에서 行해진 것이다.

2次電子像과 反射電子像의 分解能을 比較한 試料로서 比較한 것이 Fig. 4-a 및 Fig 4-b로 試料는 18Mn-Cr 鋼의 破斷面이다. 一般的으로 2次電子像의 分解能은 反射電子像보다도 優秀하다. 그 分解能의 差는 2次電子와 反射電子의 發生源의 큰 差에 依해서인데 이것은 反射電子가 2次電子보다 輝선 큰 Energy를 갖고 試料內部로 깊이 擴散하여 發生되기 때문이다. 電子 Probe直徑이 200Å일 境遇 2次電子像의 分解能은 Probe直徑에만 依存하게 된다. 이에 對해 反射電子像에서는 加速電壓과 試料의 性質에 依存한다. 이는 入射電子 Probe의 擴散이 이들에 依해 定해지기 때문이다.

(2) 焦點深度

焦點depth가 크다는 것이 이 裝置의 重要한 特徵의 하나인 것은 上述한바와 같다. 走查型電子顯微鏡과 光學顯微鏡의 焦點depth를 比較한 것이 Fig. 5-a-b로서 試料는 3種類의 mesh를 重ね서 觀察한 것이다. 焦點depth는 對物렌즈의 開口角에 따라 定해지므로 開口이 큰 光學顯微鏡에서는 焦點深가 極히 着여진다. Bulk 狀試料를 直接 觀察할 수 있는 走查型電子顯微鏡에서는 그 特徵은 3次元의in 넓이를 가진 試料의 觀察에 効果의으로 利用된다. Figs. 5 a-b의 3개의 mesh

試料의 두께는 約 90μ 이다.

走査型電子顯微鏡에서는 倍率 560倍의 像에서도 3枚의 mesh의 鮮明한 像을 맷게되나 光學顯微鏡에서 上段의 mesh의 1部分 밖에는 焦點이 맞지 않고 있다.

(3) 照明效果

Figs. 6. a-b는 焦點深度의 項에서 表示한 바 Fig. 5와 같은 3枚의 mesh 像이다. 다만 이런 경우 試料는 入射電子 probe에 對해서 45°傾斜되어 있다. 2次電子像에서는 3枚의 mesh 全部가 觀察될 수 있으나 反射電子像에서는 中央의 mesh 가 그늘을 이루어 下段의 mesh는 觀察할 수가 없다. 또한 上段의 mesh의 그림자가 中央의 mesh 上에 뚜렷하게 나타나고 있다. 이 現像을 照明效果라고 부를 수 있다.

上述한 바와 같이 2次電子像은 無影照明의이고 反射電子像은 Spot 照明의이다.

이 照明效果의 差異는 2次電子와 反射電子가 가진 Energy의 差와 이들 電子의 捕捉方法의 差異에 因된다.

反射電子의 Energy는 普通 極히 높아서 試料表面의 電子放射點에서 放射된 反射電子는 모든 方向을 向해 直進한다. 따라서 만일 檢出器를 向한 電子의 軌道中에 障害物이 있으면 障害物의 뒤에 뚜렷한 그림자가 나타나게 된다. 한편 2次電子는 放射點에서 檢出器까지 曲線上을 進行한다. 이는 2次電子의 Energy가 極히 낮기 때문에 集束電極의 正電壓에 따라 檢出器를 끌어 당기기 때문이다. 따라서 2次電子像에는 그림자가(影像) 없고 障害物의 뒤部分과 큰 구멍도 分明하게 觀察할 수가 있다. 上述한 바와 같이 檢出器가 2次電子와 反射電子에 對해서 서로 다른 性格을 가진 光源에 對應하고 電子銃이 肉眼의 位置에 對應한다고 생각하면 쉽게 理解할 수 있다고 본다.

(4) Contrast

2次電子像과 反射電子像是 試料表面의 凹凸에 相應하여 分明한 Contrast를 나타낸다. 이는 試料表面에서 放射되는 2次電子와 反射電子의 放出率이 試料表面과 電子 probe의 入射角에 依해 決定되기 때문이다.

(5) 透過電子法에 依한 觀察

試料에 入射한 電子 probe는 Fig. I에 表示된 바와 같이 試料에 關한 情報를 갖는 몇개의 電子群으로 分別된다.

이 가운데 試料를 透過한 電子는 다시 試料內 物質에 따라 散亂을 받아 넓어진 것과 散亂을 받지 않고 곧장 試料를 빠져나간 것으로 分別된다. 兩者

는 各其 試料內部의 情報를 가지고 있으므로 이들을 檢出하여 增幅하면 Braun 管上에 像을 얻을 수가 있다.

走査電子顯微鏡에 있어서 透過電子法은 다음과 같은 特徵을 갖이고 있다.

① 같은 두께의 試料를 走査型電子顯微鏡과 レンズ結像型電子顯微鏡으로 觀察했을 때 前者와 경우 後者보다도 낮은 加速電壓을 使用할 수가 있고, 또한 그 때 나타난 像도 前者인 경우가 보다 높은 Contrast를 나타낸다. 이는 走査電子顯微鏡에 있어서는 信號가 檢出器 및 增幅器에서 增幅되고 또한 一画面을 그리는 走査時間이 길므로 僅少한 信號에서도 充分히 像을 그려낼 수 있기 때문이다. Contrast가 높아지는 것은一般的으로 加速電壓이 낮은, 즉 散亂吸收의 程度가 커지고 따라서 散亂吸收에 依한 Contrast도 높아지는 것, 信號가 增幅되는 것 그리고 增幅過程에서 信號의 直流 level을 制御할 수 있기 때문이다.

더우기 走査電子顯微鏡에 있어서는 試料의 熱에 依한 變形 損傷이 レンズ結像型電子顯微鏡에 比해 極히 적다. 이는 試料에의 入射電流가 走査電子顯微鏡의 경우 $10^{-9} \sim 10^{-12} A$ 로 レンズ結像型電子顯微鏡의 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 에 比해 훨씬 적기 때문이다.

② レンズ結像型電子顯微鏡과 結像의 方式이 全히 다르므로 거기서 問題되는 對物レンズ의 球面收差나 色收差에 依한 像의 흐림은 走査型電子顯微鏡에서는 原理적으로 全혀 나타날 수 없다.

レンズ結像型電子顯微鏡에 있어서 高次의 回折線에 依한 暗視野像은 球面收差 때문에 分解能이 顯著히 低下되나 走査電子顯微鏡에 있어서는 어떤 高次의 回折線에 依한 것도 原理的으로 像의 解明度는 低次인 것과 같다. 또한 試料가 두꺼운 경우 レンズ結像型電子顯微鏡에 있어서는 非彈性散亂을 이르킨 電子에 依한 色收差 때문에, 像이 흐려지나 走査電子顯微鏡에서는 이것 역시 原理적으로 생길 수가 없다.

③ 同一視野의 明視野像과 暗視野像을 觀察할 수가 있다. Fig. 7-a, b는 雲母의 等傾角干涉稿의 明視野 및 暗視野像을 나타낸 것이다.

5. 走査型電子顯微鏡의 應用分野

走査型電子顯微鏡은 金屬, 鑽物, 半導體, 라이스, 纖維, 高分子 및 生物等의 試料의 觀察이 可能, 有力한 研究手段으로 널리 利用되고 있다.

金屬關係의 用途로는 光學顯微鏡 또는 電子顯微鏡으로 觀察하기 困難한 破斷面의 研究에 適合하다. 各種精密機械部分品의 加工面 또는 흠(損傷)等의 觀察에 利用되고 鑽物 또는 라이스의 破斷面의 研究

에 効果的으로 活用할 수 있다. 더구나 微小粒子, 立體의 表面構造等의 觀察에 好適한 裝置이다.

生物關係에서는 微細한 動植物의 形態의 觀察, 生物組織의 立體的 構造의 研究에 生物組織을 破壞하지 않고 立體感이 豊富한 像을 觀察할 수 있으며 또 한 試料를 薄片으로 할必要도 있는 長點이 있다. 其他纖維工業 藥品工業等諸 工業分野에도 應用面을 가지고 있다. 더구나 試料表面의 電位分布 또는 試料內部起電力 等의 電氣的 特性이 觀察될 수 있으므로 transiter, 集積回路等의 微小化된 素子를 取扱하는 電子工業 分野에도 利用되고, 이들 素子의 電氣的特性 또는 缺陷等의 檢查 研究에 없어서는 않될 裝置로 各分野에서 많은 研究者들로부터 注目을 받고 있다.

結論

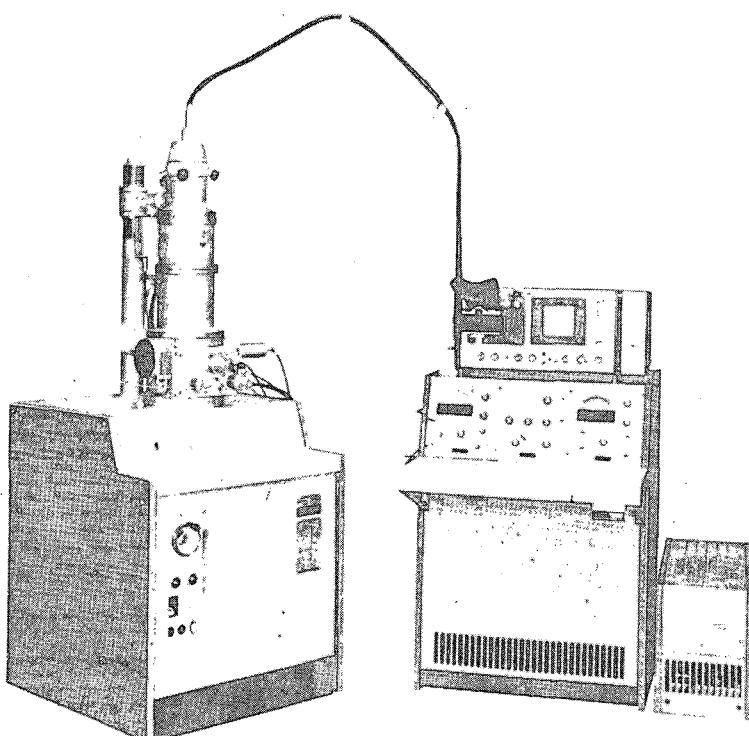
上述한바 走査電子顯微鏡의 特徵을 換言하면 走査電子顯微鏡은 高分解能의 實體顯微鏡이라 말 할 수도 있다.

그래서 電子線과 試料의 相互作用에 따라 생기는 거의 모든 現象을 情報源으로서 試料의 性質을 擴大

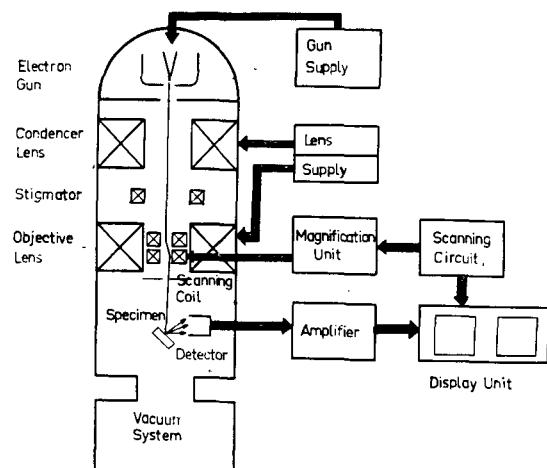
觀察할 수가 있다. 金屬, 쌔라미스等을 觀察할 경우 試料의 固有의 性質로서 2次電子 放出率의 差異가 觀察되는 境遇도 있다.

REFERENCES:

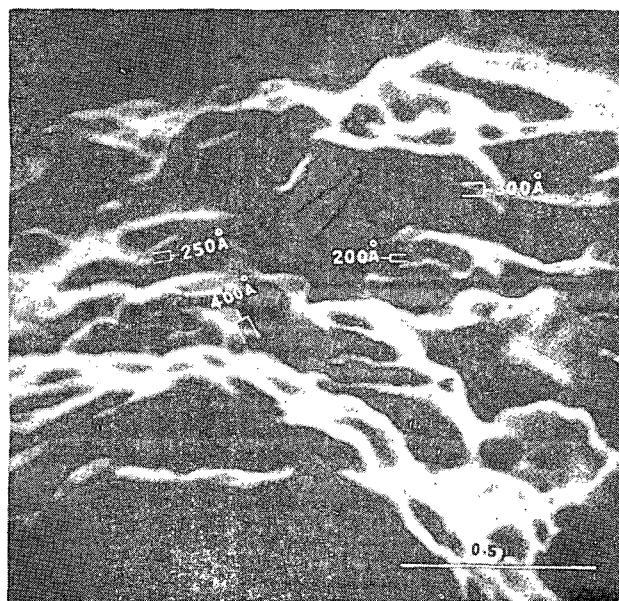
- 1) Kimoto, S. and Russ, J.C. (1969). The Characteristics and Applications of the Scanning Electron Microscope, Materials Research and Standards, MTRSA, Vol. 9, No. 1, 8-16.
- 2) Kimoto, S. (1967). On a Scanning Electron Microscope, JEOL(Japan Electron Optics Laboratory Co.), SM-67013.
- 3) JEOL News (1968), JSM-2 Scanning Electron Microscope.
- 4) JEOL News(1968). Applications of the Scanning Electron Microscope to Semiconductor Industry, Vol. 6M, No.2, 4-10.
- 5) JEOL News(1969). Applications of JSM-2 Scanning Electron Microscope to Biology, Vol. 7B, No.1,



(Fig. 1. General view of the JSM-2 sconning electron microscope)

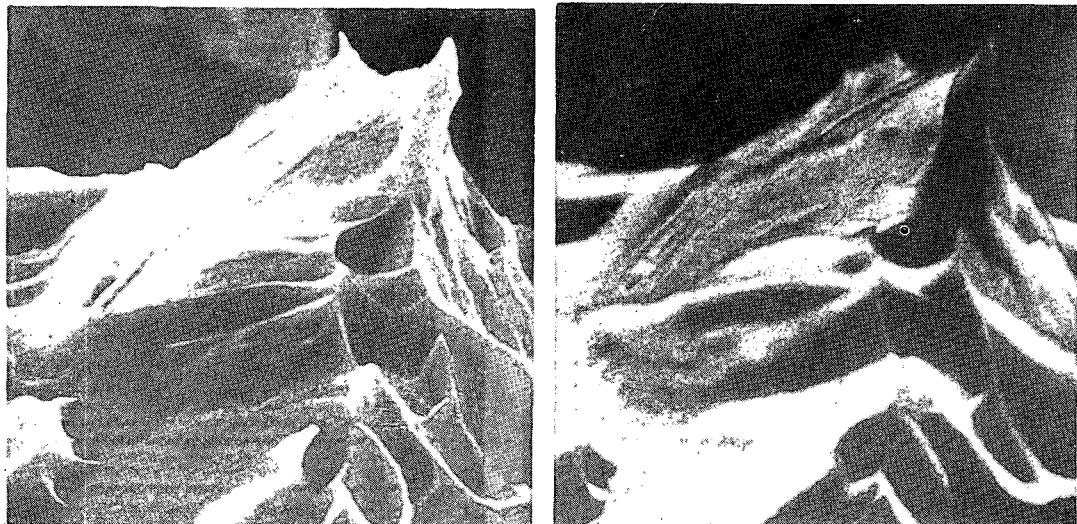


(Fig. 2. Block diagram of basic operating principle)



× 6,000

(Fig. 3.) Zinc oxide



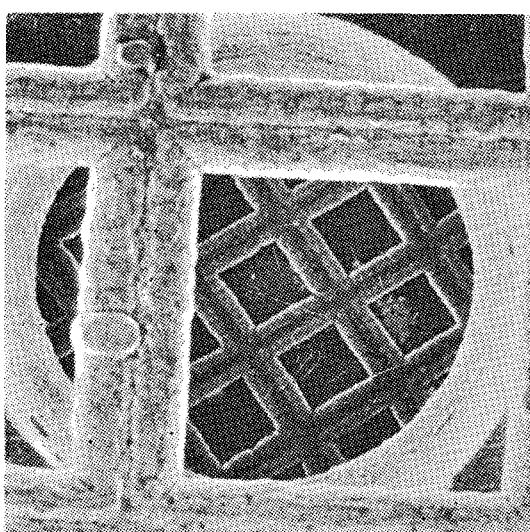
×7,000

(a. Secondary electron image)

×7,000

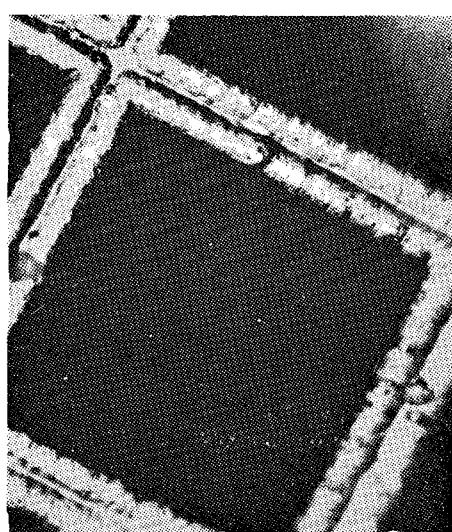
(b. Backscattered electron image)

Fig. 4.



a. Secondary electron image

×560



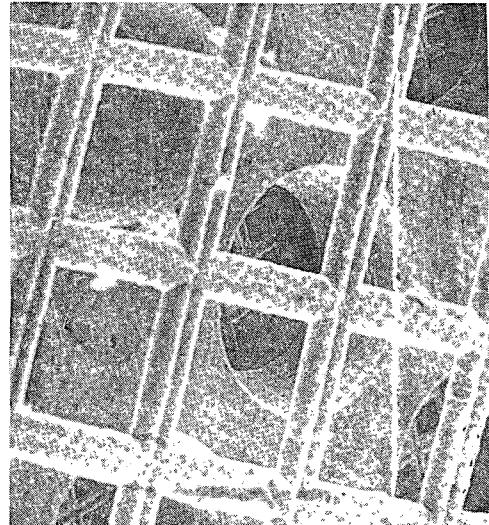
b. Image with optical microscope ×560

Fig. 5.



×320

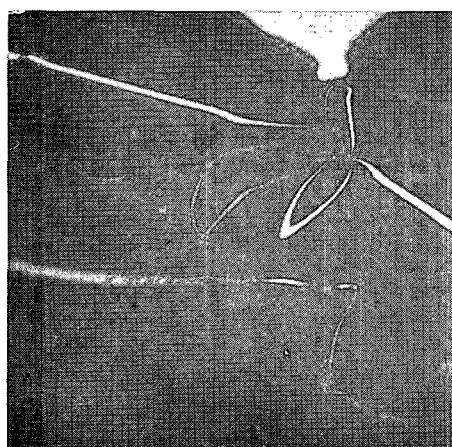
(a. Secondary electron image)



×320

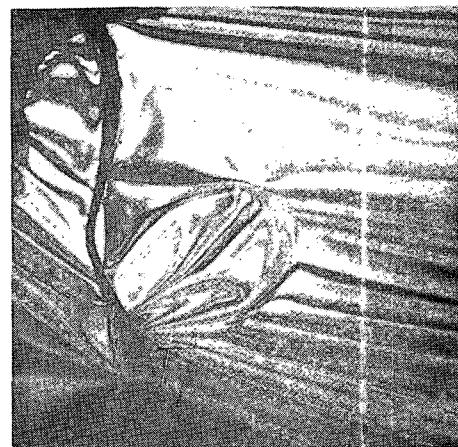
(b. Backscattered electron image)

Fig. 6.



×2,200

(a. Bright field image)



×2,200

(b. Dark field image)

Fig. 7.