

주사전자현미경용 전자검출기

이상욱*, 전종업+, 한상훈**

The Electron Detector in Scanning Electron Microscope

SangUk Lee*, Jong Up Jeon+, Sang Hoon Han**

Abstract

The nature of the signals collected by an SEM(Scanning Electron Microscope) in order to form images are all dependent on the detector used to collect them, and the quality of an acquired image is strongly influenced by detector performance. Therefore, the development of detector with high performance is very important in pulling up the resolution of SEM. In this article, electron beam-specimen interactions, the detection principle of secondary electrons and backscattered electrons, and the structure of a conventional detector are described. The structure of an experimental apparatus for the future study on our hopeful novel electron detector is presented as well.

Key Words : Electron Detector(전자검출기), Scanning Electron Microscope(주사전자현미경), Secondary Electron(이차전자), Backscattered Electron(후방산란전자)

1. 서론

SEM(주사전자현미경, scanning electron microscope)은 에너지가 매우 높은 전자빔(electron beam)을 이용하여 아주 작은 크기의 물체를 분석하는 기기로서, 물체표면의 형상(texture) 등과 같은 국소해부학(topography)적 정보, 물체를 구성하는 입자들의 형상과 크기 등의 형태학(morphology)적 정보, 재료 내 원자들의 배열상태 등의 결정학(crystallography)적 정보 등을 얻는데 이용되고 있다. SEM에 관한 연구는 1935년 베를린에 있는 기술대학에서 Max Knoll과 Ernst Ruska⁽¹⁾에 의해 처음으로 시작되었고, 1942년 V. K. Zworykin, J. Hiller, R. L. Snyder에 의

해 입체형태의 시료를 관찰할 수 있는 SEM이 발표되었다.⁽²⁾ 1964년에 SEM이 상업적으로 이용되기 시작한 이래 SEM의 해상도는 전자총(electron gun), 렌즈계, 검출기(detector) 등의 지속적인 발전에 힘입어 비약적인 발전을 이루었다. 최근에는 산업의 요구에 맞는 다양한 SEM이 개발되어 최근 활발하게 연구 개발되고 있는 MEMS, 나노, 바이오 기술 등 많은 분야에서 사용되고 있다. 이와 같이 다양한 산업분야에서 SEM의 용도가 급격히 증가하고 있음에도 불구하고 국내의 경우, SEM에 관한 기술부족으로 인해 전량 외국제품이 수입되어 사용되고 있는 실정이다. 따라서, 전자검출기를 포함한 SEM의 국산화가 무엇보다 절실한 상황이라 할 수 있다.

* 주저자, 울산대 대학원 기계자동차공학부 (sulee@mail.ulsan.ac.kr)
주소: 680-749 울산광역시 남구 무겨2동 산 29
+ 울산대학교 기계자동차공학부
++ (주)지을코리아

본 연구에서는 우선 시료와 입사전자빔간의 상호작용에 관하여 기술하고, 이때 시료로부터 방출되는 이차전자(secondary electron)와 후방산란전자(backscattered electron)를 검출하기 위한 전자검출기의 원리 및 구성에 관하여 기술한다. 또한 추후 본 연구를 통해 개발하고자 하는 전자검출기의 성능을 검증하기 위한 실험장치의 구성에 관하여 기술한다.

2. 시료와 전자빔간의 상호작용

SEM에 있어서, 시료에 입사되는 전자빔의 에너지는 시료와의 상호작용(interaction)에 의해 여러가지 다양한 신호들로 변환된다. 시료의 표면을 관찰하기 위한 신호로는 전자의 방출과 전자기 복사(electromagnetic radiation)형태의 두 가지 신호가 있다. 전자는 고체중에 들어가면 원자핵이나 주변 전자와의 쿨롱(coulomb) 상호작용에 의해서 탄성 또는 비탄성 산란(elastic or inelastic scattering)하게 된다. 전자는 탄성산란에서 비교적 큰 각도로 산란되는 한편 비탄성 산란에서는 고체내의 전자를 기저상태(ground state)에서 여기시키므로 그에 상당하는 에너지를 손실하게 된다. 두꺼운 시료중에서는 입사전자가 탄성 및 비탄성 산란을 반복하므로 그 산란 영역은 점차 넓어져 결국 그 대부분의 에너지를 잃고 전도전자가 되어 시료에서 접지(earth) 전류로 흐른다. 여기된 전자 중에서 진공준위(vacuum level)보다 높은 에너지를 지닌 전자는 여기후 고체를 통해 표면에 도달하여 표면에서 탈출한다. 이러한 전자를 이차전자(secondary electron)라고 한다. 고체내의 원자가 입사전자에 의해 이온화되면 전자의 구멍을 만들게 되고, 이 때 높은

에너지 준위의 전자가 그 구멍으로 이동하며 그 에너지 차에 상당하는 X-선이나 빛을 방출한다. 한편 원자 번호가 작은 원소에서는 이와 같은 기구로 X-선을 발생시키기보다는 그 에너지를 고체내의 다른 전자가 받아 오제이전자(Auger electron)로써 전자를 고체밖으로 방출하는 확률이 커진다. Fig. 1은 전자빔과 시료의 상호작용에 의해 발생하는 여러 가지 전자들과 X-선을 나타낸 것이다.

2.1 탄성산란

Fig. 2에서 보는바와 같이 탄성산란은 전자들이 시료의 표면에 입사되었을 때, 시료를 구성하고 있는 원자핵의 전기장(electric field)에 의해 에너지의 변화 없이 방향만 바꾸어 표면을 탈출하는 현상이다. 이러한 과정에 의해 시료 표면을 탈출하는 전자를 후방산란전자(backscattered electron)라고 하고, 이 후방산란전자는 50eV 이상의 에너지를 가지고 있다.

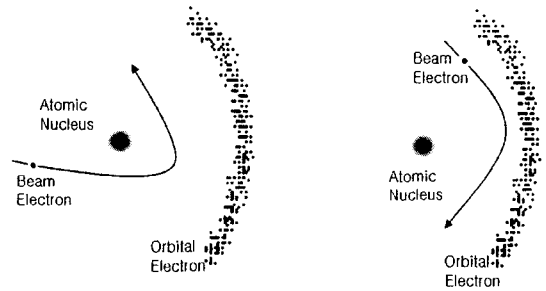


Fig. 2 Elastic scattering of beam electron

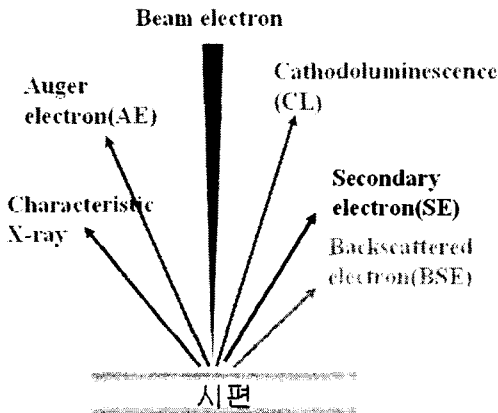


Fig. 1 Electron beam-specimen interactions

2.2 비탄성 산란

비탄성 산란은 전자들이 시료의 표면에 입사되었을 때, 원자핵의 전기장이 아닌 전도대 전자(conduction band electron)들의 전기장과 상호작용하여 원자에 에너지를 전달함으로써 발생하는 현상이다. 시료의 표면에 입사된 전자와 전도대 전자들과의 상호작용은 수 eV의 에너지를 전도대 전자로 전달시키며, 증가된 전도대 전자의 에너지는 원자로부터 이차전자, 오제이전자 그리고 X-선 등을 방출하게 된다. Fig. 3은 원자모형에서 이차전자, 오제이전자 그리고 X선 등의 발생 기구를 나타낸 그림이다. Fig. 3에서 일차전자(primary electron)는 시료의 표면에 입사되는 하나의 전자를 나타낸 것이고, 이 전자가 원자 껍질에 존재하는 전

자(shell electron)와 충돌하게 된다. 이 충돌에서 궤도에 존재하는 전자가 원자궤도를 이탈하여 밖으로 방출되는데 이 방출된 shell electron을 이차전자라고 한다. Shell electron이 방출된 후 기존의 shell electron이 머물던 자리는 비워지게 되는데, 높은 에너지 준위에 존재하는 shell electron이

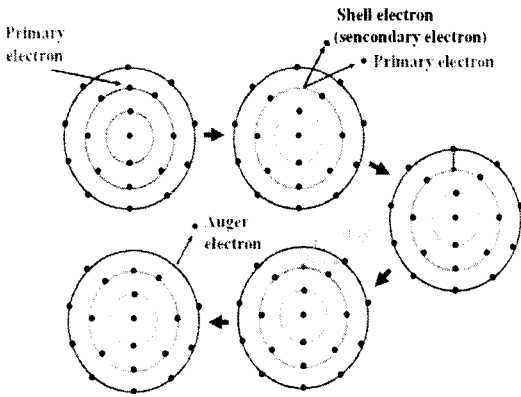


Fig. 3 Emission of secondary electron, Auger electron and X-ray

이 빈자리를 채우기 위해 낮은 에너지 준위의 궤도로 떨어지게 된다. 이때 둘 사이의 에너지 차이값에 상당하는 에너지가 방출되는데 이것이 X-선방출이다. 오제이전자는 X-선에 의해서 발생하게 되는데, X-선이 원자바깥으로 방출될 때 주위에 존재하는 궤도전자를 자극하게 되면 궤도전자가 X-선 에너지의 일부를 흡수하여 들뜬 상태가 되어 원자 궤도를 탈출하게 된다. 이것이 오제이전자이다.

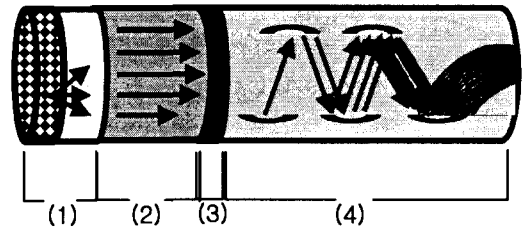
주사전자현미경에서는 이상에서 기술한 여러 가지 전자 및 X-선 등을 검출기를 이용하여 측정해냄으로써, 관찰하고자 하는 시료의 다양한 정보를 파악하게 된다. Table 1은 각 신호와 이로부터 알아 낼 수 있는 시료의 정보를 나타낸 것이다.

Table 1 Signals and information of scanning electron microscope⁽³⁾

신 호	정 보
이차전자	표면형상
후방산란전자	표면형상, 원소성분
오제이전자	원소성분, 화학결합
X-선	원소성분, 화학결합

3. 이차전자 및 후방산란전자의 검출

위에 기술한 바와 같이, 전자빔이 시료표면으로 입사되면 여러 가지 신호들이 발생하고, 이러한 신호들을 주사전자현미경의 검출기에서 획득하게 된다. 본 연구에서 검출하고자 하는 것은 이차전자와 후방산란전자에 의한 신호로 이를 검출하기 위한 장치는 Fig. 4에서 보는바와 같이 크게 네가지로 구성되어 있다. 검출기는, 전자와 충돌하면 광자(photon)를 발생시키는 인광(phosphorus)물질에 알루미늄이 코팅되어 있는 신틸레이터(scintillator), 광자를 광전자 증배관(photomultiplier tube, PMT)까지 전달시키는 도광관(light guide pipe), 광전효과에 의해 광자를 다시 광전자(photo



(1) scintillator (2) light guide pipe
(3) Photo cathode (4) photo multiplier tube

Fig. 4 Electron detector

electron)로 바꾸는 광음극(photo cathode), 전자를 증폭시켜 전기적 신호로 바꾸는 광전자 증배관으로 구성되어 있다.

3.1 이차전자의 검출

Fig. 5는 이차전자를 검출하기 위한 방법을 나타내고 있다. 시료표면으로부터 이탈하는 이차전자를 포획하기 위해, 그물(mesh)모양을 가진 패러데이 케이지(Faraday cage)에 약 -50V에서 +300V의 전압을 인가하여 이차전자들을 패러데이 케이지 안으로 끌어들인다. 이 후에 패러데이 케이지 안으로 모인 이차전자들을 신틸레이터에 강하게 충돌시키기 위해 신틸레이터 금속막에 +10kV의 고전압을 인가한다. 가속된 이차전자가 신틸레이터와 충돌했을 때, 발생된 광자가 도광관을 따라 이동하게 되고 광음극판에서 다시 광전자로 바뀌어 광증배관에서 증폭되어 최종적으로 원하는 전류 신호로 바뀌게 된다. 이것은 전류-전압 변환회로를 통

4. 실험 장치

전자 검출실험을 수행하기 위해 전자의 긴자유행로를 보장할 수 있는 표본실(vacuum chamber)의 설계가 필수적이다. 본 연구를 위해 Fig.7 과 같은 크기 $\phi 250 \times H250\text{mm}^3$ 이고 진공도 10^{-7}torr 를 구현할 수 있는 진공장치를 설계하였다. 시료가 전자빔에 노출되는 각도를 달리하고, 시료와 검출기 간의 거리를 변화시키기 위해 sample transfer port는 시료의 횡방향 회전이 가능하고 전자검출기는 전·후 거리 변화가 가능하도록 설계하였다.

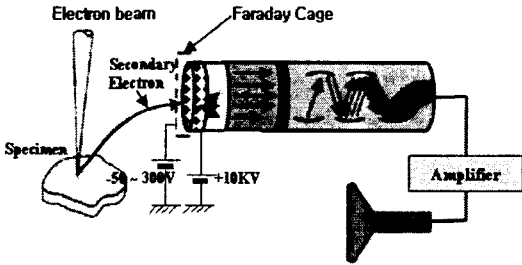


Fig. 5 Secondary electron detector

해 CRT의 휘도를 조정할수 있는 전압 신호로 바뀌게 된다.

3.2 후방산란전자의 검출

Fig. 6은 후방 산란전자를 검출할수 있는 몇가지 방법을 보여주고 있다. 후방산란전자는 이차전자를 포획할 때와는 다른 방법을 사용한다. Fig. 6의 (1)은 패러데이 케이지에 낮은 전압을 인가하여 낮은 에너지를 가진 이차전자를 회피하고 후방산란전자만을 포획하는 방법을 나타낸 것이고, (2)는 이차전자는 시료방향으로 반사시켜 접지된 시료 받침대를 통해 흘러나가게 하고 후방산란전자만을 방출하게 하는 방법이다. (3)은 후방산란전자가 convert target에 충돌했을때, 그로부터 발생하는 이차전자들을 측정해서 후방산란전자의 양을 측정하는 방법이다. Fig. 6의 (1), (2) 그리고 (3)의 방법으로 측정된 신호들은 3.1절에서 기술한 바와 마찬가지로 전압신호로 변환되어 화상으로 나타나게 된다.

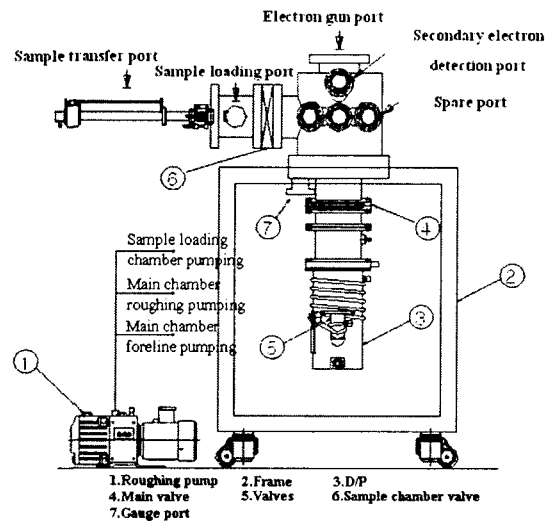


Fig. 7 Experimental apparatus

5. 결론

본 논문에서는 전자빔과 시료의 상호작용에 대해서 살펴 보았으며, 전자들의 검출원리를 기술하였다. 필자는 최근 나노, 바이오 산업의 필수장비인 SEM의 국산화를 위해서 본 연구를 수행중이며, SEM의 핵심기술 부분인 검출기제작에 초점을 두고 있다. 본 연구에서는 시편으로부터 얻어지는 전자신호를 검출하기 위한 장치들을 설계 하였다. 검출기에서 검지된 시료에서 나온 신호는 노이즈에 매우 민감하므로 깨끗한 화상처리를 위해서 신중한 장치제작이 필요하며, 향후 이차전자 및 후방산란전자 등을 검출하기 위한 구성장치들이 개선 될 것이다.

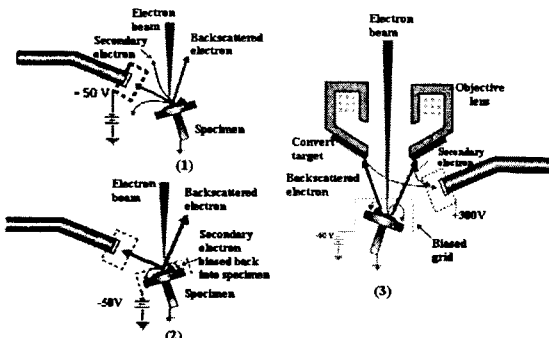


Fig. 6 Detecting method of backscattered electron

후 기

본 연구는 산업자원부 차세대신기술개발사업(총괄과제명:이온빔 이용 나노가공용 장비 개발)의 위탁과제 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

- (1) Peter W. Hawkers, 1988, "Advances in Electronics and Electron Physics", Academic Press
- (2) Robert Edward Lee. 1993, "Scanning Electron Microscopy and X-ray Analysis", Prentice Hall
- (3) 일본 전자 현미경 학회 관동지부, 황재욱, 김재천 공역, 1998, 주사전자현미경의 기초, 반도출판사