

전자빔 몬테 카를로 시뮬레이션 프로그램 개발 및 전자현미경 이미징 특성 분석

Development of Electron Beam Monte Carlo Simulation and Analysis of SEM Imaging Characteristics

김흥배^{1,✉}
Heung-Bae Kim^{1,✉}

1 (주)세크 (SEC Co., LTD)

✉ Corresponding author: heungbaekim@gmail.com, Tel: 031-8006-8787

Manuscript received: 2011.8.11 / Revised: 2011.9.20 / Accepted: 2012.1.9

Processing of Scanning electron microscope imaging has been analyzed in both secondary electron (SE) imaging and backscattered electron (BSE) image. Because of unique characteristics of both secondary electron and backscattered electron image, mechanism of imaging process and image quality are quite different each other. For the sake of characterize imaging process, Monte Carlo simulation code have been developed. It simulates electron penetration and depth profile in certain material. In addition, secondary electron and backscattered electron generation process as well as their spatial distribution and energy characteristics can be simulated. Geometries that has fundamental feature have been imaged using the developed Monte Carlo code. Two, SE and BSE images generation process will be discussed. BSE imaging process can be readily used to discriminate in both material and geometry by simply changing position and direction of BSE detector. The developed MC code could be useful to design BSE detector and their position. Furthermore, surface reconstruction technique is possibly developed at the further research efforts. Basics of Monte Carlo simulation method will be discussed as well as characteristics of SE and BSE images.

Key Words: Scanning Electron Microscope (주사전자현미경), Secondary Electron (이차전자), Backscattered Electron (후방산란 전자), Monte Carlo Simulation (몬테 카를로 시뮬레이션)

기호설명

λ = MFP, mean free path

N_A = Avogadro's number

ρ = density

σ_E = Rutherford cross section

Z = atomic number

A = atomic density

E = energy

α = screening factor

s = step length

RND = random number

Φ = scattering angle of electron

Ψ = azimuthal angle

dE/dS = stopping power

J = mean ionization potential

γ = scattering angle of secondary electron

1. 서론

과학기술의 발전은 전통적인 기계공학 분야의 연구자들에게 다양한 전공분야에 대한 이해를 요구하고 있다. 다분야 전공 등 전통 기계공학을 기본으로 전자와 전기공학 그리고 양자역학(Quantum mechanics)을 이용한 물리 및 화학 분야에 대한 이해를 필요로 하는 연구분야가 증가하고 있다. 특히 반도체 공학의 눈부신 발전으로 기계공학 분야에서의 가공 및 장비 제작 분야는 반도체 공정 등을 이용한 초소형 구조물 제작 및 나노(Nano) 레벨의 해상도를 가지는 이미징(Imaging) 관련 장비 제작 등으로 연구분야 및 기술이 이동하고 있다. 이러한 반도체 기반 기술은 엔지니어들에게 고체 전자공학, 반도체 물리학 및 화학 등의 과학기술 분야에서 상당한 수준의 지식을 요구하고 있다.¹⁻³ 특히 가공분야의 경우, 반도체 제작공정 중 리소그라피(Lithography), 증착(Deposition),⁴ 에칭(Etching)⁵ 등을 이용한 초소형 기계구조물(MEMS), 광학 부품 등을 제작하는 연구가 활발해지고 있다.⁶⁻⁹ 나아가 나노 레벨의 가공, 이미징 및 분석 장비 기술의 저변에는 진공 설계 기술 및 고 정밀 조립기술 등도 포함한다.

이러한 마이크로 및 나노 기술을 기능하게 해주는 핵심 도구로는 전자빔(Electron beam), 이온빔(Ion beam)과 같은 입자빔(particle beam) 기술을 비롯하여 파장이 작은 레이저(Laser), EUV(Extreme ultra violet), X 선 등과 같은 광자빔(Photon beam) 기술이다. 에너지 빔 도구들은 리소그라피, 에칭, 증착 등을 가능하게 해주는 기본도구일 뿐만 아니라 전자현미경(Scanning electron microscope), 이온 현미경(Ion microscope) 및 X 선을 이용하는 EDS 와 같은 나노 단위의 해상도를 가지는 이미징 및 분석 기술을 가능하게 해주는 중요한 도구이다. 입자빔 및 광자빔 기술은 전통적으로 물리 및 화학 분야의 주 연구 주제였으나, 서술한 대로 현재는 전통적인 기계 및 전기전자 분야에서 다양하게 사용되고 있으므로 기계공학분야의 연구자들도 관련지식을 이해하고 정확히 사용할 필요성이 대두되고 있다.

현재까지 전자현미경은 고가의 연구장비로 접근성이 많이 떨어지는 장비였으나 국내의 회사들이 소형의 저가 장비를 제작 판매하고 있어서 보급률 및 접근성이 많이 상승하고 있다. 이러한 추세로 정부에서도 전자현미경 관련 연구에 많은 투

자를 실행하고 있으므로 장비의 제작에 참여하는 기계공학 연구자들은 전자현미경에 대한 높은 지식을 습득할 필요가 있다. 또한 최근 전자빔을 이용한 청정가공 및 표면 처리 시스템에 대한 연구 개발이 진행되고 있을 정도로 전자빔의 사용은 기계공학분야에서 그 활용이 높아지고 있다.¹⁰ 따라서 몬테카를로 시뮬레이션 프로그램을 이용한 전자-고체 상호작용에 대한 이해가 필수적이라 하겠다.

본 연구에서는 이러한 연구 추세에 맞추어 전자 빔의 특성을 이해하고자 전자 빔과 모재의 상호작용에 대한 몬테 카를로(Monte Carlo) 프로그램을 개발하는 것을 목표로 한다. 특히 전자현미경에서 이미징을 위해 사용하는 이차 전자(Secondary Electron, SE)와 후방산란 전자(Backscattered Electron, BSE)의 발생 특성과 이들의 공간(Spatial) 및 에너지(Energy) 특성을 분석하고자 한다. 세부적인 연구 목표는 아래와 같다.

- (1) 전자빔과 모재의 상호작용을 연구하기 위해 몬테 카를로 시뮬레이션 프로그램 개발.
- (2) 전자빔의 입사에 따른 이차 전자 및 후방산란 전자의 발생 특성 분석
- (3) 이차 전자 및 후방산란 전자의 발생 특성을 이용한 이미징 특성 분석

본 연구의 주 목표는 세부목표 (1)의 몬테카를로 프로그램 개발이 목표이므로 세부목표 (2)와 (3)은 개발된 프로그램의 간단한 검증이다. 따라서 기존에 발표된 연구결과들과 비교하여 검증하며, 전체 검증은 Si 모재를 대상으로 한다.

전자현미경 및 전자빔 몬테 카를로 프로그램 개발에 대한 전반적인 기술이 2 장과 3 장에서 그리고 개발된 몬테 카를로 프로그램을 이용한 고체-전자빔 상호작용과 이미징에 대한 분석이 4 장에서 기술된다. 최종 결과로 이차 전자와 후방산란 전자에 의한 이미징 시뮬레이션이 5 장에서 논의 된다.

2. 전자현미경

2.1. 전자현미경의 구조

일반적인 전자현미경은 텅스텐(Tungsten, W) 필라멘트(Filament)를 가열하여 전자를 발생시키는 열 전자 발생장치를 이용하는데, 텅스텐은 높은 용융

점, 낮은 증기압, 그리고 상대적으로 낮은 가격으로 인하여 많이 사용된다. 이외에 전자빔 소스로는 LaB₆(Lanthanum Boride), 텅스텐 단결정을 사용하는 FEG(Field emission gun), 그리고 Schottky 타입 등이 있으며, 주로 고해상도 전자현미경에 주로 채택하고 있다.

Fig. 1 에서 보여지는 것과 같이 전자 소스에서 발생된 전자는 일반적으로 집속을 위한 집속렌즈(Condenser lens)와 대물렌즈(Object lens)를 이용하여 빔의 직경을 수십 nm 정도로 집속하게 되며 0.5keV 에서 100keV 정도의 에너지로 가속된다. 전자빔의 집속은 일반적으로 전자기 렌즈(Electromagnetic)를 사용하여 수행되고 최종적으로 집속된 빔은 편향 코일(Deflection coil) 등을 이용하여 표면의 일정 영역을 스캔(Scan)하게 된다. 현재 전자현미경의 개발 추세는 기존의 Charging 현상으로 불가능했던 생체 생검을 위한 E-SEM(Environmental SEM) 또는 가변 압력(Variable pressure) 전자현미경으로 등으로 이는 더 높은 진공분리 기술을 요구한다.¹¹ 이러한 기술을 개발하기 위해서는 전자빔의 가스 내에서의 산란을 계산할 수 있는 몬테 카를로 시뮬레이션 기법의 개발이 필수적이다.^{12,13}

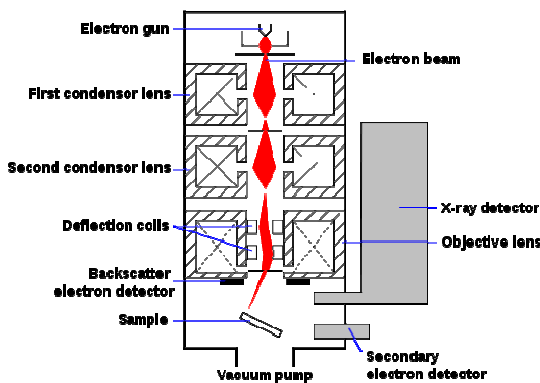


Fig. 1 Schematic illustration of scanning electron microscope with its configuration¹⁴

2.2. 이미징(Imaging)

전자현미경의 이미징은 일정한 영역에 집속된 빔을 스캐닝 하여 이루어진다. 이때 모재 내부로 침투한 전자는 모재 원자와의 상호작용을 통하여 이차 전자를 발생시키며 일부는 다시 원자의 외부로 탈출하고 이를 후방산란 전자라 한다.

이차 전자는 모재 외부로 탈출하여 신틸레이터(Scintillator)와 광 증폭기를 통하여 전기신호로 변환된다. 이차 전자는 외부로 탈출할 때 아주 작은 에너지만을 가지므로 이차전자를 수집하기 위해 양극(Anode)을 갖는 수집장치가 필요하다. 입사 전자 하나에 대한 이차전자의 발생 비율을 이차전자 수율(Yield)이라 하며 재료의 종류, 전자빔 입사 에너지 및 입사각도 등에 따라 달라진다.

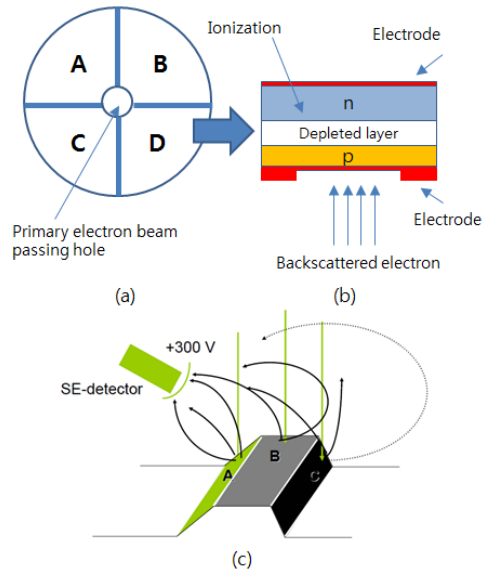


Fig. 2 Schematic drawings of secondary electron and backscattered electron detection system. Four-segmented circular type BSE detector (a), cross-section (b) and secondary electron detector (c)

이에 반해 후방산란 전자의 대부분은 입사한 전자들이 에너지를 모두 잃어버리지 않고 외부로 탈출하므로 특별한 수집장치 없이 검출기에 의해 검출된다. 후방산란 전자는 높은 에너지 특성으로 인하여 탈출 방향으로의 높은 방향성을 가진다. 이차 전자 및 후방산란 전자의 이미징에 대한 간략한 묘사가 Fig. 2 에 보여지고 있는데, 후방산란 전자는 검출기를 모재의 표면 위에 위치하여 직접 후방산란전자를 검출하는 반면 이차전자는 검출기를 측면의 일정한 영역에 설치하여 이차전자를 수집한다.

후방산란 전자 검출기는 현재 반도체검출기가 많이 사용되고 있으며, 원형의 검출기는 2-4 개로 분리되어 있다. 이렇게 분리된 검출기 각 부분에

이러한 방법으로 전자는 모재 내에서 연속적으로 에너지를 잃으며 진행하며, 전자는 최종적으로 일정 에너지 이하일 경우 정지하게 된다. 삼차원으로 시뮬레이션 된 전자빔과 모재의 상호작용이 Fig. 3 에 보여지고 있다.

시뮬레이션은 전자빔 직경이 10 nm(FWHM)인 가우스(Gaussian) 전자빔을 이용하였다. 일부 전자는 모재내부에서 외부로 탈출하게 되는데 이것을 후방산란 전자라 한다. 모재내부를 진행하는 전자는 모재원자의 외각전자와의 상호작용으로 이차전자를 전자를 발생시키는데, 본 연구에서는 미분단면적(differential cross section) 식(9)를 사용하여 이차 전자 발생을 고려하였다.

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\pi e^4}{E^2} \left(\frac{1}{\Omega^2} + \frac{1}{(1-\Omega)^2} \right) \quad (9)$$

여기서 E 는 전자의 에너지 그리고 Ω 는 이차전자의 에너지를 의미한다. 이 식은 입사전자의 이차전자로의 에너지 전달을 의미하며, 발생된 이차전자의 산란각, γ 는 식(10)으로 계산할 수 있다.

$$\sin^2 \gamma = \frac{2(1-\Omega)}{(2+t\Omega)} \quad (10)$$

이차 전자 및 입사 전자의 산란은 에너지의 함수임을 알 수 있다. 발생 된 이차 전자는 입사전자와 같은 방법으로 연속적으로 에너지를 잃으며 모재 내부를 진행하다가 일정에너지 이하일 경우 정지하게 된다. 이때 일부 이차 전자는 모재 외부로 탈출하게 되는데, 이것을 수집하여 전자현미경의 이미지를 구성하게 된다. 3 차원으로 계산된 이차전자 발생 시뮬레이션이 Fig. 4 에 보여지고 있다.

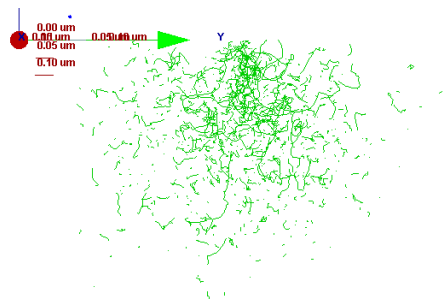


Fig. 4 Image of simulated secondary electron generation. Simulation was performed using beam diameter of 10nm (FWHM) on Si substrate at 30keV

이차 전자 및 후방산란 전자의 발생에서 주목할 점은 에너지와 발생 방향에 있다. 후방산란 전자의 경우, 비교적 높은 에너지를 가지고 입사한 전자의 연속적인 산란의 결과이므로 비교적 높은 에너지를 유지하며 모재를 탈출한다. 반면 이차 전자의 경우 발생 시 입사전자로부터 일부 작은 에너지를 받아 발생하고 이 작은 에너지를 이용하여 모재 내부를 진행하면서 일부가 모재 외부로 탈출하므로 아주 작은 에너지를 가진다. 또한 대부분 전자의 모재 내부에서의 산란은 에너지의 함수므로 에너지가 비교적 큰 후방산란 전자가 높은 방향성을 가진다. 개발 한 몬테 카를로 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 이차 전자와 후방산란 전자의 발생 특성을 다음 장에서 논의한다.

이 논문에서는 10nm (FWHM)의 직경을 가지는 전자빔과 실리콘 모재를 사용하여 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다.

4. 전자-고체 상호 작용

4.1 이차 전자 발생 특성

앞 장에서 논의 한 대로 이차 전자의 발생 특성은 낮은 에너지이며, 이로 인하여 이차 전자는 양으로 대전 된 수집용 전극을 이용하여 발생 방향에 관계없이 수집되어 이미지화 된다. 이때 이차전자 발생 수율(Yield)에 따라 이미지 농도가 달라지므로 이차 전자의 이미징 특성은 발생 방향이 아니라 수율에 따라 커다란 차이를 보인다.

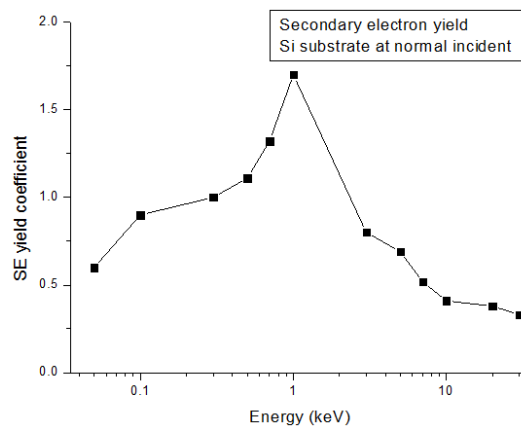


Fig. 5 Simulated electron impact Secondary Electron (SE) yield of Silicon substrate at normal incidence

이번 절에서는 입사 에너지에 따른 이차 전자의 수율에 대해 개발된 몬테 카를로 프로그램을 이용하여 분석해 본다. 실리콘에 수직입사 한 전자 빔에 의한 이차 전자 발생 수율이 입사 에너지의 함수로 Fig. 5 에 보여지고 있다.

이차 전자의 발생 수율은 특정 에너지를 기준으로 최대값을 보이며, 일반적으로 전자현미경에서 사용하는 1-30keV 의 영역 중에서 저 에너지 영역에 속하는 1-5keV 의 영역에서 최대값을 나타낸다. 따라서 높은 밝기의 이차 전자 이미지를 얻으려면 1-5keV 의 전자빔을 사용하는 것이 유리함을 알 수 있다.

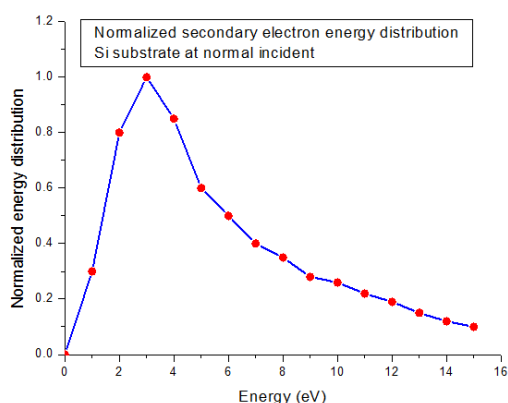


Fig. 6 Simulated energy distribution of secondary electrons under various incident energies. Silicon substrate and electron energy of 10keV were used for the simulation

수직 입사한 10keV 의 전자에 의해 발생된 이차전자들의 상대적 에너지가 Fig. 6 에 보여지고 있는데, 이전에 언급했듯이 이차 전자 대부분은 15eV 이하의 작은 에너지를 가지며 3eV 에서 피크를 보이는 것을 알 수 있다. 입사각도에 따른 이차 전자의 수율은 다음 절에서 후방산란 전자의 수율과 함께 논의한다.

4.2 후방산란 전자 발생 특성

이차 전자의 발생 특성이 발생각도가 아닌 발생 수율에 있는 반면, 후방산란 전자의 경우 높은 에너지를 가지고 모체로부터 발생되므로 방향성을 가지고 일정한 위치에 도달하게 된다. 이러한 특성을 이용하여 후방산란 전자의 수집은 전극을 이용한 수집이 아니라 시편 위에 설치한 후방산란

전자 검출기를 이용한다. 따라서 후방산란전자는 수율 뿐만 아니라 발생 방향에 큰 영향을 받는다. 나아가 검출기의 크기 및 위치에 따라 발생된 후방산란 전자를 검출하는 정도가 달라지므로 응용 범위에 따라 검출기의 위치와 크기를 최적화하는 작업이 이미지화의 중요한 요소이다.

이차전자의 이미지가 단순한 이진 그레이 (Binary grey) 레벨을 갖는 2 차원 이미지라면 후방산란 전자 이미지는 검출기의 위치, 크기 및 후방산란 전자의 발생 특성을 조절하여 3 차원의 입체적 형상을 그레이 레벨로 얻을 수 있는 좋은 특성이 있다. 빔 에너지의 증가에 따른 후방산란 전자의 발생 수율에 대한 그래프가 Fig. 7 에 보여지고 있다.

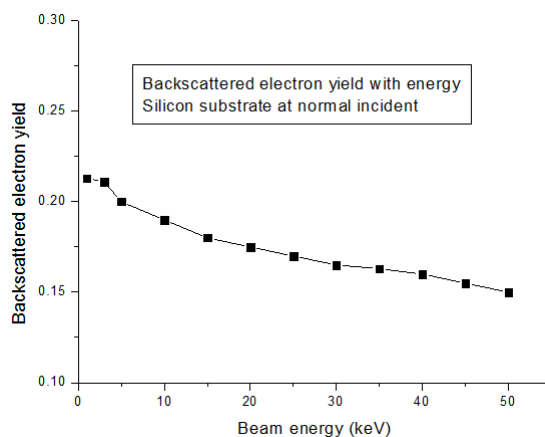


Fig. 7 Simulated backscattered electron yields at various energies. Electron beam bombarded on Silicon substrate at normal direction

이차 전자가 특정 에너지를 기준으로 최대치를 가지는 경향을 보이는 반면 후방산란 전자는 에너지의 증가와 함께 수율이 완만하게 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 에너지가 높으면 입사 방향으로 계속 진행하려는 경향이 크므로 입사 반대 방향으로 방향을 바꾸어 탈출하는 후방산란 전자의 수율 감소하는 것은 논리적으로 타당하다 하겠다.

또한 저 에너지 영역의 수율에 대해 Assa'd¹⁵ 등은 실험을 통하여 후방산란전자의 수율을 측정하고 결과를 발표하다, 그들의 결과에 의하면 6keV 이하의 저 에너지 영역에서 수율의 증가 및 감소 추세는 재료에 따라 상이한 결과를 나타낸다. Ag, Au, 및 Cu 에서는 1 keV 정도에서 수율이 감소하

는 추세를 보이는 반면 C 와 Al 의 경우에는 감소 하지 않거나 오히려 증가하는 경향을 나타낸다. Williamson¹⁶ 등은 몬테 카를로 시뮬레이션을 통하여 1keV 이하에서 대부분의 모재의 후방산란전자 수율이 0.2-0.4 의 값을 가진다고 발표하였으며, Si 의 경우에는 저 에너지 영역에서 수율의 감소나 증가가 없다고 보고하였고 본 연구 결과와 동일함을 알 수 있다.

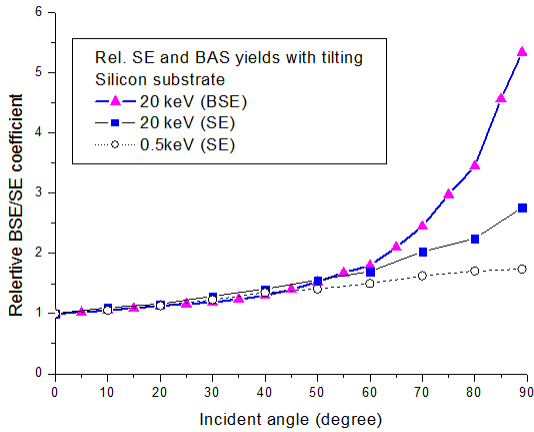


Fig. 8 Simulated relative backscattered/secondary electron yields at various incident angles (0-89°). Electron beam bombarded on Silicon substrate at 20keV and 500eV

후방산란 및 이차 전자의 입사 각도에 따른 발생 수율에 대한 시뮬레이션 결과가 Fig. 8 에 보여지고 있다. 이차 및 후방산란 전자 모두에 대해 수직 입사를 기준으로 입사 각도가 증가 할수록 발생 수율이 증가하는 것을 알 수 있으며, 각도에 따른 수율이 $1/\cos(\text{입사각도})$ 에 비례한다는 연구와 일치한다.¹⁷ 이것은 후방산란전자의 경우 입사한 전자빔이 입사 각도의 증가에 따라 계면에서 더 많이 반사(Reflection)하거나 때문이며, 이차 전자의 경우에는 입사 각도가 증가할수록 입사한 전자빔이 표면으로부터 더 가까운 곳에서 모재와 상호작용하고 이로 인하여 발생 된 이차 전자가 쉽게 모재로부터 탈출하기 때문이다. 후방산란 전자의 경우, 각도에 따른 수율의 증가가 이차전자 보다 크다는 것을 알 수 있으며, 이차 전자는 에너지가 클수록 각도에 따른 증가량이 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 후방산란 전자를 이용하여 입체적 이미지를 얻는 것이 이차 전자를 이용하는 것 보

다 더 유리하며, 이차전자를 이용하여 입체적 이미지를 얻기 위해서는 높은 에너지를 사용하는 것이 유리하다는 것을 알 수 있다.

5. 이미징

이차 전자와 후방산란 전자를 이용한 이미지를 얻기 위해 간단한 형상을 정의하고, 형상 위를 10 nm (FWHM)의 직경을 가지는 빔을 이용하여 일정한 간격으로 스캐닝 하였다. 이때 발생된 이차 전자와 후방산란 전자의 수율을 이용하여 이미지를 형상화 하였다. 정의한 형상은 Fig. 9 에 보여지는 것과 같이 사다리꼴 형상으로 시뮬레이션 상에서는 실리콘 재질로 정의하였다.

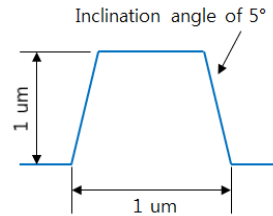


Fig. 9 Illustration of defined feature for the simulation

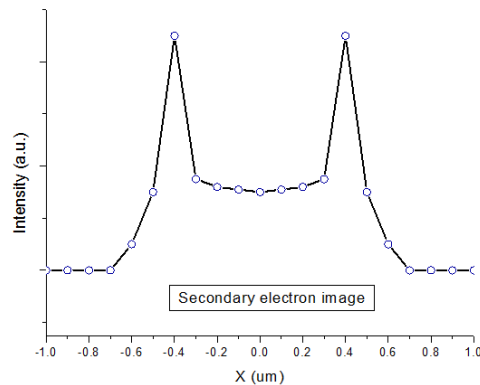


Fig. 10 Scanned secondary electron signals

시뮬레이션을 통해 구현된 이차 전자와 후방산란 전자의 스캔 신호가 Fig. 10 그리고 Fig. 11 에 각각 보여지고 있다. 이차 전자의 경우 경사 입사에서는 수율이 높으므로 높은 밝기를 보이는 것을 알 수 있다. 후방산란 전자의 경우에도 역시 경사 입사의 경우 높은 높은 밝기를 보이는 것을 알 수 있으나 이미지의 전체적인 밝기는 다른 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

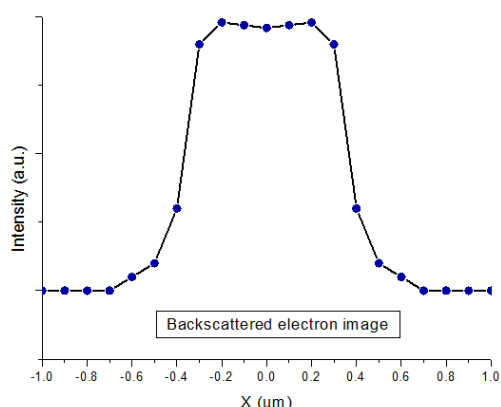


Fig. 11 Scanned backscattered electron signals

6. 결론

전자빔 몬테 카를로 시뮬레이션 코드를 개발하였고 후방산란 전자 및 이차 전자의 발생 특성을 분석하였다. 이차 및 후방산란 전자의 발생 수율을 입사각도에 따라 분석하여 입사 각도가 증가할 수록 수율이 증가하는 것을 확인하였다. 후방산란 전자의 각도에 따른 민감도가 이차 전자보다 높다는 것을 확인하였으며, 이차전자의 경우에도 입사 에너지가 높을수록 민감도가 증가하는 것을 확인하였다. 또한 이차 전자의 에너지가 후방산란 전자에 비해 작은 평균 에너지를 갖는 것뿐만 아니라 입사 에너지와 방향에 따라 발생 특성이 변화되는 것을 확인하였다.

후방산란 전자의 발생 방향, 발생 수율 등을 입사 각도에 따라 분석하였고, 고 에너지와 저 에너지에서 수율 변화를 기존의 연구 결과와 비교하여 동일한 경향을 얻었다. 이러한 결과로 개발된 몬테 카를로 프로그램이 신뢰성이 있음을 확인하였다. 이미징을 위해 사다리꼴 형상을 정의 한 후 일정한 간격으로 스캔하여 이차 전자와 후방산란 전자의 수율을 측정하였다. 수율을 이용하여 2 차원적인 이미징을 수행하였다.

추가적인 연구 계획으로 개발된 몬테 카를로 프로그램에 스캐닝 기능을 보강하여 좀 더 정밀한 형태의 이차전자 및 후방산란 전자 이미징 분석에 사용될 계획이다. 또한 최근 활발한 연구가 진행되고 있는 고밀도 전자빔에 의한 표면 처리 등에 관한 연구를 진행하기 위해서는 전자빔 몬테 카를로 시뮬레이션이 필수적이므로 열 발생 및 이로 인한 원자들의 승화(Sublimation)에 대한 연구를 진

행 할 계획이다. 나아가 전자빔과 보조 가스를 이용한 증착 및 에칭에 관한 연구에 활용할 계획이다. 또한 생체재료의 생검에 사용되는 E-SEM의 개발에서 빔의 가스와의 충돌문제와 이에 따른 이미징 특성을 연구할 계획이다.¹⁷

참고문헌

1. Ivor, I. and Julius, J. M., "The Physics of Micro/Nano-fabrication," Plenum Press, 1992.
2. Kaesmaier, R. and Loschner, H., "Ion Projection Lithography: Progress of European MEDEA & International Program," Microelectron. Eng., Vol. 53, No. 1, pp. 37-45, 2000.
3. Frey, L., Lehrer, C. and Ryssel, H., "Nanoscale Effects in Focused Ion Beam Processing," Appl. Phys. A, Vol. 76, No. 7, pp. 1017-1023, 2003.
4. Matsui, S., "Three-dimensional nanostructure fabrication by focused ion beam chemical vapour deposition," Springer Handbook of Nanotechnology, pp. 211-229, 2010.
5. Young, R. J., Cleaver, J. R. A. and Ahmed, H., "Characteristics of gas-assisted focused ion beam etching," J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 11, No. 2, pp. 234-241, 1993.
6. Kim, H. B. and Noh, S. L., "The Characteristics of focused ion beam utilized mold fabrication on the micro/nano scale," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 28, No. 8, pp. 966-974, 2011.
7. Kim, H. B., Hobler, G., Steiger, A., Lugstein, A. and Bertagnolli, E., "Level set approach for the simulation of focused ion beam processing on the micro/nano scale," Nanotechnology, Vol. 18, No. 26, Paper No. 265307, 2007.
8. Kim, H. B., Hobler, G., Steiger, A., Lugstein, A. and Bertagnolli, E., "Full three-dimensional simulation of focused ion beam micro/nanofabrication," Nanotechnology, Vol. 18, No. 24, Paper No. 245303, 2007.
9. Vasile, M. J., Xie, J. and Nassar, R. J., "Depth control of focused ion-beam milling a numerical model of the sputtered process," J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 17, No. 6, pp. 3085-3090, 1999.
10. Kang, E. G., Kim, H. S., Kim, J. S., Lee, D. Y. and

- Lee, S. W., "Trends on the application of High density electron beam process," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 215-216, 2011.
11. Danilatos, G. D., "An atmospheric scanning electron microscope (ASEM)," Scanning, Vol. 3, No. 3, pp. 215-217, 1980.
 12. Smith, R., "Atom & ion collision in solids and at surfaces," Cambridge University Press, 1997.
 13. Eckstein, W., "Computer simulation of Ion-Solid Interactions," Springer-Verlag, 1991.
 14. Wikipedia, "Scanning electron microscope," http://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_electron_microscope
 15. Assa'd, A., "Backscattering coefficients for low energy electrons," Scanning Microsc., Vol. 12, No. 1, pp. 185-192, 1998.
 16. Williamson, W. and Antolak, A. J., "Monte Carlo calculation of electron scattering from surface films," J. Appl. Phys., Vol. 58, No.10, pp. 3687-3691, 1985.
 17. Kim, H. B. and Mazzouz, M., "Investigation of Imaging characteristic using E-SEM," FEI Company, 2008.