

## 나노종합팹센터의 전자현미경 관련 기술

양준모, 박윤창, 임동빈, 현문섭, 김정우

나노종합팹센터 특성평가팀

### 1. 서론

산,학,연 연구개발주체에 나노기술의 종합적인 연구개발 지원을 목적으로 나노종합팹센터 (이하 팹센터)가 대덕 연구단지 내에 설립되고 있다. 팹센터는 2005년 초부터 본격적인 서비스를 목표로 소자, 공정, 신소재, NEMS, 바이오, 특성평가 관련 인프라가 순조롭게 구축되고 있다. 이 중에서 특성평가, 특히 나노분석에서 필수적인 전자현미경 관련 기술에 대해서 논하고자 한다.

### 2. 본론

#### 2-1. FE-TEM

팹센터에 설치될 전계방출형 투과전자현미경 (이하 FE-TEM, Tecnai™ G<sup>2</sup> F30 S-TWIN)은 ~0.2nm의 점분해능 (격자분해능: ~0.1nm)을 갖고 고분해능 투과전자현미경상의 관찰이 가능하다.

전자현미경상은 slow scan CCD camera (Gatan USC 1000)로 고해상도 (Pixel size: 14μm)에서 비교적 넓은 영역 (28.7mm×28.7m)을 용이하게 기록할 수 있다.

상기 FE-TEM system에서 가능한 분석 기법에 관해서 구체적인 분석 사례를 갖고 설명하고자 한다.

#### - EDS/STEM 분석 기술

전계방출형 전자총 (이하 FE-gun)의 전자빔의 크기는 1.0nm 이하에 달하고 있고, 이를 이용한 박막 및 계면의 조성분석은 나노 공정 및 소자의 개발상에서 필수적이다. 조성분석 기법 중에서 에너지분산형 X선분광법 (이하 EDS) 분석은 가장 많이 이용되는 기법으로서, TEM의 관찰시야에서 원하는 영역을 선택해서, 원자번호 6번 이상의 원소 (Ultra-thin window의 경우)를 동시에 분석할 수 있다. 박막 TEM 시료에서는 입사전자기 시료중에서의 확산이 크지 않으므로 1.0nm 이하의 전자빔을 이용할 경우, 1.0nm 수준의 공간분해능에서 EDS 분석이 가능하다.

전자빔을 시료상의 1점에 조사하여 그 위치에서의 X선 spectrum을 얻는 분석법을 점 분석이라고 한다. 이에 반해서 주사투과전자현미경 (STEM)을 이용하여 전자빔을 시료상에서 2차원으로 주사하고, 특정의 특성X선의 강도를 측정하여 그 강도에 대한 휘도

변조를 주사신호와 일치시켜 CRT상에 표시하면 특성X선 강도의 2차원 분포상, 즉 원소 map이 얻어진다. 이 분석 기법은 원소의 분포를 2차원 관찰시야 (STEM상)와 비교하면서 확인할 수 있으므로 매우 편리한 방법이다.

그림 1에 FE-STEM/EDS 원소분석 사례를 나타내었다[1]. Si 소자에서 금속배선 공정인 Al-1%Si-0.5%Cu alloy/barrier Ti film 구조에서의 계면반응을 EDS 원소 map 기법으로 평가한 결과이다. 그림 1로부터 약 10nm 정도의 계면반응이 관찰되고 있고, 그것은 3개의 분리된 반응층으로 구별된다 (그림에서 A, B, C로 표시됨). 또한 digital 원소 map의 강도 profile의 해석으로부터 계면반응층의 조성비를 정량적으로 구할 수 있다. 그 결과로부터 C층은 Ti:Si=1:1, A층은 Ti:Al:Si=1:3:1로 구성되어 있는 것이 평가되었다[1].

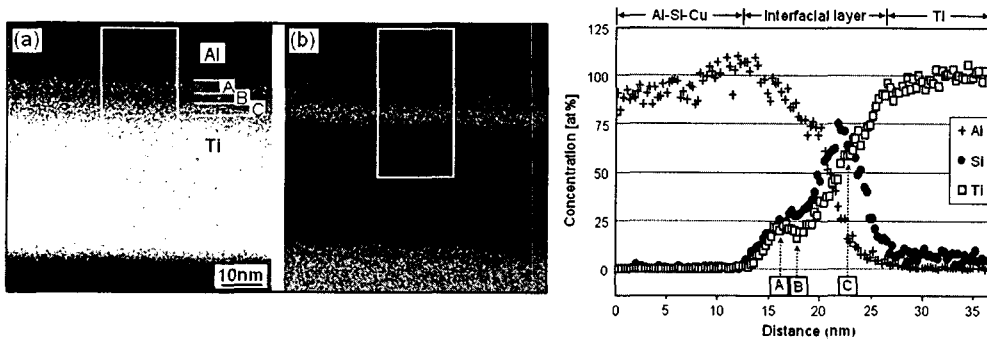


Fig. 1. EDS elemental maps of Ti (a) and Si (b) obtained in the Al-1%Si-0.5%Cu/Ti films. The concentration profile obtained from the EDS maps of Al, Si and Ti is shown in the right side of Fig. 1. A, B and C marked in the graph correspond to the interfacial layers indicated by A, B and C in the EDS map of Fig. 1(a).

### - Lorentz 전자현미경 기술

전자현미경을 이용해서 재료의 자구구조를 조사할 때, Lorentz 힘에 의한 전자의 편향을 이용하는데, 이 관찰방식을 Lorentz 현미경법이라고 한다. 통상의 전자현미경에서는 시료위치에서 ~2T 정도의 강한 대물 lens 자계가 걸려 있기 때문에 시료 중의 자구는 그 영향을 강하게 받아 자기적으로 포화되기도 하고, 자구배열에 변화가 생기게 된다. 따라서 본래의 자구구조를 평가하기 위해서는 대물 lens를 끄거나, 시료가 대물 lens의 자장에 영향을 받지 않도록 pole piece를 개조하는 작업을 해야 한다. 대물 lens를 끄는 방법은 간단하게 자계를 ~0.2mT 정도까지 줄일 수 있지만, 분해능 측면에서 한계가 있다. 펄센터에 설치될 FE-TEM은 단지 switch의 변환에 의해서 우수한 분해능의 Lorentz mode (점분해능: ~2.0nm, 자계: ~10mT)가 만들어지도록 설계되어 있어 용이하게 자구구조를 조사할 수 있다.

그림 2는 Sm-Co 자석에서 얻어진 Lorentz 현미경상으로서, defocus 방식 (Fresnel

mode)에 의해 촬영되었다. 그림 중에 삽입된 image는 in-focus 방식 (Foucault mode)에 의해 촬영된 결과로서, 보다 선명한 미세조직이 관찰되고 있다[2]. Sm-Co 자석은 cell 내부상인 2:17상과 cell 경계상인 1:5상으로 분리되고, step 시효처리에 의해서 보자력이 ~100kA/m에서 ~800kA/m로 급격하게 향상된다. 그림 2로부터 step 시효처리한 경우 (b), 자벽이 cell 경계상에서 pinning되어 있는 것이 관찰되고 있고, 이것이 이 자석의 자기 특성을 향상시킨 이유가 됨을 알 수 있다.

**- Electron Holography 기술**

FE-gun으로부터 방출된 전자빔은 높은 간섭성을 갖고 있고, 이것을 이용하여 전자파의 간섭실험을 수행할 수 있다. 전자파의 간섭상으로부터 결정하면에서의 전자의 위상 정보를 재생하는 것을 전자빔 holography라고 하고, 정전기장 및 자화분포의 평가 등에 응용되고 있다.

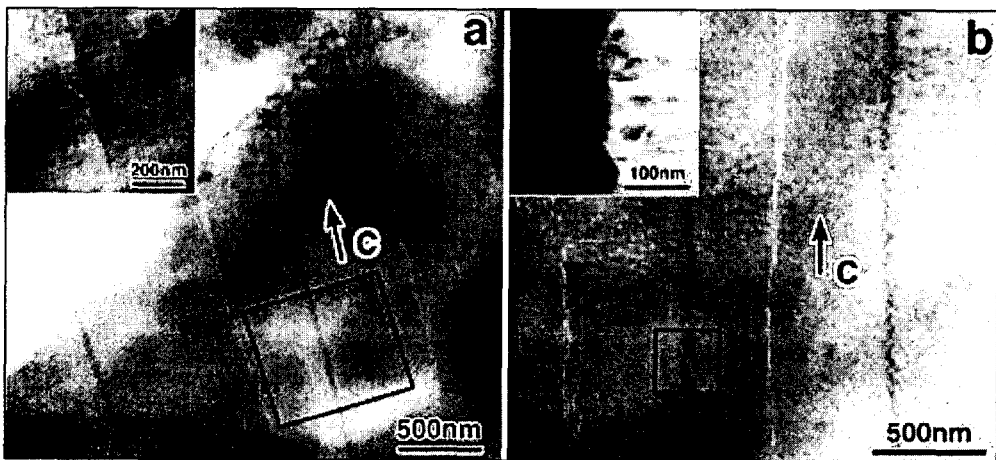


Fig. 2. Lorentz microscope images obtained from magnets without (a) and with (b) step aging.

그림 3은 그림 2와 동일한 시료에서 얻어진 holography 결과이다[3]. 소결처리만 된 자석의 경우 (a)에서는 자기력선의 분포가 단순한 형태이지만, step 시효처리 후 (b)에는 역동적인 분포를 갖고, 자화용이축으로부터 크게 이탈하고 있는 것이 관찰된다. 이것은 강한 pinning 효과를 보여주는 결과이고, step 시효처리에 의해서 첨가원소인 Cu가 cell 경계상으로 편석되었기 때문이다[4].

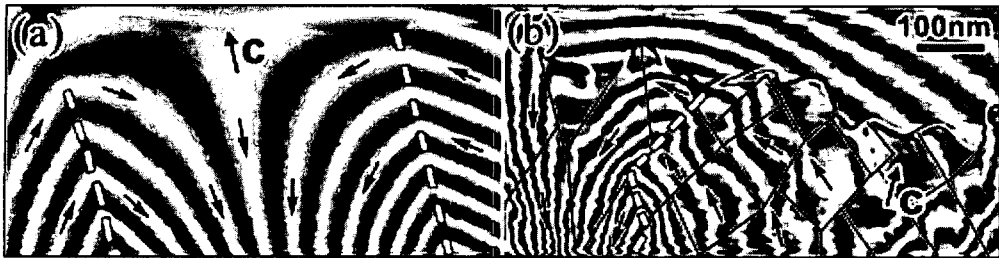


Fig. 3. Reconstructed phase images obtained from magnets without (a) and with (b) step aging. Arrows indicate the direction of lines of magnetic flux. The broken lines and solid lines correspond to the magnetic domain walls and the cell boundaries, respectively.

그림 4는 Si MOSFET의 접합 profile을 보여주는 holography 결과이다[5]. 일반적으로 Si 소자의 접합 profile은 이차이온질량분석기(SIMS)에 의해 깊이방향으로 분석되어지고 있으나, 2차원적인 profile을 얻기 위한 연구가 많이 진행되고 있다. 그 중에서 FE-TEM을 이용한 holography 방법은 우수한 공간분해능, 정량적인 평가 때문에 나노소자의 특성분석을 위해 최근에 주목받고 있는 기술이다. 그림 4에서 Si 소자의 N-MOS profile이 잘 관찰되고 있다.

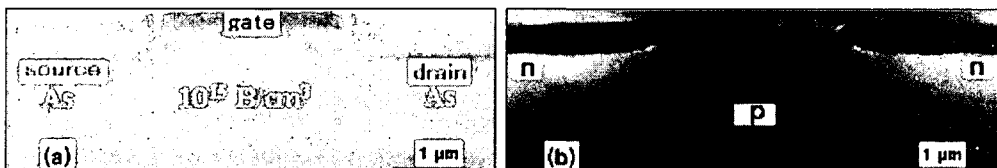


Fig. 4. Conventional TEM image (a) and reconstructed phase image (b) obtained from the Si MOSFET.

## 2-2. FE-SEM 및 DB-FIB

상기의 FE-TEM system외에 펌센터에는 전계방출형 주사전자현미경 (이하 FE-SEM)과 dual beam 집속이온빔 장치 (이하 DB-FIB)가 도입된다. FE-SEM은 nano-scale에서 bulk 시료의 표면 profile 관찰 및 EDS 성분분석이 가능하다. 이 FE-SEM에는 후방산란전자(BSE) 검출기도 장착되어 있어 원자번호 contrast 및 결정학적 정보를 검출할 수 있다.

FIB는 ion beam을 이용하여 관찰하면서, micro-scale에서의 특정위치를 ion beam으로 가공하는 장치이다. 이러한 기능 때문에 반도체의 회로수정, 단면분석에 주로 응용되고 있고, TEM 시료가공을 통한 특정위치의 불량분석에 이용되기도 한다.

Ga ion beam을 이용한 imaging은 시료에 damage를 쉽게 줄 수 있고, 분해능도 일반

SEM상에 비교할 때 매우 떨어진다. 이러한 단점을 보완하기 위해 최근에는 FIB에 SEM gun을 장착하여, SEM으로 관찰하고, FIB로 가공하는 DB-FIB가 개발되었다. 펌센터에 설치되는 FIB도 DB system으로서, FE-SEM을 이용한 nano-scale SEM 분석과 이의 나노분해능을 이용한 반도체 회로수정, 단면분석 및 특정위치 TEM 시편제작을 할 수 있다. 특히, 이 장비는 대형 반도체 회사 이외에는 설치된 곳이 없어 연구소 및 대학의 나노 연구상에서 큰 역할이 기대된다.

### 3. 결 론

펌센터 특성평가실에 설치되는 전자현미경 관련 장비는 크게 FE-TEM, FE-SEM, DB-FIB 장비로 분류할 수 있고, 일반분석 및 나노 특화분석 기능으로 나누어서 서비스를 수행할 것이다.

서비스 방향은 효율적인 시스템을 갖추고, 생산적인 마인드에서 접근하여, TAT 및 품질면에서 사용자의 실험실에서 장비를 이용하는 것과 동등한 수준의 분석 데이터를 제공하는 것이다. 또한 펌센터에서 상담 및 network 기능까지 해결할 수 있는 one-stop service를 지향한다.

### [참 고 문 헌]

- [1] J.-M. Yang *et al.*: J. Appl. Phys. 93, 855-858 (2003).
- [2] J.-M. Yang *et al.*: Materials Transactions, JIM 38, 363-366 (1997).
- [3] Y.-G. Park *et al.*: J. Electron Microsc. 53, 267-270 (2004).
- [4] 梁俊模 外: 日本金屬學會誌 63, 542-548 (1999).
- [5] 日本ファインセラミックスセンタ, "<http://www.jfcc.or.jp>".