

## 평면 표시형 구면경분석기의 분광 특성

정재인, A. Kurokawa\*, S. Ichimura\*, J. Toth\*\*, K. Yoshihara\*\*, 이영백\*\*\*

산업과학기술연구소 자동화부문, \*일본 전자기술종합연구소  
\*\*일본 금속재료기술연구소, \*\*\*선문대학교 물리학과  
(1996년 4월 30일 접수)

## Characteristics of Display-type Spherical Mirror Analyzer

J.I. Jeong, A. Kurokawa\*, S. Ichimura\*, J. Toth\*\*, K. Yoshihara\*\* and Y.P. Lee\*\*\*

Automation Division, RIST, Pohang 790-600, Korea  
\*Electrotechnical Laboratory, Umezono, Tsukuba 305, Japan  
\*\*National Research Institute for Metals, Sengen, Tsukuba 305, Japan  
\*\*\*Department of Physics, Sunmoon University, Asan 336-840, Korea  
(Received April 30, 1996)

**요 약** - 새로운 형태의 2차원 평면 표시형 구면경분석기를 제조하여 그 특성을 평가하였다. 이 분석기는 고체 내에서 여기되어 방출된 전자의 에너지와 각도분포를 측정해서 해석하는데 사용하기 위한 것으로 궁극적으로는 비파괴적으로 단층적인 정보를 얻는 표면전자단층해석법 (Surface Electron Spectroscopic Tomography: SET)를 개발하는 것을 목표로 하고 있다. 이 실험에 사용된 분석기는 H.Daimon 등이 개발한 것과 유사하나 외부에 미소 전자총을 사용한 점이 다르다. 그러나 미소전자총을 사용할 경우, 전자빔이 분석기에 인가된 전압에 의해 간섭을 받기 때문에 많은 문제점을 초래하게 된다. 본 연구에서는 이와 같은 경우에 발생된 제반 문제점과 이를 해결하기 위한 여러 가지 방안 그리고 조정된 분석기를 이용하여 실리콘 시편에서 얻은 Auger 스펙트럼의 해석을 주로 기술하였다.

**Abstract** - A new display-type spherical mirror analyzer has been characterized in terms of the performance and the Auger spectra taken by using it. The final goal with the analyzer is to develop SET (Surface Electron Spectroscopic Tomography) which is capable to provide a 3-dimensional layer-by-layer information nondestructively. This kind of analyzer was originally designed by H.Daimon. The main feature is to display 2-dimensional electronic structures directly onto a screen. In our case, an external micro-electron beam was employed as an excitation source. However, this invokes various problems because of the interference between the electron beam and the analyzer. The problems have been solved through the optimization of various parameters of the analyzer.

### 1. 서 론

어떤 점에서 방출되는 하전입자의 방출각도를 측정하는 것은 물리와 화학의 수많은 분야에 걸쳐서 기본적으로 매우 중요하다. 전자회절은 물론, 광전자의 각도분포 측정에 의한 에너지밴드 및 흡착위치의 결정, 광과 여기 전자에 의한 이탈이온의 방향측정을 통한 표면원자 위치의 결정 등에서 방출각도를 측정하여 그 정보를 얻고 있다. 그러나, 지금까지는 2차원 분포를 패턴으로 해서

보는 것은 매우 어려웠다. 대부분의 경우, 작은 입체각을 가진 에너지 분석기를 이용해서 일정한 각도의 에너지 스펙트럼을 얻어 특정 에너지의 피크강도를 측정한다. 다음 다시 검출기를 움직여 다른 각도에서 측정하고 이들을 조합하여 각도분포를 얻기 때문에 매우 많은 시간이 소요되는 단점이 있었다[1-3].

한편, 고체표면을 원자층 단위로 제어하면서, 결정구조와 조성이 잘 정의된 결정을 인공적으로 창제해나가는 것은 소자 등의 제작에 있어서 매우 중요한 기술 중

의 하나라고 할 수 있다. 이를 위해서는 제작된 박막의 평가를 위한 표면분석 기술의 진전이 불가결하다. 근년의 표면분석기술은 표면 최상층 원자구조의 관찰과 표면근방의 평균조성의 고감도 분석을 가능하게 하고 있다. 그러나 표면 최상층에서 수층에 걸쳐 각 층마다의 원자 배치에 관한 정보를 제공하는 단층적인 해석법은 개발되어 있지 않은 것이 현실이다.

본 연구는 고체 내에서 여기되어 방출된 전자의 에너지와 각도분포를 측정, 해석하여 비파괴적으로 단층적 정보를 얻는 표면전자단층해석법 (Surface Electron Spectroscopic Tomography: SET)를 개발하는 것을 목표로 하고 있다. 이것은 전자가 표층 내를 통과해서 탈출할 때 겪는 탄성산란 및 비탄성산란 현상이 표층에 존재하는 원소 및 그 구조배열에 의존하는 것을 이용해서 표층의 원자 조성과 배열의 3차원적 분포를 결정하고자 하는 것이다.

본 논문에서는 이 목적을 위해 제작된 장치의 개요를 설명하고, 새로이 제작된 분석기의 기본적 성능에 관한 결과를 기술하고자 한다. 제작된 분석기는 기본적으로 Daimon 등[4, 5]이 제안한 분석기와 유사한 형태를 띄고 있다. 이 분석기의 원리는 한마디로 “어느 일정한 에너지를 가진 입자의 방출각도 분포를 2차원상으로 표시하는 분석기”라 표현할 수 있다. 2차원상의 측정을 최초로 가능하게 한 것은 Eastman 등[6]으로 그들은 회전타원면을 이용한 복잡한 장치에서 2차원 측정을 가능하게 했다. 그러나 이 방법은 상이 왜곡되거나 입체각이 그다지 넓지 않고 제작이 곤란하다는 단점이 있어, 지금까지 거의 보급되지 않고 연구사례도 많지 않다. Daimon 등이 개발한 분석기는 상이 왜곡되지 않으며 전입체각을 측정할 수 있다는 장점이 있으며, 특히 제작이 용이하다. Daimon 등은 이 분석기를 이용하여 주로 광전자 분석 데이터를 많이 발표하고 있다[7-9]. 전자총을 여기원으로 사용한 경우에는 대부분 퍼텐셜이 존재하지 않는 분석기 내부에 저에너지 전자총을 설치하여 사용하고 있다. 한편, 미소영역을 분석하고 3차원적 해석을 행하기 위해서는 빔의 크기가 작고 주사가 가능한 미소전자총이 필요하게 되는데, 이는 분석기 내부 설치가 곤란하기 때문에 필연적으로 분석기 외부에 설치하여 전자빔이 분석기를 관통하지 않으면 안된다. 그러나 이 경우 전자빔이 분석기에 인가된 전압에 의해 간섭을 받기 때문에 많은 문제점을 초래하게 된다. 본 연구에서는 이와 같이 여기원으로 미소전자총을 이용할 경우 발생된 제반 문

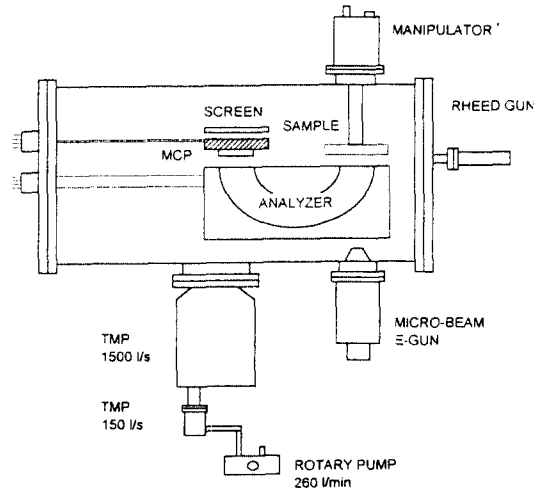


그림 1. 실험장치의 개략도.

제점과 이를 해결하기 위한 여러 가지 방안 그리고 실리콘 시편으로부터 얻은 Auger 스펙트럼의 해석을 주로 기술하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

그림 1은 본 실험에 사용된 장치의 개략도이다. 본 실험을 위한 장치의 구성요소로는 시료상의 미소면적을 여기시키기 위한 여기원, 시료에서 방출된 2차전자의 각도정보를 각 에너지별로 포집하는 분석기, 장시간 분석을 위해 오염을 최소화 할 수 있는 극고진공 환경, 그리고 각 층마다의 원자의 분포와 조성이 정의된 층구조를 가질 수 있도록 결정시료를 제작할 수 있는 박막 제조장치 등이다. 본 실험에 사용된 진공용기는 XHV (Extremely High Vacuum) 사양으로 되어있으며, 그림에는 표시되어 있지 않으나 박막제조 장비로 MBE (Molecular Beam Epitaxy)용 셀이 설치되어 있다. 여기 원으로는 Micro-Auger용 전자총(JEOL-7100EOS)을 이용하였으며, 전자빔이 분석기를 관통하여 시료에 수직으로 입사하도록 설치하였다 또한, 단층해석용 분석기로는 반구형 각도분해 에너지 분석기를 이용하였다. 검출기는 형광스크린이 달린 MCP (Micro Channel Plate)를 사용하였으며, 스크린의 2차원 화상으로부터 일정 에너지를 가진 2차전자의 각도분포를 얻을 수 있다. 장치의 배기는 두 개의 TMP(Turbomolecular Pump)를 이용하였는데 두번째의 TMP는 주펌프의 배기속도 향상

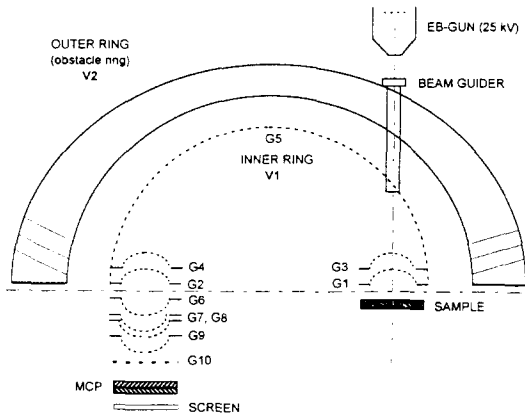


그림 2. 본 실험에 사용된 분석기의 확대 단면도.

을 위하여 사용된 것으로 배기속도가 주펌프의 약 1/10이 되는 것을 사용하였다. 진공용기의 체적은 약 100 l 정도였으며, 150°C에서 24시간 bakeout한 후의 진공도는  $3 \times 10^{-10}$  torr 이하가 되었다. 시편의 청정을 위해서는 시편홀더로 흑연이 코팅된 BN히터(PBN: Pyrolytic Boron Nitride)를 사용하였다.

그림 2는 본 실험에 사용된 분석기를 확대해서 그린 단면도이다. 외부링(outer ring)은 분해능의 향상을 위해 여러개의 장애링(obstacle ring)으로 되어 있다. 이 장애링은 원하는 에너지보다 높은 에너지의 전자를 흡수 또는 산란시켜 분해능의 각도 의존성을 최소화하며, constant pass energy 모드에서의 실험이 가능하도록 설계한 것이다[2]. 내부링(inner ring)은 그리드로 되어 있으며, 그 반경은 외부링의 약 절반 정도가 되도록 설계되어 있다. 앞으로의 설명을 위해 내부링에 가해지는 전압을 V1, 외부링에 가해지는 전압을 V2라 표기하였다. 본 분석기는 여러개의 그리드가 설치되어 있는데, G3, G4, G5는 대개 동일 퍼텐셜로 되어 있으며 G1, G2, G6은 일반적으로 접지된다. 외부에 설치된 전자총에서 발생된 전자빔을 시료에 보내기 위해 beam guider를 튜브형으로 만들어 분석기를 관통시켜 설치하였다. Aperture는 G6에 붙어 있으며, G6에서 G10 까지의 그리드는 일체형으로 되어 있다. 본 분석기가 Diamon 등이 사용한 것과 다른 것은 별도의 G2, G4가 붙어 있다는 것이다. 이는 저지전압을 인가해서 분해능의 향상을 피하기 위한 것이다.

그림 3은 데이터를 검출하기 위한 검출 시스템의 개략도이다. 전자빔에 의해 시료에서 방출된 전자는 분석

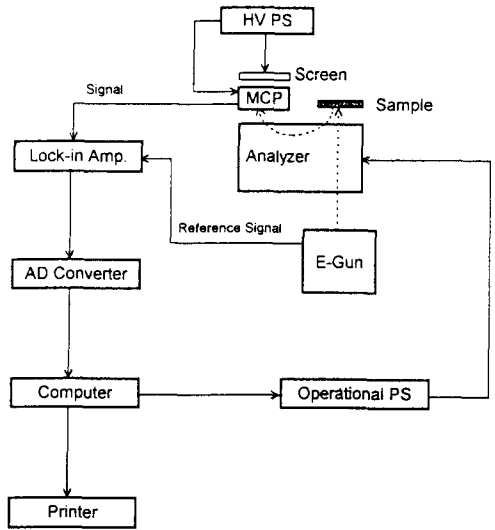


그림 3. 신호검출 시스템의 개략도.

기를 통과한 후 MCP에 들어간다. 이때 분석기에는 operational 전원에 의해 전압이 인가된다. 물론 이 전원은 컴퓨터에 의해서 제어된다. MCP에는 고압전원에 의해 고압이 걸려있다. MCP에 들어간 전자는 신호로 되어 증폭기로(lock-in amplifier)로 들어간다. 증폭기는 전자총에서 기준신호를 받아 이것과 MCP 신호를 비교해서 에너지별로 신호를 구분해서 AD 변환기를 통해 컴퓨터로 보낸다. 이러한 검출방법을 beam modulation 방법이라 한다. 본 연구에서는 분해능 측정을 위해 진공용기의 측면에 설치된 RHEED (Reflection High Energy Electron Defraction)층을 사용할 경우 pulse counting 방법을 이용하여 신호를 검출하기도 하였는데, 이 방법은 MCP에서 검출된 신호를 증폭기로 증폭시킨 다음 discriminator로 신호를 구분하여 컴퓨터로 보내는 방법이다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 분석기와 관련된 제반 문제점

본 실험에서 사용된 분석기와 관련하여 가장 큰 문제점으로 나타난 것은 전자빔이 분석기의 내부를 통해 입사되기 때문에 분석기에 전압이 가해지면 전자빔에 영향을 주어 빔의 위치와 전류가 변하는 현상이 나타난다는 것이다. 실험 데이터와 계산한 결과를 종합해 보면

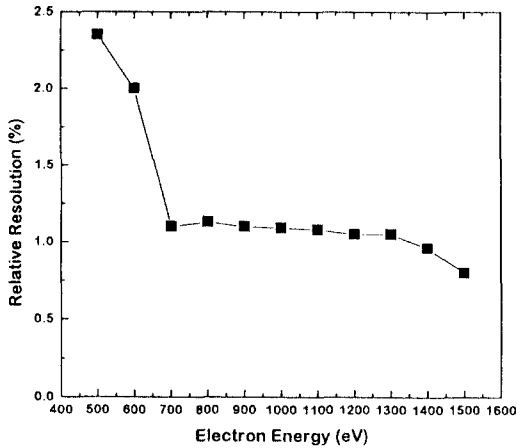


그림 4. RHEED총을 사용하였을 경우 에너지 변화에 따른 분석기의 상대 분해능의 변화를 보여주는 그래프.

beam guider가 접지되어 있을 경우  $E_k/E_p$ (여기서  $E_k$ 는 분석기에 인가된 전압이고  $E_p$ 는 전자빔의 에너지)가 0.1 일 때 시료 표면에서의 입사빔의 위치가 약 2 mm 정도의 변화를 보였다.

두번째의 문제점은 2차 전자 검출기로 MCP를 사용하였는데, stray 전자에 의한 background 증가를 들 수 있다. 본 연구에서는 이와 관련된 여러 가지 문제점과 이를 해결하기 위한 방안을 다각적으로 검토하였으며, 그 결과를 기술한다.

### 3.2. RHEED총에 의한 분석기의 분해능 측정

전자빔과 분석기의 간섭 문제를 배제시킨 상태에서 분석기의 분해능을 알기 위한 수단으로 분석기의 외부에 RHEED총을 설치하여 분해능을 측정하였다. 이때는 신호 검출방법으로 pulse counting 방법을 이용하였다. 이 경우 전자빔의 위치를 확인하기 위해 시료에 phosphor를 발라 사용하였다. 그림 4는 RHEED총을 사용하여 측정된 분석기의 상대 분해능을 에너지별로 나타낸 그림이다. 이때 측정된 빔의 에너지 영역은 500~1500 eV이었고, MCP에 인가한 전압은 1750 V, 빔 전류는 10~70 nA, 시료의 위치는 분석기에서 약 15 mm, 빔의 입사각은  $10^\circ$  그리고 사용된 시료는 실리콘이었다. 그림에서 보는 바와 같이 빔에너지가 700 eV 이상일 경우 대략 1.0%의 분해능을 보이고 있다. 빔에너지가 낮을 경우 분해능이 나쁜 것은 RHEED총의 특성상 focusing이 좋지 않아 발생된 현상으로 생각된다.

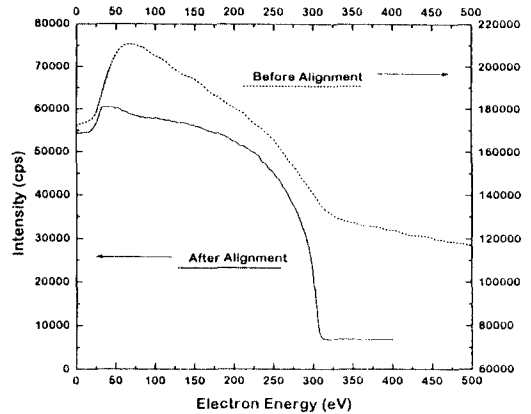


그림 5. MCP Alignment 전, 후의 분석기의 Output 특성의 비교.

### 3.3. 분석기의 제 특성

다음에서는 전자빔 간섭과 검출기와 관련된 문제점을 해결해 가면서 조사한 분석기의 여러 특성을 비교한다. 우선 빔가이드 튜브에 관련된 사항이다. 초기 튜브가 접지되어 있는 상황에서는 빔 위치의 변화와 튜브에 의한 분석기 내부의 퍼텐셜 왜곡으로 인해 실험이 사실상 불가능했다. 따라서, 튜브를 floating 시키되 표면 저항이 100 MΩ이 되는 유리(전자증폭기에 사용되는 재질)를 이용하여 퍼텐셜이 존재하지 않는 부분까지 확장 시켰다. 물론 이 튜브에 의한 이차전자의 산란이 예상되지만 반구 전체에 비해 매우 작은 입체각을 차지하므로 큰 문제가 되지 않았다. MCP와 관련하여서는 MCP의 주위를 스텐레스 판을 사용하여 완전히 shield시켰다. 지금부터의 모든 데이터는 튜브를 floating 시키고 MCP를 shield 시킨 후 얻은 데이터이다.

그림 5는 MCP의 위치를 alignment한 후 background를 확인하기 위해 분석기의 V2 전압을 -300 V로 고정시키고 그리드 G7을 Scan해서 얻은 데이터이다. 점선이 alignment 전이고, 실선이 alignment 후이다. 그림에서 알 수 있듯이 alignment 전과 후의 신호강도가 현격한 차이가 있으며, signal-to-noise 비율도 큰 차이가 나서 MCP의 위치가 매우 중요한 인자가 됨을 알 수 있었다. 그림 6은 분석기의 output 특성을 조사하기 위해 V2의 전압을 바꾸어 가면서 데이터를 얻은 후 그 스펙트럼을 미분한 것이다. 이들 미분 데이터의 신호강도와 폭이 signal-to-noise 비율 및 분해능과 연관되어 있으며, 여기서의 분해능은 약 5%로 앞의 3.2절 결과와 비교할 때

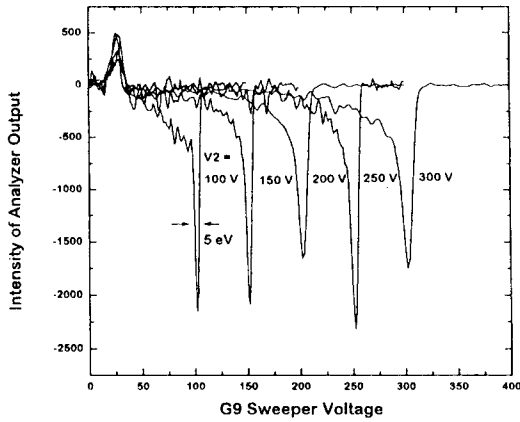


그림 6. Pass 에너지에 따른 분석기의 Output 특성.

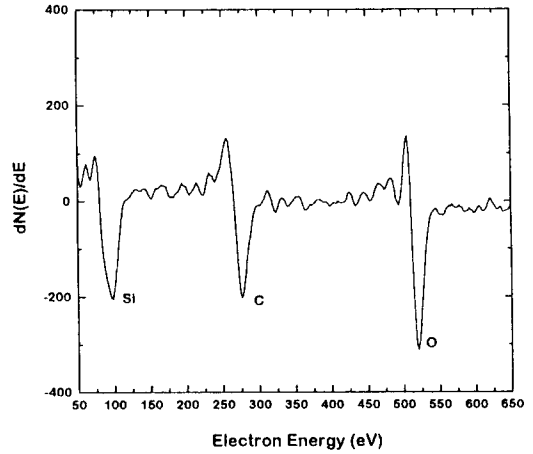


그림 8. 실리콘 표면에서 얻은 전형적인 Auger 전자분광의 미분 스펙트럼.

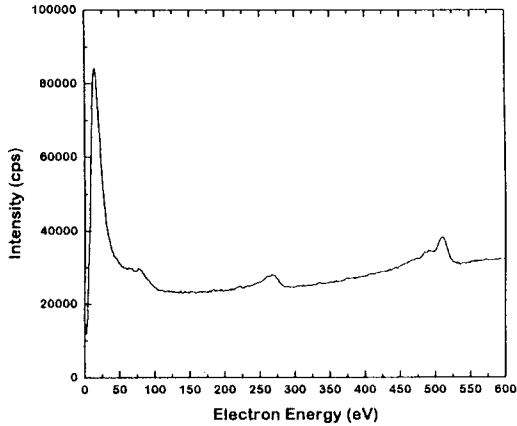


그림 7. 실리콘 표면에서 얻은 전형적인 Auger 전자분광 스펙트럼.

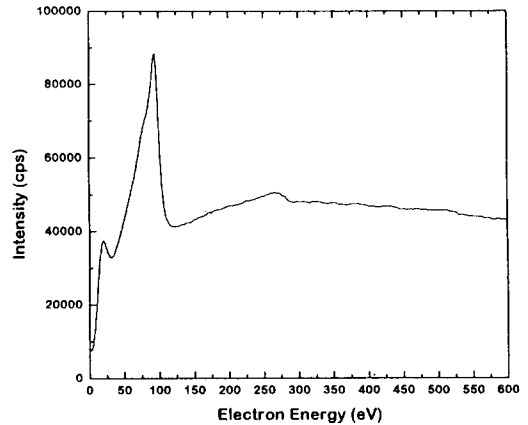


그림 9. 표면 청정후 실리콘 표면에서 얻은 Auger 전자분광 스펙트럼.

개선의 여지가 있음을 알 수 있다.

### 3.4. 실리콘 표면으로 부터의 Auger 피크

분석기를 충분히 optimize 한 후 실리콘 표면에서 방출되는 Auger 피크를 관측하였다. Auger 피크의 관측은 CRR (Constant Relative Resolution) 모드와 CPE (Constant Pass Energy) 모드에서 모두 관측하여 비교하였으며, CRR 모드일 경우 신호강도가 보다 높은 피크를 얻을 수 있었다. 따라서 뒤에 설명하는 모든 데이터는 CRR 모드에서 측정된 것이다. 그림 7은 청정되지 않은 실리콘(111) 표면에서 얻은 전형적인 Auger 피크들을 보여준다. 측정시 에너지 간격은 1 eV 였고 dwell

time은 400 ms였다. 통상의 Auger 전자분광 스펙트럼과 유사한 형태의 스펙트럼을 보여주고 있으며 특히, 산소 피크가 두 개로 분리되어 나타나 분해능도 우수함을 알 수 있다. 그림 8은 그림 7의 스펙트럼을 50~650 eV의 에너지 영역에서 7-point 미분하여 나타낸 그림이다. 청정되지 않은 실리콘 표면에서 전형적으로 나타나는 산소와 탄소피크가 잘 분리되어 나타남을 볼 수 있다. 그림 9는 시편을 가열하여 청정한 후 Auger 피크를 관측한 것인데 통상의 Auger 전자분광 스펙트럼과는 상당한 차이가 보임을 알 수 있다. 즉, 실리콘 LVV 피크의 신호강도가 2차전자에 기인하는 저에너지 피크의 신호강

도 보다 2배 이상 크게 나타난다는 것이다. 이는 본 분석기의 검출각도가 일반 분석기에 비해 훨씬 크기 때문에 나타나는 효과라고 생각된다. 이 피크를 이용하면 회절 패턴을 스크린 상에서 직접 관찰함에 있어 contrast가 매우 좋은 패턴을 얻을 수 있을 것으로 기대되며, 이 실험은 계속 진행중에 있다.

#### 4. 결 론

표면전자분광단층해석을 행하기 위한 장치를 제작하였으며, 이를 위해 새로운 분석기에 대한 특성 평가를 하였다. 이 장치는 미소 전자빔에 의한 2차전자의 각도 분포 측정을 행하는 것과 층구조를 가진 박막을 작성하는 것을 목표로 하고 있다. 분석기는 초기 상태에 여러 가지 문제점을 보였으나 이를 해결한 후 장치의 기본특성으로서 에너지 분해능 등을 확인하였다. 앞으로는 이를 이용하여 회절 패턴에 대한 2차원적 관찰은 물론, 궁극적으로는 박막에 대한 3차원적 정보를 제공하는 표면전자분광단층해석을 행하고자 한다.

#### 감사의 글

본 연구의 일부는 연세대학교 초미세표면과학연구센

터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

#### 참고문헌

1. H. Daimon, T. Kondow, and K. Kuchitsu, J. Phys. B **16**, 3453(1988).
2. T.E. Madey, R. Stockbauer, J.F. van der Veen, and D.E. Eastman, Phys. Rev. Lett. **45**, 187(1980).
3. D.G. Frank, N. Batina, T. Golden, F. Lu, and A.T. Hubbard, Science **247**, 182(1990).
4. H. Daimon, Rev. Sci. Instrum. **59**, 545(1988).
5. H. Daimon and S. Ino, Rev. Sci. Instrum. **61**, 57(1990).
6. D.E. Eastman, J.J. Donelon, N.C. Hien, and F.J. Himpsel, Nucl. Instrum. Methods **172**, 327(1980).
7. H. Daimon and S. Ino, Vacuum **41**, 215(1990).
8. H. Nishimoto, H. Daimon, S. Suga, Y. Tezuka, S. Ino, I. kato, F. Zenitani, and H. Soezima, Rev. Sci. Instrum. **64**, 2857(1990).
9. H. Daimon, 일본물리학회지 **49**, 448(1994).