

## 각분해 전자 에너지 분석기의 제작에 관한 연구

권순남 · 이명호 · 송호식 · 박소아 · 이충만 · 정광호

연세대학교 물리학과, 초미세 표면과학 연구센터  
(1998년 11월 25일 접수)

### The study on an angle resolving electron energy analyser

S. N. Kwon, M. H. Lee, H. S. Song, S. A. Park, C. M. Lee, K. Jeong

Department of Physics & Atomic-scale Surface Science Research Center,  
Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

(Received November 25, 19998)

**요 약** - Angle Resolved Ultraviolet Photoelectron Spectroscopy(ARUPS)용 전자 에너지 분석기를 제작하고 그 성능을 조사하였다. 독립적인 각 분해와 에너지 분해를 위하여 3전극 전자 렌즈 2개를 연이어 붙인 동심 반구형으로 제작하였다. 이 분석기의 성능을 조사하기 위하여 Cu(100)의 전자 에너지 구조를 연구하였다. 이 분석기의 최고 에너지 분해능은 40 meV 이하이고 각 분해능은 0.2°임을 확인할 수 있었다.

**Abstract** - An electron energy analyser for Angle Resolved Ultraviolet Photoelectron Spectroscopy (ARUPS) has been constructed and tested. This analyser consists of tandem 3 element electron lenses and two concentric hemispherical capacitors. Electronic structure of clean Cu(100) surface has been studied to test the feature of the analyser. The ultimate energy resolution is 40 meV and angle resolution is 0.2°.

### 1. 서 론

진공 기술이 급속도로 발전함에 따라 표면에 국한된 물리적 성질들을 연구할 수 있는 실험적 방법들이 다양하게 나타나고 있다. 그 중 ARUPS는 표면의 전자 에너지 구조를 직접 측정할 수 있는 실험 방법으로, 표면 물리학의 중요한 도구로서 사용되고 있다. ARUPS 실험은 다음과 같은 방법으로 연구할 수 있다. 우선 고체 시료의 일 함수 보다 큰 에너지를 가지는 자외선을 시료에 조사하여, 이로부터 광 여기된 전자의 운동 에너지와 방출된 각도를 측정한다. 이 정보로부터 시료에서 전자가 차지 하고 있었던 2차원 역격자 공간 상의 에너지 band 구조를 직접 이끌어낼 수 있다.

따라서 전자 에너지 분석기는 에너지 뿐 아니라 각 분해 기능도 수행해야한다. 각 분해를 하기 위해서는 전자의 에너지를 분석하기에 앞서, 입력되는 전자를 정해진 각도 이하로 제한시켜 주는 장치가 필요하다. 이러한 이유로 ARUPS용 전자 에너지 분석기에는 전자 렌즈의

성능이 매우 중요하다. 전자 렌즈는 각 분해 이외에도 또 다른 중요한 역할을 하는데, 그것은 전자에너지 분석기의 성능을 향상시키는 역할이다. 전자 렌즈가 없는 에너지 분석기들의 경우, 그 에너지 분해능은 분석되는 전자의 에너지에 의존하므로 모든 전자 에너지 영역에 걸쳐 균일한 에너지 분해능을 얻을 수 없다. 그런데 전자 렌즈를 사용하면 이러한 결점을 보완할 수 있을 뿐 아니라 분석기의 최고 에너지 분해능을 향상시킬 수 있다. 그러므로 전자 렌즈의 설계는 ARUPS 실험 장치 제작에 가장 중요한 요소가 된다. 본 연구에서는 3전극 렌즈 2개를 사용하여 첫 번째 렌즈가 각 분해를 하고 두 번째 렌즈가 전자의 에너지를 scaling하도록 하였다. 이 방법은 Kevan[1]의 설계를 이용한 것이다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 에너지 분석기를 설계할 때 고려했던 이론적인 부분에 대해서 기술하였고 3절에서는 이 분석기의 성능 조사를 위한 실험에 대해서 설명하였고 4절에서는 성능 평가와 함께 앞으로 개선할 사항을 설명하였다.

## 2. 에너지 분석기 설계

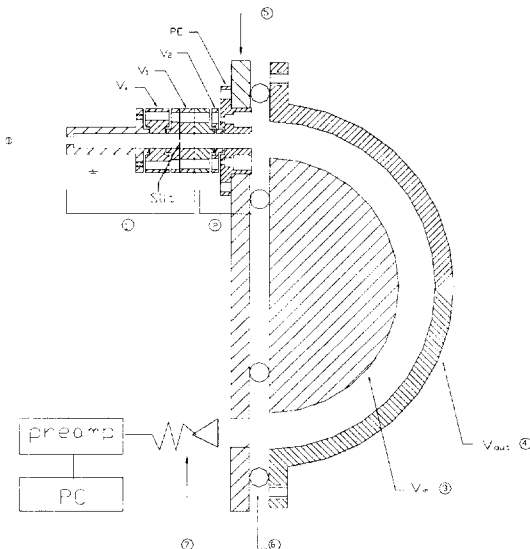
ARUPS에 사용할 수 있는 전자 에너지 분석기는 각 분해를 할 수 있도록 렌즈 장치가 쉬워야 하므로 Cylindrical Deflection Analyser(CDA)나 Spherical Deflection Analyser(SDA)를 사용할 수 있는데 본 연구에서는 SDA를 사용하였다. SDA는 동심형 반구 2개로 이루어져 있어서, 전자가 이 사이를 정확한 원형 궤도를 그리면서 통과하려면 이 전자의 원심력과 반구들 사이의 정전 전기력이 서로 상쇄되어야 하는 성질을 이용한 것이다. 본 연구에서는 평균 반경이 50 mm인 동심 반구형 분석기를 OFHC(Oxygen Free High Conductivity) Copper로 제작하였고 반구의 표면에 carbon 코팅을 하여 모든 전극이 균일한 전위를 가지도록 하였다. Fig. 1은 제작한 분석기의 개략도이다.

이 분석기의 에너지 분해능은 아래와 같은 식으로 표현할 수 있다[2].

$$\Delta E = \frac{\Delta S_{en} + \Delta S_{ex}}{2R_o} PE + \alpha_i^2 * PE \approx \frac{\Delta S_{en}}{2R_o} PE$$

$\Delta S_{en}$  : 입구 슬릿의 직경,  $\Delta S_{ex}$  : 출구 슬릿의 직경,  
 $R_o$  : 분석기의 평균 반경,  $\alpha_i$  : 입력 전자의 각 편차  
 $PE$  : 통과에너지

여기서  $\Delta S_{ex}$ 와  $\alpha_i$ 는 무시할 수 있는 값이므로, 에너지



**Fig. 1.** Schematic Diagram of Energy Analyser. ① 첫 번째 렌즈, ② 두번째 렌즈, ③ 안쪽 반구 ④ 바깥쪽 반구 ⑤ 반구 지지판 ⑥ 절연용 sapphire ball, ⑦ 전자 multiplier.

분해능은 분석기의 평균 반경과 입력되는 전자의 상의 크기, 그리고 통과 에너지에 의존함을 알 수 있다. 입력되는 전자의 상의 크기가 1 mm일 때 이 분석기의 이론적인 최고 에너지 분해능은 0.01\*PE 이다.

ARUPS용 분석기에서 렌즈의 역할은 각 분해와, 입력 전자 에너지 맞추기 등 2 가지로 나눌 수 있다. 따라서 렌즈 2개를 연결하여 각각이 다른 역할을 수행하도록 하였다. 첫 번째 렌즈는 각 분해용으로, 두 번째는 전자 에너지 맞추기 용으로 설계하였다. 첫 번째 렌즈의 각 분해 기능은 다음과 같은 Helmholtz-Langrange 관계식으로 나타낼 수 있다[3].

$$\alpha_s = \frac{w_a}{w_s} \sqrt{\frac{E_a}{E_s}} \alpha_a$$

$\alpha_s$  : 각 분해능,  $\alpha_a$  : 슬릿에 의해 정해지는 입력 각도,  
 $w_s$  : 시료에 조사되는 광의 직경,  $w_a$  : 슬릿의 직경  
 $E_s/E_a$  : 전자의 감(가)속 비율

이 식으로부터 각 분해능은 첫 번째 렌즈 끝 부분에 있는 슬릿의 기하학적 구조와 렌즈의 가(감)속 비율에 의해 결정된다는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 각 분해능이 0.2°가 되도록 슬릿의 크기를 결정하였다.

두 번째 렌즈는 첫 번째 렌즈 뒤에 바로 연결되어 있는데, 이 렌즈는 첫 번째에서 각 분해가 이루어진 전자의 운동 에너지를 분석기의 통과 에너지와 같게 되도록 전자를 가(감)속 시키는 역할을 한다. 이때 중요한 요소는 이 렌즈를 통과한 전자의 상의 크기가 일정해야 한다는 것이다. 이 렌즈의 가(감)속 비율은 분석하는 전자의 운동 에너지에 따라 연속적으로 바뀌므로, 전자의 상의 크기가 일정 하려면 Fig. 1의  $V_2$ 에 해당되는 초점 전위도 전자의 에너지에 따라 변화해야 한다. 이 전위는 전자의 운동 에너지(KE)와 통과 에너지(PE)의 함수로 나타낼 수 있다[4].

$$V_2 = f(KE, PE)$$

이 함수는 전자 궤적 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 구했다. Fig. 2는 이 값에 대한 그래프이다.

ARUPS 실험을 하기 위해서는 2방향 각 분해가 필요하므로 본 연구에서는 UHV 환경에서 서로 독립적인 2방향 회전이 가능하도록 goniometer를 제작하였고 이 위에 분석기 시스템을 장착하였다. 시료 홀더도 독립적인 2방향 회전이 가능하도록 제작하였다. 이 시료 홀더는 SUS 304로 제작하였고 액체 질소를 이용한 저온 실

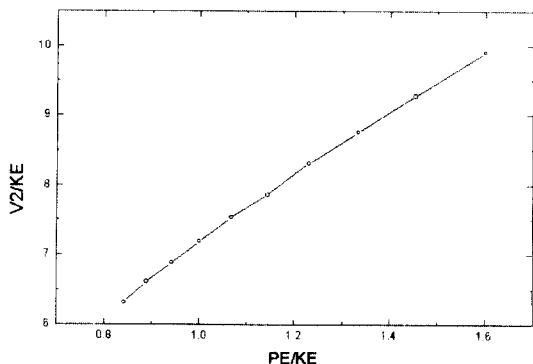


Fig. 2. Potential curve applied to second Lens as a function of PE/KE.

힘이 가능하도록 하였다. 온도 측정 결과 200K까지 온도를 낮출 수 있었다. 또한 전자 충돌 가열 방식으로 시료를 2000K까지 가열할 수 있도록 하였다.

### 3. 분석기 분해능 확인

제작된 분석기의 분해능은 Cu(100)의 surface state와 시료 홀더의 Fermi edge를 분석하여 조사할 수 있었다. Cu(100)은 Ar ion sputtering과 annealing을 반복적으로 하여 깨끗한 표면을 준비하고 Low Energy Electron Diffraction(LEED)을 이용하여 표면의 방향을 결정한 후  $\Sigma$  symmetry 방향으로 분석기를 위치할 수 있었다. 이 방향으로 각도에 따른 valence band의 EDC(Energy Distribution Curve)를 얻었고 이 결과와 Heimann(5)의 결과를 비교해 보았다. Heimann이 사용한 분석기는 동심 반구형 분석기로, 에너지 분해능이 60 meV, 각 분해능이 2°라고 발표하였다. Fig. 3(a)은 본 연구에서 구한 EDC이고 Fig. 3(b)는 Heimann의 결과이다. 광원은 He I (21.2 eV)이고 시료의 표면의 수직 방향에 대해 40° 각으로 입사 시켰다. 그림으로부터 두 결과가 유사한 형태를 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 특히 60°의 surface peak는 Heimann의 결과와 정확히 일치하고 있다. 그러나 50°와 70° off normal 데이터에는 Surface peak이 나타나기는 하지만 Heimann의 결과 처럼 확연히 드러나고 있지는 않고 있다. 또한 10°, 20° off normal 데이터의 경우 -3.5 eV, -3.8 eV 근처의 peak이 본 연구의 결과에는 나타나지 않고 있다.

Fig. 4는 M point에서 얻은 EDC이다. 이 spectrum을 background를 제거한 후  $E_F$ 가 -3 eV에서 -1 eV인 영역

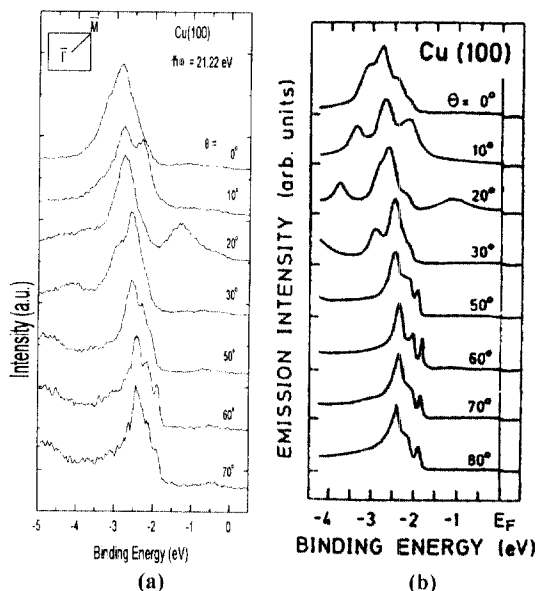


Fig. 3. Angle Resolved EDC of Cu(100) along (010) direction (a) 본 연구에서 얻은 결과 (b) Heimann의 결과.

에 대해서 3 peak Lorentian fitting을 하였다. 그 결과 surface peak의 FWHM은 100 meV임을 확인할 수 있었다. 이 값은 통과 에너지가 16 eV 일 때의 이론적인 에너지 분해능인 160 meV 보다 작은 값이다. 또한 Fig. 5는 -24 eV로 Bias를 걸어준 시료 홀더에서 방출된 secondary 전자의 Fermi edge를 300 K에 대한 Fermi 분포함수로 fitting한 결과이다[6]. 그 fitting 함수는 아래와 같다.

$$f = 4.19 + \frac{15.12}{e^{(KE-41.2)/k_B T} + 1}$$

이 결과에 의하면 실험에서 얻은 데이터와 300 K에서

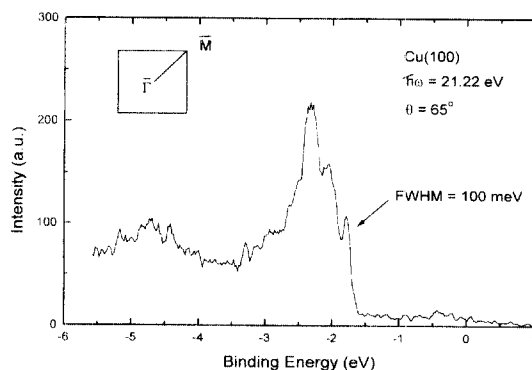


Fig. 4. Cu(100) surface state of bar M point  $E_F = -1.8$  eV인 surface peak의 FWHM이 100 meV이다.

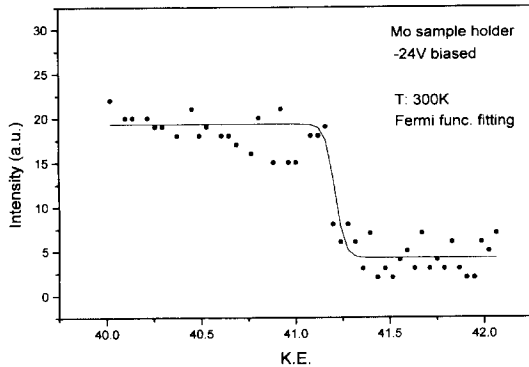


Fig. 5. Femi edge of Mo Sample holder. 상온에서  $-24\text{ V}$  bias 걸어준 Mo 시료 홀더의 Fermi edge. Fermi edge의 반폭치가  $100\text{ meV}$ 이다.

이론적으로 가지는 스펙트럼의 분포가 정확히 일치함을 알 수 있다. fitting 결과 이 Fermi edge의 반폭치가  $100\text{ meV}$ 임을 알 수 있는데 이 값으로부터 분석기의 에너지 분해능은  $100\text{ meV}$ 이하임을 확인할 수 있다. 이 결과는 PE를  $16\text{ eV}$ 로 하여 얻은 값이므로 이론 값인  $160\text{ meV}$ 보다 작은 값이다. 위 실험에서 PE를  $16\text{ eV}$ 로 설정하였던 것은 PE를 더 작은 값으로 하면 검출되는 신호의 세기가 작기 때문이었다. 이 결과로부터 PE를 본 연구에서 설정한 최소한의 값인  $4\text{ eV}$ 로 하여 추정하여 보면, 분석기의 최고 분해능은  $40\text{ meV}$ 보다 작은 값을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론 및 개선점

본 연구에서는 독립적인 3전극 전자 렌즈 2개를 연이어 붙인 평균 반경이  $50\text{ mm}$ 인 전자 에너지 분석기를

제작하였고 그 성능을 조사하여 보았다. 성능 조사를 위해  $\text{Cu}(100)$  시료의 전자 에너지 구조를 분석하여 보았는데 그 결과가 이미 발표된 결과와 일치함을 확인하였고, 분석기의 에너지 분해능을 평가할 수 있었다. 실험 결과, 분석기의 각 분해능은  $0.2^\circ$ , 최고 에너지 분해능은  $0.01*PE$ 임을 확인하였다.

이 분석기는 앞으로 더 개선할 여지가 남아있다. 에너지 분해능을 향상시키기 위해서는 렌즈에 사용한 슬릿의 직경을 더 작게 할 수 있다. 또한 현재 사용한 렌즈는 3전극 렌즈이나 4전극 렌즈를 사용하면 상의 크기를 더 작고 균일하게 할 수 있다.

#### 감사의 글

이 논문은 95년 연세 대학교 학술 연구비 지원에 의하여 연구된 것이다.

#### 참고문헌

1. S. D. Kevan, *Rev. Sci. Instrum.* **54**, 1441 (1983).
2. A. Septier, *Applied Charged Particle Optics: Part B*, p. 267 (Academic Press 1980).
3. P. A. Sturrock, *Static and Dynamic Electron Optics* (Cambridge University, Cambridge, 1955).
4. E. Harting and F. H. Read, *Electrostatic Lenses* (Elsevier, Amsterdam, 1976).
5. P. Heimann, J. Hermanson and H. Miosga, *Phys. Rev. B* **20**, 3059 (1979).
6. Stefan Hufner, *Photoelectron Spectroscopy*, p. 7. (Springer-Verlag 1995).