

Field terminator를 이용한 CMA 제작에 관한 연구

이충만 · 성면창 · 권순남 · 정광호

연세대 물리학과
(1996년 4월 24일 접수)

The study on CMA using field terminator

C. M. Lee, M. C. Sung, S. N. Kwon and K. Jeong

Department of Physics, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea
(Received April 24, 1996)

요 약 - Field terminator를 이용하여 single path cylindrical mirror analyser를 제작하였다. 먼저 컴퓨터 모의 실험을 바탕으로 CMA의 원통형 전극양단에서 fringing field effect를 최소로 하여 log-scale의 등전위면을 그대로 유지하는 terminator의 전압비와 위치 등을 구하였다. 계산된 전압을 직렬로 연결된 금속산화물저항으로 만든 voltage divider로 field terminator에 직접 인가하여 CMA의 fringing field effect를 줄이는 방법을 개발하였다. 이 방법으로 제작된 CMA의 분해능이 $\Delta E/E = 0.4\%$ 이상임을 확인하였다.

Abstract - We constructed a single path cylindrical mirror analyser(CMA) using field terminator method. With computer simulation, the best fit voltage ratio and position of the field terminator was determined which maintain log-scale equipotential line near both end of the CMA. Then we construct field terminator with voltage divider of metal-oxide resistors which reduces the fringe field effect. The resolving power of the CMA was better than $\Delta E/E = 0.4\%$.

1. 서 론

표면기술과 진공기술의 발달에 따라 X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)나 Auger electron spectroscopy (AES) 등에 사용되는 전자에너지 분석기의 분해능은 지속적으로 향상되어 왔고, 특히 K. Siegbahn을 시작으로 분석기의 전자 에너지 분해능과 전자 투과율 등이 많이 연구 되었다. 정전위형(electrostatic analyser) 전자 에너지 분석기는 그 모양과 기능에 따라 여러 가지가 있고 대표적인 것으로는 cylindrical deflection analyser (CDA), concentric hemispherical analyser (CHA), plane mirror analyser (PMA), retarding field analyser (RFA), concentric mirror analyser (CMA)가 있는데 각 분석기들마다 각기 고유한 특징이 있다. 이 가운데서도 CMA는 원통대칭의 기하구조로서 투과율이 크고 집속 입체각이 가장 큰 장점이 있다[1, 2]. 따라서 현재 간단한 구조와 제작상의 용이함으로 인해

XPS나 AES용의 전자에너지 분석 장비로 널리 쓰이고 있다[3, 4]. 1966년 Zashkvara는 CMA가 원통 중심축에서 입사각 42.3° , 각편차 $\delta\alpha = 6^\circ$ 로 입사되는 전자에 대해서 2차 집속한다는 CMA의 중요한 특성을 발견하였고 뒤를 이은 연구들을 통해 간단한 기하구조와 뛰어난 분해능으로서 분석기중 가장 우수한 성능을 가지게 알려졌다[5, 6]. CMA는 기본적으로 반경이 각각 r_1 과 r_2 인 무한히 긴 두개의 동심축 상 원통형 전극사이에 형성되는 $\ln(r_2/r_1)$ 에 비례하는 log-scale의 전위에 의해 전자의 궤적이 에너지값에 따라 달라지는 것을 이용한 것이다. 내부전극의 전위가 접지된 경우 입구슬릿과 출구슬릿에서는 전위차가 없으므로 SDA, CDA 등에서의와 같은 분석기 입구와 출구에서의 기하학적 대칭성 소멸에 의한 fringing field effect는 나타나지 않는다. 그러나 실제 CMA는 유한한 길이의 동축원통으로 되어 있기 때문에 원통전극의 끝 부분에서는 fringing field effect에 의해 등전위면이 원통전극의 가운데 부

분과 달리 변형된다. 이렇게 되면 전자의 궤적이 원통 전극의 양끝에 가까운 실제의 경우 이론과 달라 CMA의 집속효과를 현저히 낮게 하는 요인이 된다. Fringing field에 의한 오차는 CMA에서 뿐 아니라 모든 정전위형 분석기에서 나타나며, 이 효과를 없애기 위해 여러 방법이 고안되고 있다. 지금까지 사용되고 있는 방법으로는 기존전극의 모양을 변형하는 경우와 보조전극을 사용하는 두 가지로 나눌 수 있는데 이런 보조전극을 field terminator라 한다. 예를 들면 CHA의 경우에 있어서 fringing field effect를 줄이기 위한 방법으로 정의진은 high resolution electron energy loss spectroscopy (HREELS)용 반경 100 mm CHA의 herzog plate와 반구형 전극 사이에 원관형 탄소 보조전극을 만들어 분해능을 3 meV 까지 향상시켰다고 보고했다[7]. 또한 Ibach는 1990년에 CDA의 분해능을 1 meV 까지 얻었다고 보고했다[8].

이 논문은 종래의 사용하던 CMA의 분해능에 많은 영향을 주는 fringing field effect를 효과적으로 제거하고 높은 분해능에 도달할 수 있게 개선한 것이 특징이다. 지금까지 주로 사용되는 방법으로는 원통대칭전극의 양끝단에 몇 개의 고리모양 전극을 동심원으로 배치함으로써 이 전극주위를 지나는 fringing field가 적당히 변형되어 원래의 등전위면에 가깝도록 한 것으로 이 전극들이 외부와 차단됨으로 생기는 부작용이 발생할 우려가 많았다. 무엇보다도 컴퓨터 모의실험시 전극의 전위를 미리 결정해야만 하는 경우는 이런 조건과 맞지 않는다. 또다른 방법으로는 고저항의 금속산화물막막을 테플론이나 세라믹표면에 형성하는 것으로 고저항막에 의한 전위면을 조절함으로써 fringing field를 줄일 수 있으나 제작이 용이하지 않는 단점이 있다.

본 연구의 방법은 앞에 기술한 두 가지를 동시에 적용한 것이다. 즉 고리모양의 동심원 보조전극 사이를 고저항을 이용하여 연결하고 이를 이용 보조전극의 전위를 결정한다. 이 방법의 장점은 컴퓨터 모의 실험으로 전자의 궤적을 정확하게 알 수 있으며 따라서 fringing field effect를 줄이고 전자 궤적의 2차 집속이 가장 잘 되는 보조전극의 크기와 위치 및 전위를 결정할 수 있을 뿐 아니라 제작이 쉽고 간편하다는 것이다.

이렇게 설계 제작된 보조전극을 적용한 single path cylindrical mirror analyser를 조립하고, channeltron의 전자검출부를 설계 제작 조립하였다. 제작된 CMA의 특성은 AES를 통하여 C, Ag, 특성피크로 확인하였다.

2. 모의실험 및 제작

CMA 제작을 위해서 우선 기본적인 원통형 전극의 크기와 slit의 위치를 결정해야 한다. 무한길이의 이상적인 경우에 있어 분해능에 영향을 미치는 요소를 고려하고 이 결과와 컴퓨터모의실험을 하여 최적조건을 찾았다.

E_0 의 운동에너지를 가진 전자가 원통대칭 중심 z축상의 점 S에서 출발하여 전위차가 V이며 반경 r_1 의 내부전극과 반경 r_2 의 외부전극으로 이루어진 CMA의 slit부분을 통과하여 집속점 F에 도달했을 때의 관계식은 다음과 같다.

$$E_0 = \frac{K_0 e}{r_2} V \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (1)$$

여기서 K_0 는 CMA 특성상수값인 1.3099로 전자는 입사각 $\alpha = 42.3^\circ$ 일 때 각편차 $\delta\alpha = 6''$ 에서 2차 집속(focusing)된다. 입사전자의 초기위치 S와 상점 F 사이의 z축상에서의 이동거리 L은

$$L = 6.12r_1 \quad (2)$$

로 r_1 에 따라 결정된다[9]. 또한 전자의 최대변이 r_m 은

$$r_m = r_1 \exp[1.3099 \sin^2(\alpha + \delta\alpha)] \quad (3)$$

로 r_2 의 결정을 하는데 있어 중요하다[10]. r_m 은 내부전극의 반경 r_1 에 의해 결정된다. 전자의 입사각 분산에 의해 집속은 실제로는 중심축에서 약간 떨어진 곳에 위치한다. 따라서 실제로 입사된 전자는 중심축상의 점이 아닌 링 모양으로 집속된다. 링슬릿의 반경 r_c 는 아래와 같이 된다[11].

$$r_c = r_1 5.28(\delta\alpha)^2 \quad (4)$$

이와 같은 조건을 만족하는 CMA를 설계했다 하더라도 분석기의 성능은 분해능과 통과율에 의해 결정된다. 몇 가지 계산에 의해

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{2.2}{L} \Delta L + 5.55(\delta\alpha)^3 - 1.68 \left(\frac{\Delta E}{E_0} \right) \delta\alpha \quad (5)$$

전자원의 크기를 고려한 경우의 분해능은 다음과 같다[14].

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{2.2}{L} \Delta S + 5.55(\delta\alpha)^3 \quad (6)$$

이와 같이 L과 전자원의 크기 S도 분해능에 영향을 미친다[13].

또한 입자의 w의 폭을 가진 슬릿의 경우 분해능은 아래와 같다[12].

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{0.18w}{r_1} + 1.375(\delta\alpha)^3 \quad (8)$$

w값은 작을수록 좋으나 실제로는 통과율을 고려하여 설계한다. 이와 같은 수식들로부터 CMA의 설계는 전

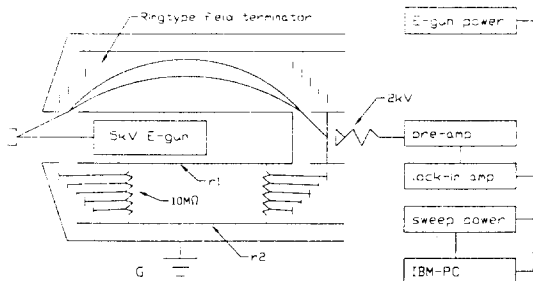


그림 1. 제작된 CMA와 Auger electron spectroscopy의 개념도. r_1 과 r_2 사이에 10 MΩ 저항으로 field terminator가 연결되어 있다.

극의 길이가 무한할 때의 경우이며 전극의 길이가 유한한 경우 컴퓨터모의 실험에서는 fringing field effect의 영향이 큰 것으로 나타났다. 전자의 궤적이 두 전극의 끝단에 가까이 통과할 경우 더욱 오차가 커짐을 예상할 수 있고 컴퓨터 모의 실험의 결과를 보면 식1의 이론치와 상당한 차이를 나타낸다 [그림 2a]. 이와 달리 field terminator를 사용하였을 때는 fringing field effect가 거의 상쇄되어 식 1에서의 계산치와 같은 에너지값에서 전자가 집속됨을 알 수 있다[그림 2b].

이 결과를 바탕으로 CMA는 [그림 1]과 같이 양쪽 끝단의 field terminator용 ring전극 각각 5개 그리고 field terminator용 저항으로 보조전극이 구성되었다. 보조전극의 모양, 위치와 크기는 몇 번의 시행착오를 거쳐서 완성된 것이다. 그리고 보조전극의 전위는 MΩ 단위의 저항을 직렬로 연결하여 voltage divider를 만들어 직접 인가 하였다. 이 방법은 앞에서 기술한 바와 같이 단순히 외부와 절연된 도체를 두거나 혹은 고저항의 물질로 만든 field terminator와는 다른 방법이다. 모의실험에 의해 형성된 등전위면의 개략은 [그림 2]를 통해 알 수 있다. 이렇게 구성된 CMA와, 두개의 ring slit, Teflon insulator, channeltron 그리고 2 keV-5 keV

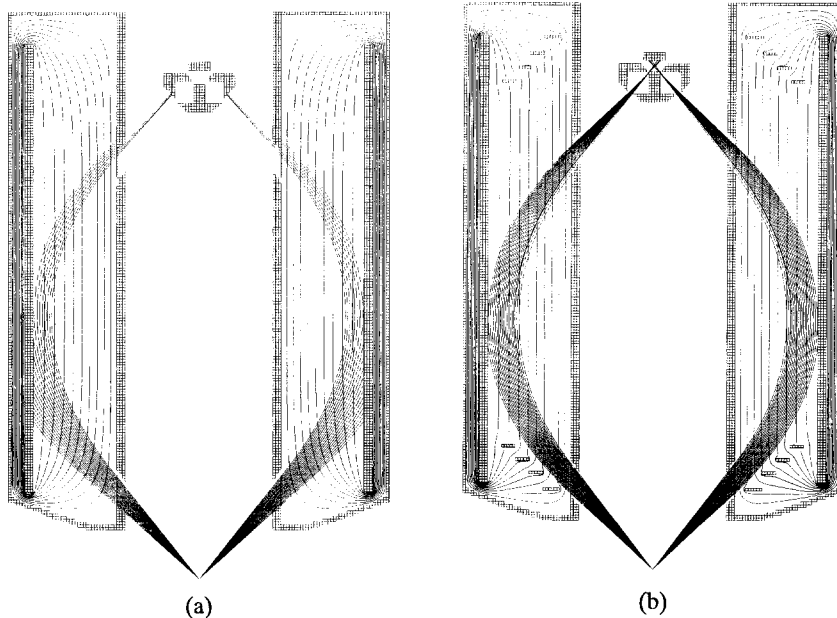


그림 2. field terminator가 없을때와 있을때의 전자궤적. (a)는 식(1)으로 계산된 전자의 에너지 값과 그에따른 궤적이 fringing field의 영향으로 집속되지 않음. (b)는 보정된 것으로 이론값에 거의 일치하는 전자궤적을 이룬다.

에너지 영역의 TV용 전자총으로 AES를 구성하였다. CMA의 실제 크기를 8 inch port의 크기에 맞추어 $r_1 = 30$ mm로 했고, Auger전자가 발생하는 위치 S에서 전자들이 집속 되는 상 F 까지의 거리 $L = 183.6$ mm로 했다. 그리고 r_2 는 r_m 보다 큰 값인 60 mm로 했다. 입사각과 전체 길이가 결정되면 입구 슬릿과 출구 슬릿의 위치를 결정할 수 있다. 입구 슬릿 위치는 내부 원통 끝단에서 11.8 mm, 출구 슬릿은 126.2 mm 지점에 위치한다. 각분산 $\delta\alpha = 6^\circ$ 정도는 에너지분해능에 크게 영향을 주지 않으므로 전자 투과율을 높이기 위해 $\delta\alpha = 6^\circ$ 로 하여 입구와 출구 슬릿폭을 7.5 mm로 했고, 슬릿면은 45° 로 처리하였고 슬릿을 내부원통을 따라 길이 21.25 mm, 간격 2 mm로 8개를 만들었다. 그리고 분석기 내에서 다중산란된 2차 전자의 영향을 줄이기 위하여 2단의 링슬릿을 장치하였다. 그리고 CMA내부의 일함수를 균일하게 하고자 탄소피막을 전극에 입혔다. 보조 전극을 통하여 μA 정도의 직류전류가 내부전극과 외

부전극 사이를 흐르므로 앙페르 법칙에 의한 자기장이 유도된다. 이에 의한 자기장의 세기는 계산에 의하면 거리가 10-20 mm 떨어진 전자 궤적 위치에서 수 μ gauss였다. 따라서 흐르는 전류에 의한 자기장의 영향은 무시할 수 있다. 에너지 분석의 방식은 내부 원통 r_1 과 시료는 접지시키고 외부 원통 r_2 의 전압을 변화시키면서 전자들을 select하는 등가속 방식(constant acceleration mode)을 사용하였다. 내부 원통에 나있는 슬릿 부분에서 전위 분포 일그러짐에 의해 전자 궤도가 받는 영향을 최소화하기 위해 원통슬릿 위에 통과율 90%의 텅스텐 mesh를 씌웠다.

CMA의 주요 분석 대상인 2차 전자들은 대체로 큰 운동에너지를 갖기 때문에 궤적이 지구 자기장에 크게 영향을 받지 않지만, 분석기 내에서의 전자 궤적이 상당히 길므로 편향될 수 있다. 이런 효과는 고분해능을 요하는 전자 에너지 분석기에서는 치명적이다. 낮은 에너지의 전자는 지자기(earth magnetization)나 분석기 주변 자기장의 영향을 많이 받으므로 분석기 외부를 μ -metal shielding 하였다. 분석기 부품들은 자성에 민감하지 않는 스테인레스 SUS 316과 알루미늄을 주로 사용하여 제작하였다.

그리고 신호를 처리하기 위하여서는 IBM PC에 AD/DA board를 설치하여 외부원통 전극의 전위를 sweep 하면서 pre-amp로 들어온 pulse를 count-mode로 적분신호를 얻고 동시에 lock-in amp를 사용하여 미분신호도 받을 수 있게 하였다.

표 1. 분석기의 분해능 상수

분석기	집속각도	A	B	C	n
CDA	127°	2/R ₀	4/3	1	2
CHA	180°	1/R ₀	1	0	2
PMA	45°	1/L	2	1	2
CMA	42.3°	2.2/L	5.55	0	3

분해능 $R = \Delta E/E = A\Delta S + B\alpha^n + C\beta^n$, ΔS 는 슬릿의 크기 α 는 단면의 편각, CMA에서 $\beta = 0$

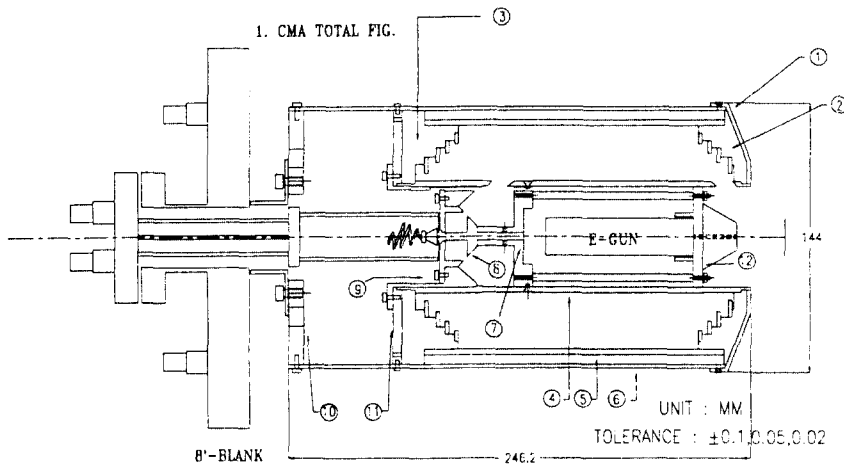


그림 3. 실제 제작된 single path CMA의 도면 ① shielding cover ② 10 ml 저항의 field terminator ③ Teflon insulator. ④ r_1 내부 전극 ⑤ r_2 외부전극 ⑥ μ -metal shielding. ⑦⑧ 2중 링슬릿 ⑨ channeltron tube ⑩⑪ 전극지지대 ⑫ 2~5 keV 전자총.

3. 결 과

모의 실험으로 *fringing field effect*를 최소로 하는 *field terminator*의 위치와 전위를 결정하고 이를 바탕으로 *single path CMA*를 제작하였다. 새로운 방법으로 고안된 *field terminator*를 부착한 *CMA*의 최대 분해능을 알아보고자 먼저 깨끗하지 않은 *Cu(100)* 시료에서 *back scattering*된 1차 전자 *primary* 피크의 반폭치 (*FWHM*)를 조사하였다. 실험결과 [그림 4]에서와 같이 *data*의 적분형과 1차 미분형에 대해서 $E/\Delta E = 3017 \text{ eV} / 10 \text{ eV} \sim 300$, $\Delta E/E < 0.4\%$ 를 얻었다. *Primary peak* 아래쪽에 탄소의 1차 에너지 손실 *peak* (*plasmon*)은 *primary*보다 약 35 eV 아래 존재한다[15]. 그러나 그림상의 *peak*이 *primary peak*에 비해서 높이의 비가 약 1/7로서

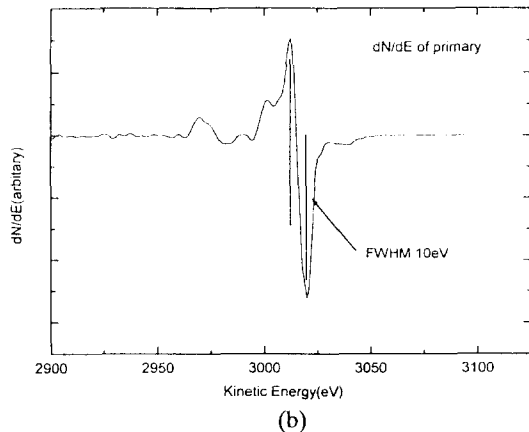
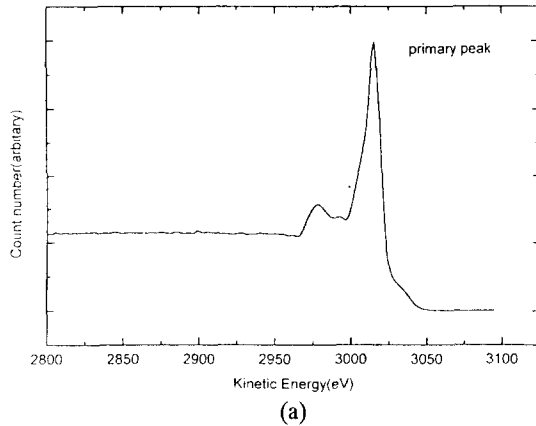


그림 4. 에너지 3 keV의 *primary electron*의 *back scattering peak*. (a) *primary electron* 3050 eV의 적분신호 (b) *primary peak*의 1차 미분신호 $\Delta E/E = 10 \text{ eV} / 3010 \text{ eV} < 0.4\%$.

대개의 경우에 1/10 이하로 *plasmon peak*이 관찰되는 것을 감안하고 또한 *plasmon*의 2차 *peak*이 불분명하며 전자총의 조건에 따라 *peak*의 모양이 변화하는 것이 관찰되었으므로 이 *peak*은 탄소의 *plasmon*이라기보다는 *primary beam*에 조사되는 시료의 위치가 *CMA* 축상에서 어긋나 생긴 *split*이라 생각된다. 그리고 *primary*의 1차 미분그래프를 보면 *primary*에 대해 약 $\pm 15 \text{ eV}$ 위치에 작은 둔덕이 있음은 1차 전자 *beam*의 집속이 균일하지 않음을 보여준다. 이 결과는 컴퓨터 모의실험시 측으로부터 약 0.5 mm 떨어진 경우 *primary*의 에너지가 3 keV일 때 15 eV 정도의 슬릿 통과에너지의(*path energy*) 오차를 가짐과 거의 일치한다. 이것은 *beam*의 반경이 크다는 것을 의미하며 이것은 TV용 전자총에 *hairpin filament*를 부착하여 사용할 때 조립시 발생한 전자총에 의한 오차들로서 전자총의 *emission*과 *focus* 조정시 *primary*의 모양이 약간씩 변화한다는 사실이 전자총에 기인한 오차임을 보여주는 것으로 전자의 위치를 세밀하게 조절할 수 있고 또한 *beam*의 세기가 *gaussian* 분포를 취하는 보다 나은 성능의 전자총을 사용하면 개선할 수 있는 것이다. *CMA*의 *fringing field effect*를 줄여 줌으로서 실험실 환경에서 AES를 제작하여도 상당히 좋은 결과를 얻었다. [그림 5]은 Ag 박막의 AES결과이다. 제작된 *CMA*를 Auger전자 분석기로 사용하여 *CMA*의 끝부분 효과와 자기장의 영향을 최대한 배제한 상태에서 Si 기판위의 Ag박막 시료를 조사하였다. 탄소가 표면에 많이 분포하고 있으며 Ag의 351 eV와 356 eV의 두 MNN *peak*이 분리가 됨을 알 수 있다 [17]. *CMA*를 등가속방법(*constant acceleration mode*)으

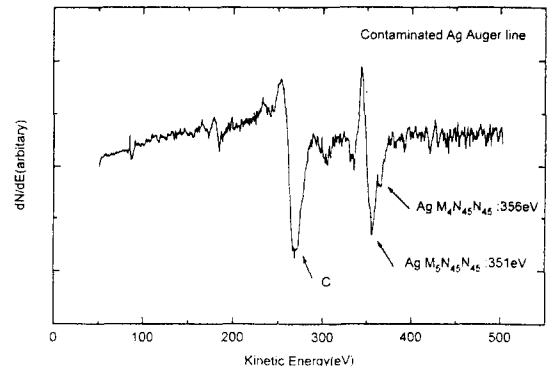


그림 5. 오염된 Si 기판위의 Ag 박막의 Auger *data*. Carbon의 Auger 신호와 Ag의 $M_4N_45N_45$ Auger 신호인 351 eV와 $M_5N_45N_45$ 의 356 eV를 확인 할 수 있다.

로 쓰는 경우 이론적으로 얻을 수 있는 가장 좋은 분해능은 0.25%이며 실제로 아주 정밀한 경우 0.3%정도까지 분해능을 얻을 수 있다고 한다[15, 16].

Field terminator 를 이용하여 제작한 CMA는 0.4%보다 좋은 분해능을 보여 주었다. 이 결과는 앞에서 사용한 TV용 전자총의 집속이나 정렬등을 감안하면 보조전극을 이용한 field terminator 방법이 매우 우수함을 알 수 있다. 현재 보다 좋은 분해능을 얻으려면 다음과 같은 개선이 필요하다.

첫째, 무엇보다 기하적인 대칭이 중요하므로 부품가공이나 조립시 정밀함과 CMA중심 축 방향의 정렬이 우선 되어야 하고 CMA의 전극 r_2 에 인가하는 전압의 변화를 현재의 0.76 V 보다 미세하게 해야한다.

둘째, 성능이 우수한 전자총을 사용하여 1차 전자의 집속도와 분석기의 중심축으로의 입사정도를 높여야 한다.

셋째, CMA전극을 흑연피막을 균일하게 입힘으로서 전극의 일함수를 균일하게 유지함과 2차 산란전자의 검출기로의 유입을 최대한 줄여야 한다.

감사의 글

본 연구는 96년도 교육부 기초과학 육성연구비(과제번호 : BSRI-96-2426)의 지원과 연세대학교 초미세 표면과학 연구센터의 연구비 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. Chang, C. C., Surf. Sci. **25**, 53 (1971).
2. Taylor, N. J., The technique of Auger electron spectroscopy in surface analysis. Tech. Met. Res. **7**,

- 117-119(1972).
3. M. Prutton, *Surface Physics*, 2nd ed. (Cordon Press, Oxford, 1983).
4. E. W. Plummer and W. Eberhardt, *Advances in Chemical Physics* (Wiley, New York, 1982), Vol. 49.
5. G. Ertl and J. Kuppers, *Low energy electron and Surface Chemistry*, 2nd ed. (Weinhein, 1985).
6. Zashkvara, V. V., and Korsunskii, M. I., and Kosmachev, O., S. (1966). Zh. Tech. Fiz. **36**, 132.
7. Eue-Jin Jeong, Obserbation of odd symmetry surface phonon modes on Ni(100) and Ag(100) surface using the new multichannel HREELS., dissertation of Ph. D. (Univ. of Texas at Austin, 1989) pp. 70-83.
8. H. Ibach, Surf. sci. 299/300, 116-128 (1994).
9. G. Vassilev, J. Baudon, G. Rahmat, and M. Barat, Rev. Sci. Instrum., **42**, 1222 (1971).
10. H. Sarel, Rev. Sci. Instrum., **38**, 1210 (1967).
11. Y. Ballu, *High Resolution Electron Spectroscopy*, pp. 291-296, (Academic Press, 1980).
12. H. Hafner, J. A. Simpson and C. E. Kuyatte, Rev. Sci. Inst., **39**, 33 (1968).9. H. Z. Sar-El, Rev. Sci. Instrum., **41**, 561 (1970).
13. S. Risely, Rev. Sci. Instrum., **43**, 95 (1972).
14. D. Roy, and J. D. Carette, J. Appl. Physics, **42**, 3601 (1971).
15. D. Briggs and M. P. Seah, *Practical Surface Analysis*, 2nd. ed chapter 1 and 5. (John Wiley & Sons Ltd. 1990).
16. Graham C. Smith, *Surface Analysis by Electron Spectroscopy*. pp. 26-52(Plenum press 1994).
17. L. E. Davis, N. C. MacDonald, P. W. Palmberg, G. E. Riach and R. E. Weber, *Handbook of Auger Electron Spectroscopy*, 2nd ed., Phycal Electronics Industries Inc., Minnesota (1976).