

세라믹스의 표면 분석 기법 및 응용

한규호, 김대암, 심재현, 조남희
 인하대학교 재료공학부
 nhcho@inha.ac.kr

1. 서론

20세기 중반 이후 과학기술이 급속도로 발전 되어감에 따라 고기능 및 새로운 특성을 가진 재료가 요구되어지고 있으며, 세라믹스에서도 고전 세라믹스(classical ceramics)로부터 첨단 세라믹스(advanced ceramics)로의 전환이 가속화되어가고 있다. 고전 세라믹스에서는 재료 내 미소한 불순물의 양이 크게 중요시되지 않으며, 구조 또한 3차원의 벌크(bulk)형이므로 단순한 분석 방법만으로 그 특성 평가를 만족시킬 수 있다. 그러나 세라믹스가 반도체 분야에서 그 중요성이 크게 부각되면서 세라믹스에서 미소 불순물의 양을 제어하는 것이 중요해졌으며, 박막형 세라믹스의 필요성이 요구되어지면서 구조 또한 2차원의 형태를 가지게 되었다. 이러한 2차원 구조를 가지는 박막 분석뿐 아니라 정교한 박막 재료를 위해서는 기판 표면 또는 성장면의 분석이 필수적이며, 따라서 새로운 재료 분석 기법(표면 분석 기법)이 요구되어진다.

박막재료의 연구와 개발에는 박막 내 화학조성, 미세 구조 및 결함구조의 인위적인 조절이 전체 활동의 상당 부분을 차지하고 있다. 따라서 재료의 미시적인 구조와 거시적인 성질간의 상관관계 및 제조공정에 따른 변화를 규명할 수 있는 보다 향상된 재료 특성 평가 기법의 효과적인 이용이 필수 불가결하며 그 필요성이 크게 대두되고 있다.

본 고에서는 박막 공학에서 이용되는 표면 분석 기법의 원리 및 그 응용 예를 중심으로 소개하려 한다. 표면 분석 기법에는 각 분석 기법마다 그 특징과 한계가 있으므로 적합한 표면 분석 기법을 선택하는 것이 매우 중요

하며, 이를 통해 보다 빠르고 효과적으로 필요한 분석을 수행할 수 있을 것이다. 표면 분석 기법은 거의 대부분이 재료 외부에서 가해 준 에너지 또는 가속입자와 고체와의 상호 반응의 결과로 나타나는 물리적, 화학적인 현상에 그 기초를 두고 있다.

2. 표면 분석 기법의 종류, 원리 및 응용

현재 연구활동에 이용되고 있는 표면 분석 기법은 그 종류가 매우 다양하다. 시료의 극부적인 영역으로부터 원소의 종류 및 분포를 분석한다는 점은 서로 유사하다. 그러나 분석하는 원리 면에서는 서로 다른 물리적, 화학적 현상에 기초를 두고 있거나 입사원이 다른 에너지 영역을 사용하기 때문에 분석 기법의 종류에 따라서 그 검출범위, 원소에 대한 민감도 그리고 특징에는 서로 차이가 있다.

표면 분석 기법으로는 XPS(X-ray Photoelectron Spectroscopy), UPS(UV-Photoelectron Spectroscopy), AES(Auger Electron Spectroscopy), SIMS(Secondary Ion Mass Spectroscopy), ISS(Ion Scattering Spectroscopy), RBS(Rutherford Backscattering Spectroscopy), LEED(Low Energy Electron Diffraction), EPMA(Electron Probe x-ray Micro Analyzer), XMA(X-ray Micro-Analysis) 등 그 종류가 매우 다양하다. 하지만 여기에서는 가장 널리 사용되는 기법인 XPS, AES 그리고 RBS의 원리 및 그 응용에 대해 서술하고자 한다.

2.1. XPS

최근 10여 년 동안 XPS는 고체 표면과 계면의 구성

원소나 화학결합 상태를 밝혀내는 전자 분광법의 하나로 다양한 첨단 재료의 연구에 널리 이용되면서 새로운 연구분야로 각광받고 있다. XPS 분석은 1960년대부터 시작되었으며, 특히 고분해능을 가진 광전자 분광학이 1967년에 스웨덴 Uppsala 대학의 물리학자인 Kai Siegbahn에 의해 개발된 이후^{1,2)} 표면분석 기법으로 그 사용이 증가되어 왔다. XPS는 광원으로 X-선을 이용하여 내부전자로부터 광전자를 방출시켜 광전자의 운동 에너지를 측정함으로써 미소한 에너지 차이로부터 가지고 표면의 구성원소와 화학적 결합상태까지도 알아낼 수 있다.

일정한 에너지의 광자를 원자나 분자에 쏘이게 되면 식(1)과 같이 여기된 이온과 광전자가 발생한다.



식(1)에서 A는 원자나 분자이고, $h\nu$ 는 X-선 광자의 에너지이며, A^+ 는 여기된 이온이고, e^- 는 광전자이다. 이 때 방출된 광전자의 운동에너지 E_k 는 식 (2)에서와 같이 X-선 광자의 특성에너지 $h\nu$ 에서 core 준위의 결합 에너지 E_b 와 분광계의 일함수 ϕ 를 뺀 값이 된다.

$$E_k = h\nu - E_b - \phi \quad (2)$$

E_k 와 ϕ 는 측정 가능하므로 기지(既知)의 조사된 광전자 에너지($h\nu$)와 함께 원자 내 전자의 결합 에너지(E_b)가 유도된다. 이 결합 에너지는 원자의 고유한 값(예 : Cls 전자 284 eV, O1s 전자 532 eV, Si 2p 3/2 99 eV 등)을 갖기 때문에 표면에서 방출되는 광전자의 스펙트럼을 관측함으로써 표면의 조성, 화학적 결합상태 및 구성 원소를 정량 분석할 수 있다.^{3,4)}

XPS 장치는 크게 X-선원(x-ray source), 전자에너지 분석기와 검출기로 이루어져 있다.

Fig. 1은 XPS 장치의 모식도를 보여준다. X-선원은 모든 원소로부터 강한 photoelectron peak을 방출할 수 있을만큼 충분히 큰 photon energy여야 한다. 이상적인 전원으로는 보통 Mg 또는 Al을 사용하거나 $AlK\alpha$ 와 $MgK\alpha$ photon을 낼 수 있는 두 개의 anode 배열을 가지

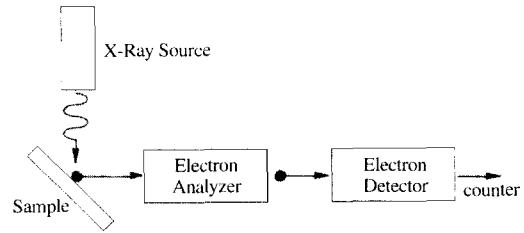


Fig. 1. Schematic diagram of a XPS system.

고 있어 서로 스위칭(switching)하면서 사용할 수 있는 복수 X-선관이 많이 사용된다. 전자에너지 분석기는 방출되는 광전자를 운동에너지의 크기에 따라 분리한다. 분석기의 형태로는 retarding grid를 사용하는 감속 전압 방식과 magnetic type, electrostatic type을 이용하는 분산 방법이 있다. 여러 가지의 전자에너지 분석기가 개발되었으나 가장 널리 사용되는 것은 Concentric Hemispherical Analyzer(CHA)이다. 이 분석기는 pass energy를 분석기의 앞부분에 설치한 감속 전극으로 일정하게 변화시키면서 분해능을 조절할 수 있으며 스펙트럼의 전 영역에 걸쳐 분해할 수 있다.

XPS가 표면 분석 기법으로 이용되는 것은 거의 모든 물질의 내부에서 전자들의 운동 에너지가 얼마이든 상관없이 그 평균 자유 행로(mean free path)가 짧다는 데에 기인한다. Fig. 2는 전자의 평균 자유 행로에 대한 전자 운동 에너지의 의존성을 보여준다. 운동 에너지가 1

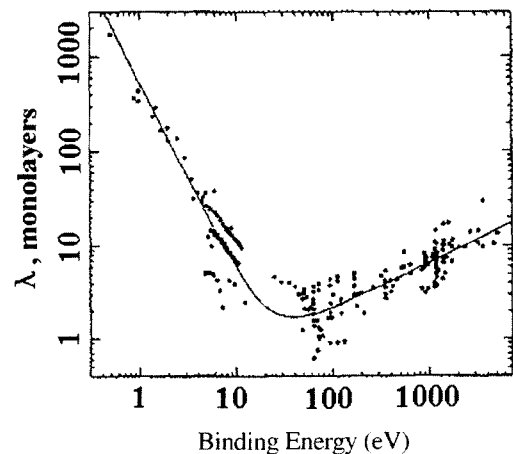


Fig. 2. Variation of electron mean free path with electron energy.

eV 이하부터 약 6 keV까지의 넓은 영역에서 변할 때에 그 평균 자유 행로가 단위자 층으로 1000 층 이내이며 약 1 keV 부근에서는 10 층 이내임이 잘 도시되어 있다.⁵⁾ 평균 자유 행로보다 더 깊은 곳에서 방출되는 자유 전자는 표면 층을 벗어나기 전에 충돌을 거치게 되며 이 과정에서 그 운동 에너지를 조금씩 잃게 된다. 이러한 전자는 표면 밖으로 나오더라도 고유한 운동 에너지 값을 더 이상 지니지 못하기 때문에 원래 자신이 속해 있던 원자의 정보를 제공하지 못하며, 따라서 스펙트럼의 바탕(background)에만 기여하게 된다. 표면으로부터 평균 자유 행로 정도의 깊이 이내에서 방출되는 광전자들은 충돌을 거치지 않고 표면 층 바깥으로 나와 분석기에 도달하므로 스펙트럼에서 특성 광전자 피크를 보이게 되고 이러한 전자들만이 자신이 속해 있던 원자의 정보를 제공한다. 결국 표면 층에 있는 원자들로부터 방출되는 전자들만이 의미를 가지므로 XPS 기법이 표면에 대단히 민감하며, 이 점은 표면 분석에 이용될 수 있다. XPS 분석시, X-선 입사빔을 사용하기 때문에 시편의 전기 전도성에 무관하게 표면 분석을 수행할 수 있으나, 매우 국부적인 조사(radiation)가 어렵기 때문에 특정 영역(~nm)으로부터 화학적인 정보를 얻기 어렵다는 단점이 있다.

XPS는 원소분석, 상태분석, 정량분석, 수직 분포 분석(depth profile) 등에 쉽고 정확한 분석 기법으로서 이용된다. 원소의 확인을 위해서는 전 에너지 영역을 wide scan 하는데 이때 구성 원소들은 고유한 광전자선을 나타내므로 Li 이상의 원자번호를 갖는 원소에 대한 분석이 가능하다. 그러나 일반적으로 시료 중에 함유된 원소

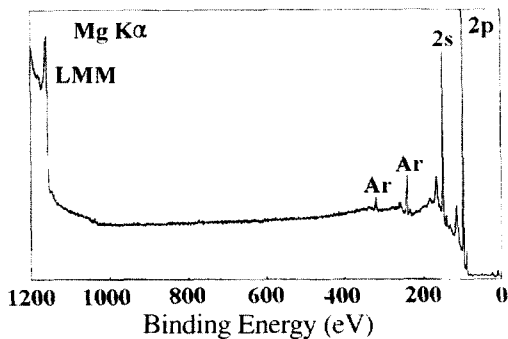


Fig. 3. XPS spectra of pure Si.

의 예측이 가능하다는 전제조건을 갖고 있어야 하므로 미지 시료에 대해서는 비슷한 결합에너지를 갖는 원소가 있기 때문에 원소 분석이 복잡해진다. 이 경우에는 다른 분석 기법을 병행하여야 한다. Fig. 3은 순수 Si에 대한 XPS wide scan의 결과를 나타낸다. Si의 2s와 2p에 해당하는 피크가 명확하게 분리되어 있음을 알 수 있다. 화합물의 경우에도 이와 같이 결합 에너지와 그 전자 궤도의 차이에 따라 명확하게 분리된 피크를 나타내게 되며 이로부터 원소분석이 가능해진다.

전자의 결합 에너지는 화학상태에 따라 달라지며 이 값은 수 eV 범위 내에서 변화하므로 이 값으로부터 화학상태를 알 수 있다. 이러한 미소한 에너지 차이를 화학적 이동(chemical shift)이라 하는데 같은 종류의 원자들이라도 그 원자들이 처해 있는 화학적 상태가 다르게 되면 이들의 결합 에너지에 조금씩 차이가 나는 현상을 의미한다. 원자가 처해 있는 화학적 환경은 형식적 산화 상태(formal oxidation state), 분자의 환경, 격자 자리 등의 차이에 따라 다르다. 이 화학적 이동을 이용하면 원자들의 화학적인 정보를 얻게 되므로 XPS를 화학 분석에 아주 유용하게 쓸 수 있게 된다. Fig. 4는 Si 기판 위에 성장시킨 Si:H 박막의 Si2p XPS 결과를 보여준다. Fig. 4(a)는 박막의 표면에 대한 XPS 결과이며, (b)는 1분간 시편의 표면을 이온 스퍼터링(ion sputtering) 한 후 측정된 XPS 결과이다. (a)와 (b) 모두 100.4, 101.5, 그리고 103.8 eV를 중심으로 하는 세 개의 fitting curve로 분리되며 각각 Si, SiH_x 그리고 SiO₂ 상태에서의 Si2p 결합 에너지를 나타낸다. (a)와 (b)를 비교해 볼 때 Si:H 박막의 표면에 자연 산화에 의한 Si과 O의 결합이 다량 존재하며, 박막 내부에서 그 결합이 줄어들었음을 알 수 있다. Fig. 5는 Si과 결합한 원소 및 화학상태의 변화에

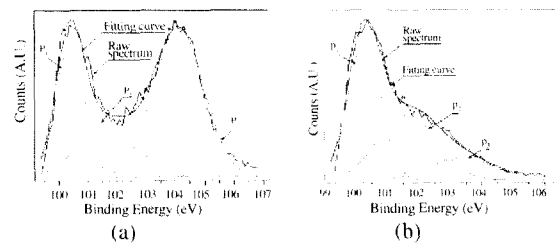


Fig. 4. XPS spectra for Si2p of the Si films. (a) and (b) show the initial surface of the film and the film surface after sputter for 1 min, respectively.

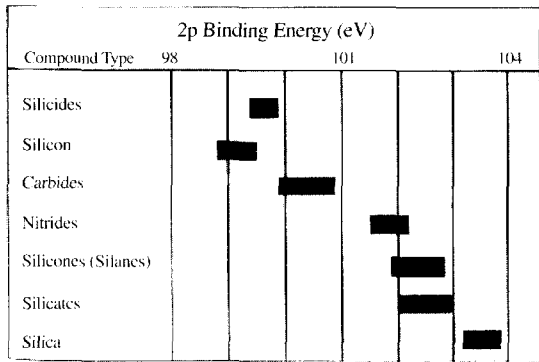


Fig. 5. Variation of Si2p binding energy with various component types.

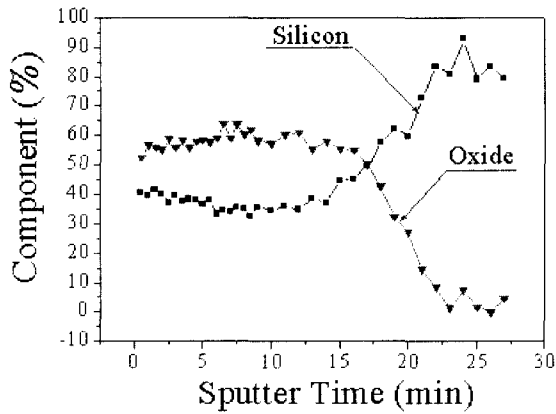


Fig. 6. XPS depth profile of pure Si.

따라 나타나는 Si2p 결합 에너지의 변화를 보여준다.

XPS는 정확한 정량분석에 이용되는데 시편으로부터 얻어지는 광전자 피크의 면적과 높이를 이용하여 시료 내 원소의 조성비 또는 원소를 정량할 수 있다. 마지막으로 수직 분포 분석은 이미 언급된 세가지 분석기법과 스퍼터링 기법을 병행하는 방법으로 시료 표면에 높은 에너지를 가지는 불활성 기체(일반적으로 Ar)로부터 발생시킨 양이온을 충돌시킴으로써 표면을 수 Å씩 깎아 내면서 수천 Å까지의 깊이에 따른 조성 변화와 화학적 상태 변화를 분석할 수 있다. 이 방법은 XPS와 AES에서만 사용할 수 있는 분석 기법이며, 결과는 일반적으로 에칭 시간에 따른 피크 세기의 변화로 표시된다. Fig. 6은 Si 표면으로부터 내부로 수직 분포 분석한 결과를 보여준다. Si 표면의 자연 산화층 이하 깊이로 들어가면서

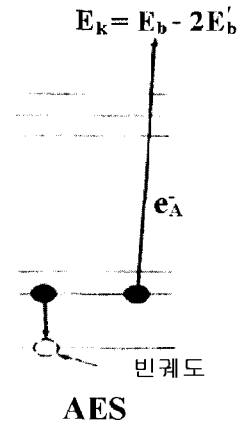


Fig. 7. Schematic diagram for the process of Auger electron emission.

산소의 양이 급격하게 감소됨을 알 수 있다. 이 방법은 박막의 두께 측정 방법의 하나로도 사용될 수 있다.

2.2. AES

AES는 수 백 Å의 크기로 집속된 전자빔을 재료 표면에 입사시켜 방출되는 Auger 전자의 에너지를 측정하여 재료 표면을 구성하고 있는 원소의 종류 및 양을 분석해 내는 표면 분석 기법이다. 재료 표면에 입사된 전자는 재료를 구성하고 있는 원자들을 이온화 및 여기 시키면서 에너지를 잃고 멈추게 되는데 이 과정에서 형성되는 excitation volume은 직경 1-2 μm에 달하게 되며, 그 안에서는 Auger 전자를 포함한 2차 전자 및 X-ray가 발생하게 된다. 투과 거리가 긴 X-ray의 경우, 표면 이하 깊은 곳에서 발생하여도 초기의 에너지를 잃지 않고 표면 밖으로 나올 수 있지만, 3000 eV 이하의 에너지를 갖는 대부분의 Auger 전자는 약 10 단원자 층 이하의 평균 자유 행로 때문에 표면 근처에서 발생하는 것만 초기의 에너지를 보유한 채 표면 밖으로 나올 수 있게 된다.

전자빔이나 X-ray를 이용하여 원자의 하부 각 전자를 채내면 정공이 생성되고 이 정공은 보다 상부각에 위치한 전자가 내려오면서 채워지게 된다(Fig 7). 이 과정에서 야기되는 결합(binding) 에너지의 차이는 X-ray로 방출되거나 아니면 다른 전자를 방출함으로써 해소되는데, 이 때 방출되는 전자를 Auger 전자라 한다.^{3,4)} 2 keV 이하의 결합 에너지를 갖는 상부 전자각에서 발생하는

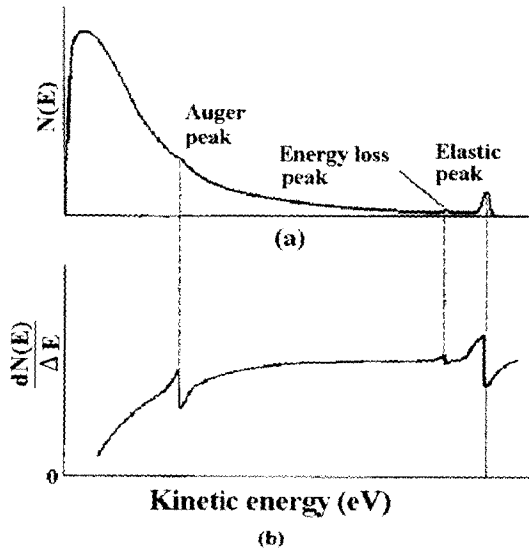


Fig. 8. AES spectra of a solid surface. (a) Typical distribution of electrons obtained from a solid surface. (b) Differentiation of the signal for the identification of the Auger peaks.

정공은 Auger 전자의 방출에 의한 전이가 지배적이다. 이러한 Auger 전자의 운동 에너지는 전이(transition)에 관계하는 전자각의 결합 에너지에 의해 얻어진다. 이와 같이 결합 에너지에 의해 결정되는 Auger 전자의 에너지는 원소마다 고유하므로 이를 이용하여 재료의 구성 원소를 구분해 낼 수 있게 된다.

AES 분석은 얇은 표면층의 정보 및 이온 스퍼터링을 병행함으로써 깊이에 따른 조성의 변화를 알 수 있고, 매우 국부적인 부위의 조성 분석 및 2차원적인 원소 분포도 측정이 가능하며, 집광 및 검출이 간단하고 분석시간이 짧다는 장점을 갖고 있다.

Fig. 8(a)에서 보는 바와 같이 전자빔이 시료 표면에 충돌하면 표면으로부터 운동 에너지가 낮은 이차 전자(secondary electron)들이 넓은 에너지 구간에 분포되어 다량으로 방출되며 Auger 전자들은 소수의 작은 피크를 형성하게 된다. 그러므로 전자의 계수율을 운동 에너지에 대하여 나타내면 Auger 피크의 관측이 어렵게 된다. 이차 전자들의 운동 에너지에 따른 분포는 비교적 단조롭게 변하므로, 전자의 계수율을 운동 에너지에 대하여 한 번 미분하면 흔히 볼 수 있는 평평한 바탕에 양의 피크와 음의 피크가 두드러지게 나타나는 Fig. 8(b)와 같

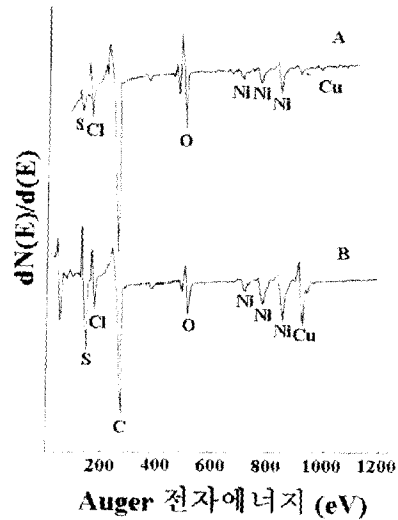


Fig. 9. AES spectra of the $\text{Cu}_{0.7}\text{Ni}_{0.3}$ alloy.

은 미분 스펙트럼이 얻어진다. 관습상 음의 봉우리의 에너지를 Auger 에너지로 취한다.

Fig. 9는 70% 구리와 30% 니켈로 된 합금의 두 시료에서 얻은 전형적인 Auger 스펙트럼이다. 전자운동에너지의 함수로서 나타낸 계수율의 미분값($dN(E)/dE$)이 세로축에 표시되어 있다. AES 분석시 입사 전자빔이 전하를 가지고 있으므로, 전자석에 의해 매우 작은 빔을 만들 수 있으므로 국부적인 표면 분석에 긴요하게 이용될 수 있다. 반면에, 시편이 절연체일 경우 전하 축적(charging) 문제가 발생하여 분석이 어렵게 되는 단점이 있다.

2.3. RBS

RBS는 이온빔 분석(ion beam analysis)⁶⁾ 기법 중의 하나로써 1960년대 초에 소개되었으며 급격한 발전을 거듭하여 오늘에 이르고 있다. 이온빔 분석이란 주로 정전형 가속기로부터 MeV급의 이온빔을 인출하여 분석하고자 하는 시료에 조사하여 시편과의 상호작용을 유도하고, 방사선 이온빔의 에너지를 측정하여 표면으로부터 깊이에 따른 시료의 조성 등을 정량적으로 알아내는 분석 기법이다. 이온빔 분석의 일반적 특징은 절대 정량이 가능하고 따라서 표준 시편이 없이도 정량분석을 할

수 있다는 점이다. 따라서 다른 분석법의 정량화 지표로 사용할 수 있으며 SIMS나 AES 등 일반적인 표면분석에 사용되는 표준시료는 거의 이온빔 분석에 의하여 정량화 된다.

RBS는 이온빔 분석법 중에서 가장 먼저 실용화되었으며 널리 사용되고 있는 분석법이다. 작은 질량을 가지는 이온(일반적으로 헬륨)의 높은 에너지(MeV)를 이용하며, 일반적으로 2~3 MeV의 헬륨 원자핵이 이용되지만 감도, 깊이 분해능, 측정 깊이 등 여러 가지 파라미터에 따라서 양성자나 중이온이 사용되기도 한다. RBS는 주로 박막 분석에 이용되며, 특히 표면 근처의 정확한 성분 조성비의 측정에 많이 활용된다.

RBS의 원리^{3,4)}는 다음과 같다. 헬륨 원자가 수천 Å의 시편을 투과하게 되며 투과하는 원자는 시편 원자의 전자를 여기 또는 이온화시키면서 에너지를 잃게 된다. 이러한 전자 충돌(electron collisions)의 수는 매우 많아서 그 에너지 손실은 깊이에 따라 연속적으로 일어난다. 매우 빠르게 시편을 통과하는 이온들은(일반적으로 $^4\text{He}^+$) 원자의 전자구름을 투과하며 매우 강력한 충돌을 겪게 되는데 이 결과로 이온과 원자핵간 반발력에 의해서 산란(scattering)되는데 이것을 Rutherford scattering이라 한다. Fig. 10은 PtSi 시편에서 일어나는 헬륨 이온의 산란에 대한 모식도를 나타낸다. 시편으로 헬륨 이온이 입사될 때 입사빔의 에너지는 E_0 이며 그 입사빔은 시편 표면에서 반사되어 나오며 내부로 투과되는 입사빔은 투과되어 시편의 끝부분으로부터 반사되어 나오는 과정에서 E_2 와 E_3 의 에너지를 잃어 E_4 의 에너지를 가지고 나오게 된다. 입사빔으로부터 E_1 과 E_4 의 에너지에 대하여 에너지 차가 발생하게 되며 이러한 에너지 차에 의해서 시편내의 정보를 얻게 된다.

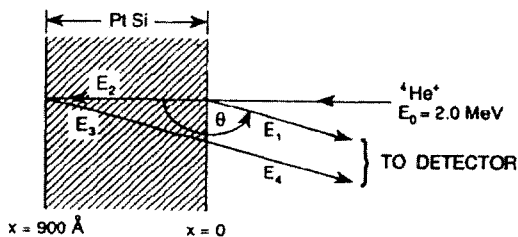


Fig. 10. Schematic diagram of the scattering at the front and back surfaces of a 900-Å-thick PtSi film.

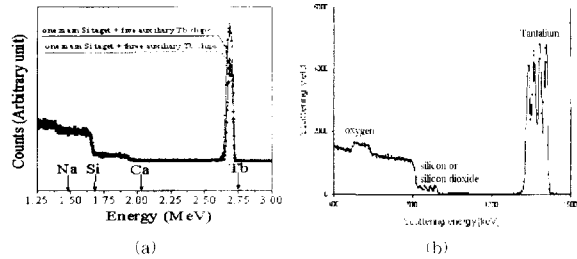


Fig. 11. RBS spectra of (a) Tb:Si film grown on Si substrates and (b) four-period $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ film.

RBS의 깊이 분해능은 매질에 따라 다르지만 약 100~200 Å 정도이며, 분석가능 깊이는 1 μm 정도이다. 표면에 존재하는 불순물의 정량 감도는 대략 0.01~0.1%의 농도에 해당하는 원소에 대하여 정량이 가능하다.

Fig. 11은 RBS 분석의 예이다. Fig. 11(a)에서 분석된 시료는 소다 석회 유리 기판 위에 2000 Å 두께로 증착된 Tb:Si 박막이며, RBS에 의하여 박막을 구성하는 원소의 차이에 따라서 에너지 Si와 Tb의 에너지 곡선이 구분되며 깊이에 따른 변화를 볼 수 있다. Fig. 11(b)는 실리콘 기판 위에 100 Å 두께의 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 층이 4번 반복되어 증착된 박막에 대한 RBS 그래프를 보여주고 있으며, 각각의 박막이 잘 분리되어 분석되는 것을 알 수 있다.

He를 이용한 RBS는 일반적으로 사용되는 방법이기 는 하지만 몇몇의 특수한 경우에는 적용하기가 어렵다. 특히 분석하고자 하는 원소가 매질내의 다른 원소들과 질량이 비슷할 경우에는 분리해 내기가 어렵다. 이 때는 He 보다 무거운 입자를 사용함으로써 질량 분해능을 향상시킬 수가 있다. 이 경우 후방 산란된 입자를 반도체 검출기로 측정하면 원하는 분해능을 얻을 수가 없기 때문에 TOF(time-of-flight) 분광기나 magnetic 분광기를 사용해야 하므로 시스템이 복잡해진다. RBS의 가장 큰 단점은 분석 원소가 매질의 원소보다 가벼울 경우 측정이 거의 불가능하다는 점이다. 예를 들면 실리콘 내의 탄소, 산소 등 가벼운 원소는 RBS 측정시 기판 물질인 실리콘의 신호에 중첩됨으로써 수십% 이하의 함량에서는 정량이 어렵다. 이런 문제점을 해결할 수 있는 방법으로 제시된 것이 ERD(Elastic Recoil Detection) 기법인데^{7,8)} 이는 RBS와는 반대로 입사 입자와의 충돌에 의하여 되돌아오는 시료내의 구성원소를 측정하는 방법이다.

3. 결 론

XPS, AES, RBS 등의 표면 분석 기법은 첨단 재료의 분석에 매우 다양한 용도로 활용되고 있다. 미소한 양의 불순물을 정확하고 정밀하게 제어 할 수 있는 분석법이 요구되는 첨단 재료는 날로 발전하고 있으며 그 크기 및 형태 또한 경박단소(輕薄短小)화 되어가고 있다. 이것에 발맞춰, 재료 표면의 국부적인 화학조성을 정량화 하는 표면 분석기술 또한 대단히 빠른 속도로 발전하고 있다. 최근에 들어와 나노기술의 등장과 더불어 첨단재료에 대한 관심이 고조되고, 첨단재료에 대한 연구결과의 성과가 조금씩 나타나기 시작하면서, 진보된 표면분석 기술의 실질적인 수요가 크게 증가하고 있으며 이의 보급이 확대될 전망이다. 이런 표면분석을 활용하면 재료에서 나타나는 문제점의 근본적인 원인에 대한 미시적 관점에서의 이해를 증진시킬 수 있어서, 인위적인 재료 특성 제어에 의한 신소재의 연구 개발의 기초를 제공할 수 있다. 따라서 이러한 표면분석의 이점과 한계를 정확하게 이해하고 분석에서 얻고자 하는 정보에 따라 적절한 기법을 선택하여 이용하는 것이 필요하다.

참고 문헌

1. K. Siegbahn, C. Nordling, A. Fahlman, R. Nordberg, K. Hamrin, J. Hedman, G. Johansson, T. Bergmark, S-E. Karlsson, I. Lindgren and B. Lindberg, "ESCA Atomic, Molecular and Solid State Structure Studied by Means of Electron Spectroscopy," Almqvist & Wiksells, Uppsala (1967).
2. K. Siegbahn, C. Nordling, G. Johansson, J. Hedman, P. F. Heden, K. Hamrin, U. Gelius, T. Bergmark, L. O. Werme, R. Manne and Y. Baer, "ESCA Applied to Free Molecules," North-Holland Publishing Company, Amsterdam-London (1969).
3. M. Ohring, "The Materials Science of Thin Films," Academic Press, San Diego, 1992.
4. D. K. Schroder, "Semiconductur material and device characterization," John Wiley & Sons, Canada, 1998.
5. M. P. Seah, W. A. Dench, Surf. Interface Anal. 1, 2 (1979).
6. Editors: Tesmer & Nastasi, "Handbook of Modern Ion Beam Materials Analysis", Materials Research Society, Pittsburgh, Pennsylvania, 1995.
7. B. L. Cohen, C. L. Fink, J. H. Degnan, *J. Appl. Phys.*, **43**, 19 (1972).
8. J. L'Ecuyer, C. Brassard, C. Cardinal, J. Chabbal, L. Deschenes, J. P. Labrie, B. Terreault, J. G. Martel, R. St.-Jacques, *J. Appl. Phys.*, **47**, 381 (1976).



조 남 회

- 1981년 서울대학교 공과대학(학사)
- 1983년 서울대학교 대학원 (공학석사)
- 1989년 미국 코넬대학교(공학박사)
- 1989년 - 1991년 미국 로렌스버클리 연구소 연구원
- 1991년 한국과학기술연구원 선임연구원
- 1994년 인하대학교 공과대학, 부교수
- 현재



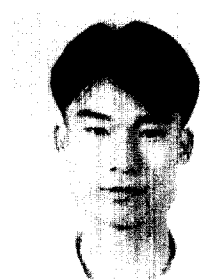
김 대 암

- 2001년 인하대학교 공과대학(학사)
- 2002년 현재 인하대학교 대학원 석사과정



심 재 현

- 2002년 인하대학교 공과대학(학사)
- 2002년 현재 인하대학교 대학원 석사과정



한 규 호

- 2001년 인하대학교 공과대학(학사)
- 2002년 현재 인하대학교 대학원 석사과정