

표면분석용 인증표준물질의 개발 II: 깊이분포도용 다층 박막 표준물질의 개발

김경중 · 문대원

한국표준과학연구원 물질량표준부 표면분석그룹
(1999년 2월 24일 접수)

Development of certified reference material (CRM)s for surface analysis II: multilayer thin films for sputter depth profiling

Kyung Joong Kim and Dae Won Moon

Surface Analysis Group, KRISS, Taejeon 305-600
(Received February 24, 1999)

요 약 - 깊이분포도 측정에 일반적으로 이용되는 다층박막 표준물질은 이온빔에 의한 스퍼터링 속도를 측정하여 예정된 깊이를 검정하거나 깊이분해능 향상을 위한 최적의 분석 조건을 얻기 위하여 주로 이용된다. 한국표준과학연구원 표면분석그룹에서는 다목적 표면분석기가 연결된 이온빔 스퍼터증착 장비를 이용하여 다양한 형태의 다층 박막을 제작 공급하고 있다. 제작된 다층 박막 표준물질의 화학상태는 실시간 XPS 분석에 의해 인증되었고 그 두께는 투과전자현미경에 의해 인증되었다.

Abstract - Multilayer thin film reference materials for the sputter depth profiling analysis are used to calibrate the sputter depth scale by measuring the sputtering rate and to optimize the sputtering conditions for the best depth resolution. Surface analysis group of Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS) have developed various types of multilayer thin films by using an ion beam sputter deposition and *in-situ* surface analysis system. The chemical states of the thin films reference materials were certified by *in-situ* XPS and the thicknesses were certified by transmission electron microscopy (TEM).

1. 서 론

고체 시료에서 특정 원소의 깊이에 따른 분포도는 산소재, 반도체, 부식, 산화 및 코팅 분야에서 그 중요성이 날로 증가되고 있다. 깊이분포도 측정 방법은 크게 비파괴적인 방법과 파괴적인 방법으로 분류되고 있다. 비파괴적인 방법으로 RBS, NRA(Nuclear Reaction Analysis) 및 MEIS(Medium Energy Ion Scattering) 등의 이온 산란에 의한 몇 가지의 방법이 있으나 깊이분해능, 위치분해능 및 질량분해능이 좋지 않다는 등의 단점이 있다. 또한 XPS나 AES의 경우 방출되는 전자의 검출 각도를 변화시키면 분석되는 전자의 탈출 깊이(escape depth)가 달라지는 현상을 이용하면 매우 얇은 박막의 두께나 깊이분포를 측정할 수도 있다. 그러나 이러한 각분해

(angle resolved) XPS나 AES의 경우에도 데이터 해석상의 알고리즘 등의 문제점에 의해 깊이에 따른 분포의 정확한 해석이 불가능하므로 스퍼터링에 의한 파괴적인 방법이 사용될 수밖에 없는 실정이다.

현재 감도가 높기 때문에 미량 원소들의 깊이분포도 측정에 가장 많이 사용되고 있는 SIMS의 경우, 수소를 비롯한 모든 원소의 분석이 가능하고 동위 원소의 측정이 가능하며 일차 이온이 표면에 충돌될 때 떨어져 나오는 이차이온을 검출하기 때문에 분석이 직접적이고 분석시간이 매우 짧다는 장점이 있다. 그러나 일차이온이 표면에 충돌될 때 일어나는 연쇄충돌(collision cascade) 과정으로부터 야기되는 표면의 변형 및 매질효과를 심하게 받는다는 사실은 SIMS에 의한 깊이분포도 측정시 깊이분해능에 커다란 장애물이 되고 있다. 즉 원래 상태

로부터 변형된 계면에서 얻어진 깊이분포도는 상당한 계면퍼짐(interface broadening)을 보여주는데, 이는 기기 성능의 문제에 기인할 수도 있지만 이온 충돌시 생기는 물질의 재배열을 일으키는 요인들 즉 이온선 혼합(ion beam mixing), 표면석출(surface segregation), 선택 스퍼터링(preferential sputtering) 및 표면 미세구조의 변화 등에 주로 기인한다[1-3]. 따라서 시료의 깊이분포도 측정시 깊이분해능 저하를 일으키는 정확한 원인을 찾아내는 것은 매우 까다로우며, 따라서 장비의 성능 확인을 위한 표준물질이 필요하다. 한편 주성분의 정량적인 깊이분포도를 요하는 AES와 XPS에 의한 깊이분포도 측정의 경우에는 스퍼터링되고 남아 있는 표면을 분석하기 때문에 매질효과를 받지 않아 비교적 정량성이 좋으나 미량성분의 분석에는 여전히 어려움이 뒤따른다.

깊이분포도 측정용 박막 표준 시료는, 가장 좋은 깊이분해능이 얻어지도록 깊이분포도 측정 기기의 실험 조건을 최적화시키거나 스퍼터링을 등을 측정하기 위해 이용된다. 이를 위하여 박막표준시료의 두께가 정확히 인증되어야 하고 표면 및 계면이 평탄하여야 한다. 또한 이러한 박막 표준 시료는 화학적 조성 및 화학적 상태가 박막 전체를 통하여 균질하고 입사 이온빔 충돌에 의해 표면이 심하게 변형되지 않아야 한다.

표면분석용 표준물질의 궁극적인 목적은 표면분석 표준화이나, 그 중요성에 비해 그동안의 국제 표준화 연구는 매우 미비한 형편이었다. 그러나 최근에 이르러 국제 표준화기구(International Organization for Standardization: ISO)가 결성되어 본격적인 연구가 진행되기 시작하였다. 표면분석 분야인 TC-201에는 Terminology, General Procedure, Data Management and Treatment, Depth Profiling, AES, SIMS 및 XPS의 7개 전문위원회가 구성되어 있으며 이 중 Depth Profiling 및 SIMS 분과에서 다양한 깊이분포도 관련 표준안을 제정하고 있다[4]. 깊이분포도와 관련되어 현재 진행되고 있는 주 연구 분야는 표준질차이며 여기에는 그에 상응하는 표준물질이 필요하기 마련인데 현재 그 내용을 본문에 명시하기에는 국가간의 이해관계가 상충되므로 주로 부록에 나타내고 있는 실정이다. 한편 반도체 및 신소재 분야의 비약적인 발전에 따라 국내에서도 독자적인 표면분석용 표준물질의 개발 및 표면분석 표준화에 대한 공동 연구의 필요성이 인식되고 있다. 최근에 ISO/TC201에 가입하여 5개 기술분과에 P 회원으로 활동하고 있는 한국표준과학연구원은 국가표준기관으로서 표면분석에 유용

한 인증표준물질을 개발하고 이를 이용 수 차례의 국내 공동분석을 시행하여 표면분석 표준화 연구를 수행하고 있다.

본 논문에서는 현재까지 제작되어 보급되고 있는 각종 깊이분포도용 국제 표준물질의 종류 및 특성을 살펴 보고 가능한 구입 경로를 기술하여 관련자에게 참조가 되도록 하며 한국표준과학연구원에서 제작하여 보급하고 있는 표준물질의 제작방법 및 특징을 기술하겠다.

2. 깊이분포도용 국제 표준물질의 종류

깊이분포도 측정용 박막 표준 시료는 그 제작 및 평가가 간단하기 때문에 비교적 많은 수의 CRM이 제작 공급되고 있다. 그러나 표면분석 국제 표준화 분야에서 인증표준물질의 제작은 그 특성치를 공인력 있는 인증기관으로부터 인증받아야 하며 상업성이 배제되어야 하고 소진될 경우 다시 제작하여 보급해야 하는 등의 엄격한 요구 조건이 뒤따르므로 영국의 National Physics Laboratory(NPL), 미국의 National Institute of Standards and Technology(NIST) 및 한국표준과학연구원 등의 국가표준기관에서 몇 가지 종류의 표면분석용 CRM을 제작하여 공급하고 있다. 현재 국가표준기관이 공급하는 깊이분포도용 인증표준물질의 대표적인 예로 비정질 Ta₂O₅/Ta와 다결정 Ni/Cr 다층박막 시료가 있으며 GaAs/AlAs 초격자 시료가 단결정 다층 박막 표준 시료로 연구되고 있으며 최근에는 표식자층(marker layer)형 다층박막시료가 제작되어 공급되고 있다[5-12].

2.1. NPL No. S7B83(BCR 261)[5-7]

Ta 기관 위에 Ta 산화막을 양극산화법에 의해 형성시킨 것으로 산화막의 두께가 32.3 ± 0.7 nm (A) 및 97.3 ± 2.0 nm (B)의 2종류가 있으며 산소량, sputter yield, 계면 분해능 등의 인증치가 첨부되어 있다. 이 시료는 Fig. 1과 같이 계면 분해능(interface resolution)이 검출깊이(information depth), 이온빔에 의한 표면미세구조의 성장 및 이온선 혼합 등의 요인으로 인해 예상되는 값보다 훨씬 작기 때문에 스퍼터링에 의한 깊이분포도용 표준 시료로 매우 우수하다는 사실이 이미 보고된 바 있다. 그러나 양극산화법에 의해서는 다층 박막의 제조가 불가능하고 다양한 기관의 선택이 불가능하며 또한 근본적으로 표면의 거칠기를 제거하기가 어렵기 때문에 새로운 방법에 의한 박막의 제조가 요구되고 있다.

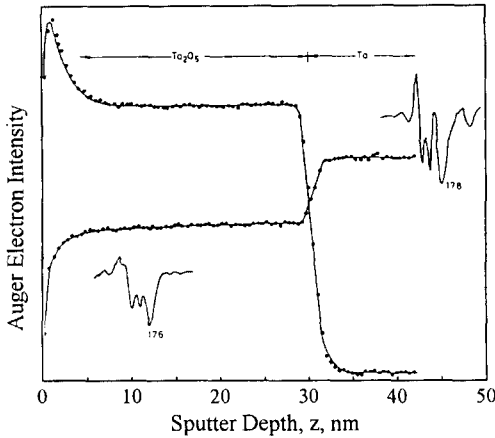


Fig. 1. Ta₂O₅/Ta(NPL CRM)의 AES에 의한 깊이분포도[5].

2.2. NIST SRM No. 2135[8-10]

Cr 및 Ni를 스퍼터 증착법에 의해 각각 5, 4층씩 적층한 것으로 Cr층의 두께는 53 nm Ni층의 두께는 66 nm이다. 이 시료에서는 각 금속 층의 두께, 편차 및 각층의 균일성 등의 인증치가 제공된다. 다결정 금속 박막의 깊이분포도 측정시 이온빔 스퍼터링에 의한 표면 미세구조의 성장이 문제가 되는데, 이 CRM을 이용하면 스퍼터링 조건(일차이온종, 이온빔 에너지, 입사각 등)을 최적화 하는데 매우 유용하다. 한 예로 Fig. 2는 7 keV의 산소이온빔을 이용하여 입사각을 변화시키면서 얻은 SIMS 깊이분포도로서 깊이분해능에 미치는 입사각의 영향을 알 수 있다[10]. 즉 산소이온빔의 입사각이 30° 근처일 때 계면분해능이 현저히 나쁘고 이로부터 입사각이 증가하거나 감소함에 따라 계면분해능이 향상되는데 이는 주로 표면 미세구조의 성장에 기인함이 밝혀졌다. 특히 입사각이 시료표면과 수직일 경우에는 표면 미세구조가 거의 성장하지 않음을 볼 수 있었는데 이는 산소이온빔에 의해 시료표면이 완전히 산화되며 비정질 표면이 형성되기 때문이다. 또한 표면미세구조 성장과정을 잘 살펴보면 주로 Ni층에서 미세구조가 성장되는 것을 볼 수 있는데 이는 각 물질의 성질 및 산화도의 차이에 따른 것임을 알 수 있다.

2.3. NIST SRM No. 2136[12]

이 시료는 SIMS 깊이분포도를 위하여 고안된 것으로 표식층(marker layer) 형태의 다층박막으로 다결정 Cr층과 매우 얇은 비정질 Cr₂O₃층으로 이루어져 있다. Cr층

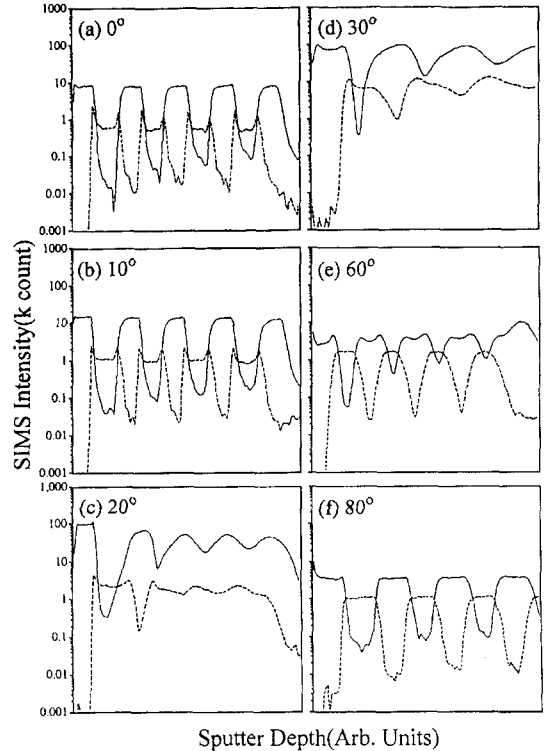


Fig. 2. Cr/Ni 다층박막(NIST CRM)의 7 keV 산소이온빔에 의한 SIMS 깊이분포도[10].

은 이온빔 스퍼터 증착법에 의해 증착되며 증착 후 산소를 흘려줌으로써 그 표면을 산화시켜 매우 얇은 비정질 Cr₂O₃층을 형성시킨다. 이 CRM을 이용한 SIMS 깊이분포도 분석의 경우 delta-Cr₂O₃ 층에서의 이차이온화율이 크기 때문에 쉽게 분리될 수 있다. 그러나 이 시료는 SIMS에서 가장 많이 이용되는 산소이온을 일차이온으로 사용할 수 없다는 단점이 있다. 즉 산소이온빔에 의해 Cr이 산화되기 때문에 Cr층과 Cr₂O₃층 사이에서의 이온화 세기의 차이가 별로 없어 구분이 잘 되지 않는다. 한편 이 시료는 이온빔 스퍼터링에 의한 표면미세구조 형성 때문에 스퍼터 깊이에 따라 깊이분해능이 현저히 감소된다는 단점이 있다.

2.4. 이온주입 표준시료

SIMS에 의한 미량성분의 깊이분포도를 위한 표준물질로 이온주입시료가 널리 이용되고 있다. 이온주입에 의한 표준시료의 제작시 주입물질은 이온주입기에서 가능한 원소들에 국한되지만, 다양한 기판에 주입할 수 있

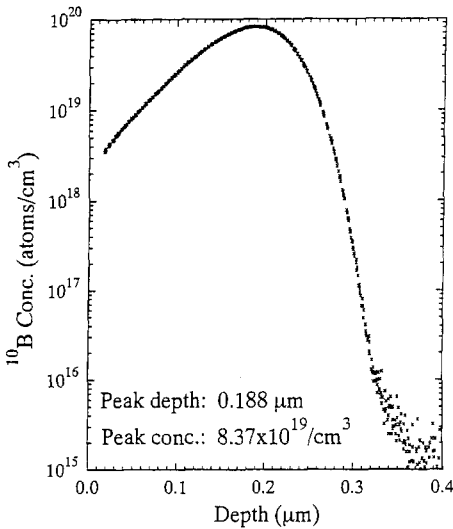


Fig. 3. ^{10}B 이 주입된 Si(NIST SRM No. 2137) CRM의 SIMS depth profiling.

고 주입량 및 주입깊이를 다양하게 조절할 수 있으므로 매우 유용하다. 이온주입 표준시료의 제작에서 가장 중요한 것은 주입 이온의 에너지 변화에 따른 주입 깊이의 변화 및 이온선량측정법(ion dosimetry)에 의한 불순물 주입량의 정확한 측정인데 여기에는 많은 오차 요인이 있어 초미량 성분의 조성이나 균질도 등은 가능하면 방사선 분석이나 RBS(Rutherford Backscattering Spectrometry)와 같은 절대분석법에 의해 입증되어야 한다. 이러한 이온주입시료의 주 용도는 미량성분의 정량 분석이나 스퍼터 깊이의 측정이나 계면분해능 향상을 위한 깊이분포도용으로 많이 이용된다.

현재 시판중인 이온주입 CRM으로 Fig. 3과 같이 NIST에서 개발한 ^{10}B 이 주입된 Si(NIST SRM No. 2137)이 있는데, 이 시료에서는 주입된 B의 양을 중성자 깊이분포도에 의해 입증하였다[13]. 한편 Charles & Evans 등의 회사에서는 다양한 기판(Si, SiO_2 , SiN_x , WSi_x , TiN_x , TiW_x , Al, GaAs, InP 등)에 다양한 이온종을 주입하여 판매하고 있다.

3. 깊이분포도용 KRIS CRM

CRM 제작을 위한 이온빔 스퍼터 증착 시스템(ion beam sputter deposition)을, 고진공 터널을 통해 SIMS, AES 및 XPS 분석이 동시에 가능한 다목적 표면 분석

장비에 연결하여, 제작된 박막 표준시료의 조성 및 화학상태를 대기 중에 노출시키지 않고 정확히 분석할 수 있도록 하였다[14, 15]. 박막 증착 장비는 타겟을 스퍼터링시키기 위한 DC 아르곤 이온총 및 기판 위에 성장하는 박막 표면을 보조적으로 조사하기 위한 RF 이온총, 시판 이송 시스템 및 타겟조정기 등으로 구성되어 있다. 다층 박막 및 합금박막을 증착시킬 수 있도록 특별히 제작한 회전 및 직선 이동이 가능한 타겟조정기는 이온빔의 스퍼터링에 의해서 온도가 올라가지 않도록 냉각수에 의해 냉각되며 앞뒤에 2개씩 모두 4종류의 타겟을 고정할 수 있다. 이 장비에 의하면 금속 타겟으로 제작이 가능한 대부분의 금속 박막의 증착이 가능하고 두 타겟 A, B를 타겟조정기 양면에 고정시킨 후 타겟조정기를 180° 회전시키면서 교대로 박막을 증착하면 두 물질로 이루어진 다층박막을 간단히 제작할 수 있다. 한편 만일 산소를 흘려주면서 박막을 증착하면 산화물 박막의 제작도 가능하다. 한 예로 Fig. 4는 산소 분압의 증가에 따른 Ta 박막의 화학상태를 보여주고 있다. 즉 산소를 흘리지 않을 경우 순수한 Ta 박막이 성장하고 산소 분압이 6.7×10^{-4} mbar 이상에서는 완전한 산화물인 Ta_2O_5 박막이 성장하며 중간 영역의 분압에서는 불완전 산화물이 성장한다. 박막은 주로 5인치 실리콘 기판 위에 성장되는데 균질성을 확보하기 위해 스텝모터를 이용하여 기판을 전기적으로 회전시킨다. 이렇게 증착된

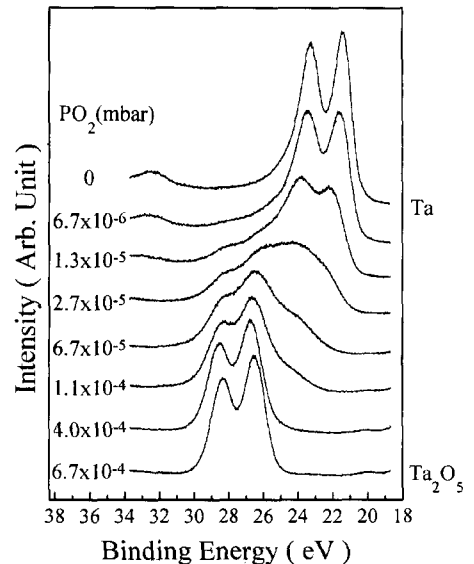


Fig. 4. 산소 분압의 변화에 따라 증착된 Ta 박막의 화학상태.

박막 CRM은 10 mm × 10 mm의 크기로 절단되어 공급 되는데, 5" 웨이퍼로부터 가운데 및 바깥 부분을 제외한 약 80개의 시편을 얻을 수 있으며 특성분석에 일부를 사용하면 약 60개 정도의 시편을 CRM으로 공급할 수 있다.

현재 미량 원소들의 깊이분포도 측정에 가장 많이 사용되고 있는 SIMS의 경우 일차 이온이 표면에 충돌될 때 떨어져 나오는 이차이온을 검출하기 때문에 매질효과를 심하게 받는다는 사실은 깊이분포도 측정시 깊이 분해능 향상에 커다란 장애물이 되고 있다. 특히 매질이 급격히 변하는 계면에서 이차이온 세기의 변화는 계면 분해능의 저하는 물론 정량성을 심하게 떨어뜨린다. 또한 스퍼터링 조건의 변화에 따른 스퍼터링 속도의 변화가 물질마다 다르기 때문에 스퍼터 깊이 단위를 결정하는데 큰 어려움이 있으므로 다층박막 CRM의 제작에 있어서 적절한 물질의 선택이 매우 중요하다. 본 연구원에서는 금속/금속, 산화물/금속, 산화물/산화물 등 다양한 형태의 계면에 대한 매질효과 및 이온빔 스퍼터링에 물질의 표면 변화 등을 고려하여 다층박막 CRM을 제작하였다. 이러한 다층박막 CRM의 화학상태는 *in-situ* XPS에 의해 인증되고 두께는 단면 TEM 측정에 의해 인증된다. 현재 Ta₂O₅/SiO₂ 다층박막 CRM(KRISS CRM 0304-100)과 Ta₂O₅/Ta 다층박막 CRM(KRISS CRM 0304-101)이 공급되고 있으며 제작중인 Si/GaAs doped delta Si 다층박막 CRM(KRISS CRM 0304-102)도 곧 공

급할 예정이다.

3.1. KRISS CRM 0304-100: Ta₂O₅/SiO₂ 다층박막 CRM[15]

정확한 구조는 6 × (Ta₂O₅/SiO₂)/Ta₂O₅/Si로 Ta₂O₅층의 두께는 기판으로부터 차례로 18.0, 19.0, 18.6, 18.4, 18.6, 18.6, 18.8 nm이며 표식층(marker layer)으로 쓰이는 델타 SiO₂층의 두께는 1.0 nm이다. 이 시료는 대부분의 다층박막 표준시료에서 문제가 되는 매질효과와 영향을 최소화하기 위하여 고안된 것으로 완전한 산화물간의 다층박막이다. 즉 이차이온화 세기가 최대가 되는 산화물간의 계면에서는 매질효과에 따른 세기의 변화가 적고 스퍼터링 조건에 따른 스퍼터링율의 변화도 적기 때문에 안정된 깊이분포도를 얻을 수 있다. 이 시료의 가장 큰 장점은 보통의 SIMS 분석 조건에서 표면미세구조의 성장이 무시될 수 있을 정도로 작아 Fig. 5와 같이 스퍼터 깊이에 따른 계면분해능의 저하가 거의 없으며 모든 일차이온종을 사용할 수 있다는 점이다.

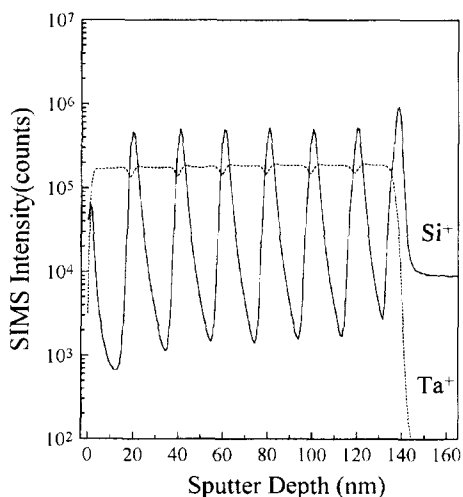


Fig. 5. Ta₂O₅/SiO₂ 다층박막 CRM의 SIMS 깊이분포도 (Cameca IMS-4f, 7.5 keV Ar⁺).

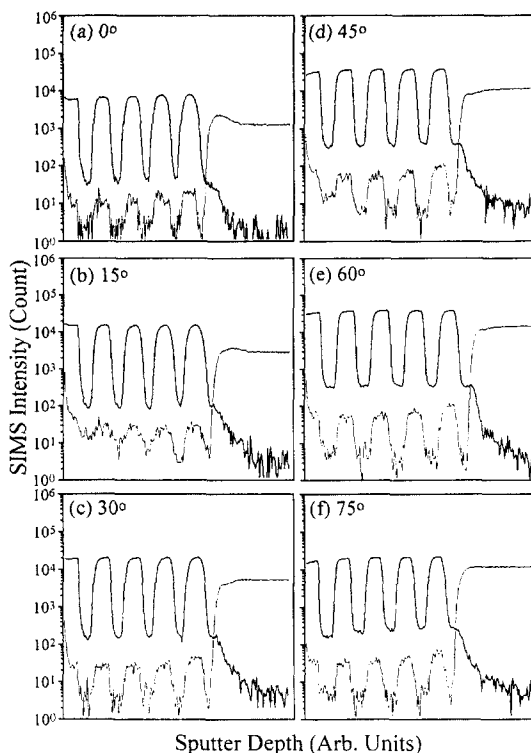


Fig. 6. Ta₂O₅/Ta 다층박막 CRM의 SIMS 깊이분포도(7 keV Ar⁺).

3.2. KRISS CRM 0304-100:Ta₂O₅/Ta 다층박막 CRM

이 시료는 NPL No. S7B83(BCR 261)의 단점인 다층 박막이라는 문제를 보완하기 위하여 제작된 것으로 그 구조는 5×(Ta₂O₅/Ta)/Si이다. 각층의 두께는 단면 TEM 사진으로부터 측정되는데 그 값은 표면으로부터 31.0, 25.0, 31.0, 25.5, 31.0, 25.5, 30.0, 25.5, 30.0, 25.5 nm이다. Fig. 6과 7은 7 keV의 산소 및 아르곤 이온빔에 의한 SIMS 깊이분포도로 최적의 실험 조건을 얻기 위한 기준이 될 수 있을 것이다. 즉 아르곤이나 산소 이온빔의 경우 모두 입사각이 증가함에 따라 계면분해능이 향상되어 60° 정도에서 최적의 계면분해능을 보여주고 있으나 산소이온빔의 경우에는 입사각이 감소함에 따라 Ta층이 산화도가 증가하여 각층간의 뚜렷한 변화를 알 수 없어 계면분해능의 평가가 불가능하게 된다. 한편 이온빔의 입사각에 대한 표면거칠기의 변화는 마지막 Ta₂O₅/Ta 계면까지 스퍼터링한 후 AFM으로 측정하였는데 두 이온종의 경우에 서로 다른 경향을 보인다. Table 1과 같이

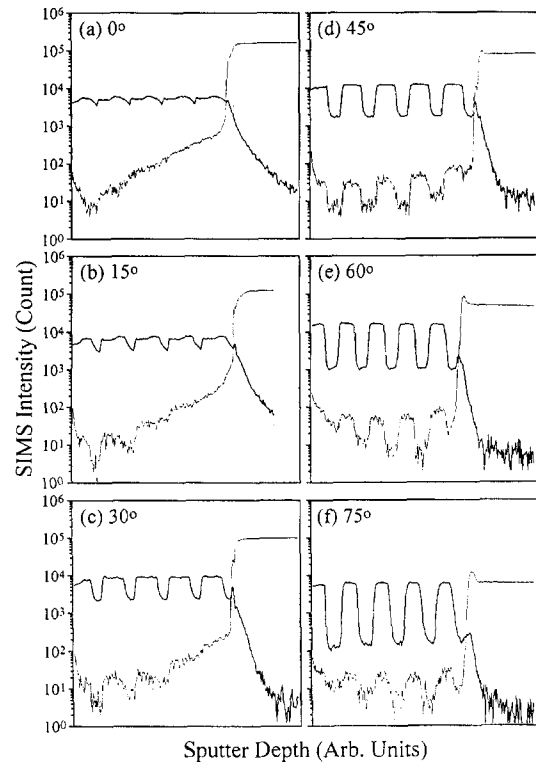


Fig. 7. Ta₂O₅/Ta 다층박막 CRM의 SIMS 깊이분포도 (7 keV O₂⁺).

산소이온빔의 경우 입사각이 증가할수록 표면조도가 증가하지만 아르곤이온의 경우는 반대로 감소한다. 이 시료는 AES에 의한 깊이분포도용으로도 유용하며 일본의 Kasiwara에 의해 ISO/TC-201 깊이분포도 분과에 제안된 “superlattice와 다층박막을 이용한 최적화”라는 제목의 표준안에 참고 표준물질로 인용되고 있다.

3.3. KRISS CRM 0304-100: Si/GaAs doped delta Si 다층박막 CRM

이 시료는 반도체 재료인 Si의 SIMS 깊이분포도를 위하여 고안된 것으로 표식층 형태의 다층박막으로 다결정 Si층을 GaAs이 도핑된 매우 얇은 Si층을 표식자층

Table 1. 이온빔 스퍼터링에 의한 표면 평균조도(average roughness)의 변화

이온종 및 에너지	입사각에 따른 평균조도(nm)			
	0°	30°	60°	75°
7 keV O ₂ ⁺	0.59	0.71	0.90	1.38
7 keV Ar ⁺	6.91	5.11	2.81	1.14

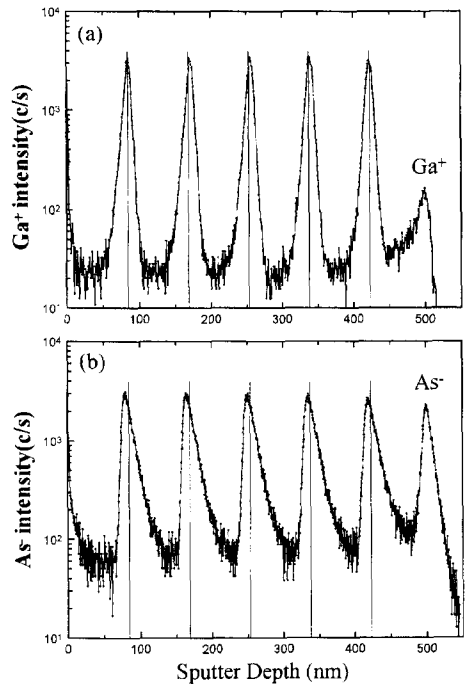


Fig. 8. Si/GaAs doped delta Si 다층박막 CRM의 SIMS 깊이분포도; O₂⁺에 의한 positive SIMS(a), Cs⁺에 의한 negative SIMS(b).

으로 하여 분리한 다층박막 시료이다. 이 시료는 Fig. 8과 같이 Ga에 대해 O_2^+ 을 이용한 positive SIMS 및 As에 대해 Cs^+ 을 이용한 negative SIMS의 경우에 모두 이용될 수 있다. 또한 SIMS 깊이분포도의 경우 표면의 오염층이나 스퍼터링 초기에 정상상태에 도달하기 직전까지의 구간(pretransient region)에서의 스퍼터링율 변화가 문제되는데, 표식층간의 간격이 일정하므로 이를 이용하면 절대적인 스퍼터링율을 구할 수 있다. ISO/TC-201 한국측 대표간사기관인 한국표준과학연구원에서는 이러한 표식자형 표준시료를 이용한 깊이분해능 평가법에 관한 내용의 표준안을 제출하여 진행 중에 있다.

4. 맺는말

표면분석법 표준화를 이루기 위해서는 다양한 분석 장비에 대해 공통적으로 적용될 수 있는 표준절차와 더불어 그 목적에 맞는 다양한 표준물질의 공급이 수반되어야 한다. 최근 들어 국제표준화기구인 ISO/TC-201을 통해 표면분석법 표준화를 위한 표준절차가 표준안으로 제정되고 있는 만큼 그에 따른 표준물질의 요구가 높아지고 있다. 한국표준과학연구원에서는 다양한 형태의 깊이분포도용 다층박막 표준물질의 제작법을 확립하여 다양한 용도의 CRM을 공급할 수 있게 되었다. 또한 이러한 표준물질을 이용하여 국내외적으로 공동분석을 할 수 있게 되었으며 이에 따라 국제표준화에 대해 능동적으로 대처해 나갈 수 있는 기틀을 마련하였다.

참고문헌

- [1] S. Hofmann, *Surf. Interface Anal.*, **2**, 148 (1980).
- [2] E. H. Cirlin, *et. al.*, *Surf. Interface Anal.*, **15**, 337 (1990).
- [3] K. Wittmaack, *Vacuum* **34**, 119 (1984).
- [4] C. J. Powell and R. Shimizu, *Surf. Interface Anal.* **25**, 860 (1997).
- [5] C. P. Hunt and M. P. Seah, *Surf. Interface Anal.* **5**, 199 (1983).
- [6] S. Hofmann and J. M. Sanz, *Surf. Interface Anal.* **6**, 78 (1984).
- [7] M. P. Seah, H. J. Mathieu and C. P. Hunt, *Surf. Sci.* **139**, 549 (1984).
- [8] J. Fine, B. Navinsek, F. Davarya and T. D. Andreadis, *J. Vac. Sci. Technol.* **20**, 449 (1982).
- [9] J. Fine and B. Navinsek, *J. Vac. Sci. Technol.* **A3**, 1408 (1985).
- [10] K. J. Kim and D. W. Moon, *Appl. Phys. Lett.* **60**, 1178 (1992).
- [11] K. Yoshihara, D. W. Moon, D. Fujita, K. J. Kim and K. Kajiwara, *Surf. Interface Anal.* **20**, 1061 (1993).
- [12] J. Fine and B. Navinsek, *Surf. Interface Anal.* **23**, 391 (1995).
- [13] 자세한 사항은 NIST의 David Simons에게 문의하기 바람(e-mail: david.simons@nist.gov, Fax: +1-301-417-1321).
- [14] K. J. Kim, D. W. Moon *et. al.*, *J. Kor. Vac. Soc.* **7**, 176 (1998).
- [15] K. J. Kim and D. W. Moon, *Surf. Interface Anal.* **26**, 9 (1998).