

박막 · 다층막의 연구 동향

韓 昌 錫

호서대학교 국방과학기술학과

A Research Trend of Thin Films & Multilayer Films

Chang Suk HAN

Dept. of Defense Science & Technology, Hoseo University, 165 Sechul-Ri,
Baebang-Myun, Asan City, Chungnam 336-795, KOREA

1. 서 론

전자회절 · 전자현미경이 재료의 구조해석이나 표면해석에 유용하게 이용됨에 따라, 재료평가의 대상물로서 박막이 자주 사용된다. 그러나, 박막 그 자체가 구조나 물성적인 측면으로부터 주목되어 연구되기 시작한 것은 그다지 오래되지 않았다. 1970년대 후반부터 반도체재료를 시작으로 하는 모든 신소재와 그것들을 사용한 device가 개발되었으며, 또한 소형화가 요구되었기 때문에, 이러한 요구조건을 만족시키고 효율적으로 제조하기 위해서 MBE법(Molecular Beam Epitaxy), CVD법(Chemical Vapor Deposition), PVD법(Physical Vapor Deposition) 등의 박막제조법이 급속하게 발전하였다. 따라서, 박막 그 자체를 재료로서 연구하는 새로운 연구개발 분야가 각광을 받으며 선도적·기반적 과학기술 분야로서 발전하였다.

박막은 여러 가지 과정을 걸쳐 형성된다. 기상으로부터 박막이 형성되는 과정은 비열평형과정이다. 예를 들어, 진공증착법에서는 에너지 이동에 의한 열평형증발, 비열평형응축 등, 또, 스퍼터링(sputtering)법에서는 운동량 변환에 의한 비열평형증발, 비열평형응축 등이 일어난다. 따라서, 이러한 증착법에서는 상태도에는 존재하지 않는 물질, 혹은, 열평형상태에서는 고온·고압 상태에서만 생성하는 물질의 박막이 형성될 가능성이 있다. 한편, 화학적 기상증착법(CVD; Chemical Vapor Deposition)에서는, 열평형증착·열평형응축 현상이 일어난다. 박막의 성장은, 주

로 기판 표면에서의 핵 형성과 원자의 확산에 의하여 지배되며, 또한, 날아오는 입자(원자, 분자)가 응축할 때의 온도나 날아오는 입자가 가지고 있는 에너지가 막 구조와 밀접한 관계가 있다. 박막의 성질은 미세구조와 관계가 있으며, 미세구조는 증착방법과 증착조건에 밀접한 관계가 있기 때문에 증착과정을 해명하는 것은 막 특성을 이해하기 위해서, 또, 박막을 재료로서 이용하기 위해서도 매우 중요하다. 따라서, 본 기술해설에서는 증착기술, 증착과정과 계면구조, 관찰·평가법, 막의 물성 및 응용에 대하여 기술하겠다.

2. 금속 증착기술의 진보

종래의 증착법은 전자분야에서 발달한 표면개질 기술이나 증착기술을 도입하여, 조작성이나 제어성 측면에서 많은 개선을 하여, 고성능화와 신기능성을 부가한 증착법으로서 확립되었다. 현재는 진공·초고진공 증착법, AC·RF Magnetron Sputtering법, Electron Beam 증착법, Laser aberration법, Coating법, CVD법, MOCVD법, Ion Beam Sputtering법, PVD법, MBE법 등의 증착방법이 널리 이용되고 있다. 또한, 가능성이나 제어성의 정도가 주목되고 있지만, 고 cost 또는 크기의 제한이나 낮은 증착속도의 개선이 과제로 남아 있는 증착법도 개발되고 있다. 예를 들어, 가변과장 Excimer Laser CVD법, UV Laser 유도형 VD법 등이 있다. 이러한 증착법은 Y-Ba-Cu-O산화물, 입방정 c-BN, 반도체

체재료의 박막형성에 주로 이용되지만, 앞으로는 금속박막에도 응용될 것이라고 생각한다. CVD법의 과정은 퇴적온도의 저온화이지만, 해결방법으로는 laser를 겸용한 증착기술의 개발에 달려있다고 생각된다.

Sputtering법에서는, plasma 상태(전자, 이온의 입자밀도, 에너지 분포 등)의 정량적 해석(plasma 진단)이 완벽하게 이루어지지 않은 실정이다. 한편, 대표적인 Ion Plating법에서는 활성화 Ion Plating (ARE) 등의 개선이 행하여졌으며, 또 Cluster Ion Beam법에서는 종래에는 기대할 수 없는 조직, 예를 들어, 자성 미립자가 균일하게 분산한 granular 조직을 갖는 박막을 제작하는 기술도 개발되었다[1]. 금후에도 반도체제조기술인 박막제작기술과 초고진공기술로부터 많은 지식을 습득하여 새로운 type의 증착법이 개발될 것이라고 기대된다.

3. 핵 생성과 성장과정

핵 생성과정에 대해서는, 직접 관찰에 의한 연구보고는 적으며, 이론적 고찰이 대부분이다. 이 경우, 임계 핵 속에 포함되어 있는 원자 수는 몇 개 이하이기 때문에 열역학적으로는 취급하기 어렵고, 속도론적으로 설명하여야 한다[2]. 실험적으로는, 일정한 속도를 가지는 원자를 입사시켜 임계핵의 크기, 핵의 농도, 핵 생성속도, 안정한 핵의 성장속도 등을 입사강도, 기판온도, 증착시간의 함수로서 측정하여 흡착되는 원자의 확산계수, 확산에너지, 흡착에너지 등을 결정하며, 특히, 이러한 결과를 이용하여 이론적 수치와 실험결과를 비교하는 것으로 핵 생성 과정에서의 우선성 등이 상세하게 기술되어 있다[3].

박막의 3가지 성장모형, 즉, Volmer-Weber(VW형), Frank-Van der Merwe(FM형), Stranski-Krastanov(SK형)이 제안된 이래 수많은 막의 성장과정에 관한 연구는 이 3가지 성장모형에 기초하여 정리되었다. VW형 성장의 예는 MaO 상의 금속박막, FM형 성장의 예는 Si/Si기판과 같은 homo-epitaxy, Pd/Au(111), (001), Pd/Ag((111), Ag/Cu(111) 등, SK형 성장은 Si기판상의 Al, Au, In, Bi, Ga, Ag 금속박막 및 금속기판(Cu & W) 상의 금속박막 등이 보고되어 있다[4]. 많은 연구결과로부터 증착원자의

이동도가 작은 경우에는, FM형 성장이 특히 다층동시성장(Simultaneous Multilayer Growth, SM)과 단층형성 후의 다층동시성장(Monolayer Plus SM, MSM)과 같이 2가지로 세분화되어 있다[5].

각각의 성장모형은 기판 표면에너지(σ_s), 퇴적막의 표면에너지(σ_f) 및 막/기판 표면에너지(σ_i)의 대소관계로 변화한다. 변형에너지를 무시하면, $\sigma_s > (\sigma_f + \sigma_i)$ 인 경우, 퇴적되어 형성된 막은 기판상에서 FM형 성장이 일어난다. 그러나, 반대의 조건 $\sigma_s < (\sigma_f + \sigma_i)$ 에서는 3차원적인 입자가 형성되는 VW형 성장이 일어나며, 양 조건의 중간에서 SK형 성장이 일어난다. 실제로는, 증착법에 의해서 성장과정이나 막 구조가 현저하게 차이가 난다. 따라서, 각각의 성장막이 어떠한 성장과정을 거칠까? 또는, 어떠한 특징을 갖는 막 구조일까?라는 기초적인 많은 연구가 진행되고 있다.

성장과정에 대한 in-suit 계측법이나 직접관찰법도 상당히 발달되어 있다. 일반적으로 폭 넓게 이용되고 있는 계측법에는 Auger 전자신호 강도의 막 두께 의존성으로부터 추정하는 방법과 반사고속전자회절법(RHEED)등이 있다. 어떠한 관측법에서도 박막과 기판으로부터의 신호강도는 각 성장층의 형성완료에 따라 진동적으로 변화하여, 그 구배가 불연속적으로 변화하는 것을 이용하고 있다. 주사형 tunnel 현미경(STM)은 분해능, 안정성, 조작성이 우수하기 때문에 표면구조의 직접관찰법에 유효하게 이용되고 있다[6]. 이 경우, 신호로서 이용되는 tunnel전류는 탐침 및 시료표면의 전자상태밀도에 의해서 결정되기 때문에 STM image는 표면원자의 배열을 재현할 수 없는 점이 지적되고 있다. 따라서, 이러한 결점을 보완할 수 있는 SFM(Surface Force Microscopy)이 표면형태의 직접관찰에 이용되고 있다. 반사회절전자를 이용하여 결상하는 반사전자현미경법(REM-RHEED)을 병용한 직접관찰법은 기판표면에서 성장막의 국소적인 계면구조 등을 관찰하기에 유효하다[7-8]. 직접충돌이온산란분광법(ICISS)이나 중간에너지이온산란(MEIS)은 표면구조의 정량적 해석을 할 수 있으며, 표면의 최외각 1~2원자층 뿐만 아니라 표면 하부의 몇 개의 원자층까지의 구조 및 성분분석이 가능하다[9]. 또, 가시광이나 IR을 이용한 in-suit 및 시간분할 엘립소미터법(Time-resolved

표 1. 금속 인공격자막 및 nano granular 자성체의 자기저항 효과

CPP nano granular CIP						
측정온도	4.2 K	300 K	4.2 K	300 K	4.2 K	300 K
Co/Cu	170 %		50 %	20 %	110 %	75 %
Fe/Cr	110 %	14 %			150 %	30 %
Co/Ag	120 %		80 %	32 %	65 %	20 %
Ni-Fe/Ag			52 %	16 %	50 %	18 %

CIP(current in-plane): 전류를 막의 면 내부로 흘릴 때
 CPP(current perpendicular to plane): 전류가 막의 면에 수직일 때

Ellipsometry)도 이용되고 있다[10]. 한편, Si(111)상의 Au나 Cs의 성장을 RHEED와 표면전기전도도와 hole효과와 in-suit측정으로부터 표면구조와 전기적성질과의 관계를 조사한 연구보고도 있다[11].

4. 성장막의 계면구조

성장막의 구조에 대해서는, 주로 기판에 대한 성장막의 epitaxial방위(면 및 방향), 기판과 성장막의 계면구조, 성장막의 결합구조 등에 대한 실험적 연구가 진행되었다[12]. 또, 기판표면의 주기 potential의 영향으로 같은 구조를 가지고 성장하는 擬似구조성장(pseudo-morphism)을 설명하기 위하여 도입된 FM 이론에 기초하여 성장막의 탄성적 원자시슬의 모델구조(격자간격, 변형, 전위구조형성)[13]의 변화에 대하여 보고 되어 있다. 성장결정의 탄성정수 κ 와 계면 potential V 와의 비(κ/V)의 크기로 epitaxial 성장의 정도가 결정되고, 이 값이 비교적 작을 때에는 VW형 성장의 epitaxial방위는 기판과 성장막과의 격자 misfit에 강하게 의존한다. 이 擬似구조의 파괴가 일어나는 임계 막 두께도 이론적으로 예상할 수 있으며, 실험적으로도 명확한 사실이 확인되었다[8, 14]. 특히, 계면전위에 의한 격자 misfit의 완화기구가 보고 되어 있다. SK형 성장은 앞에서 설명한 것과 같이, 반도체 표면에 금속이 성장하는 경우에 볼 수 있다. 그러나, Si 표면상의 Si나 Ge의 성장에서도 성장모양은 표면상태, 예를 들어, 표면형상이나 미세한 금속막의 존재 혹은 흡착구조의 형성에 필요한 활성화 에너지의 크기 등으로 복잡하게 영향을 받는 것이 지적되고 있다. Si 표면상의 성장에 대한 해명도 중요한 과제중의 하나이다[8]. 또한, 기판 상에서 성장하는 박막의 배향관계에 대해서는 bcc(110) 기

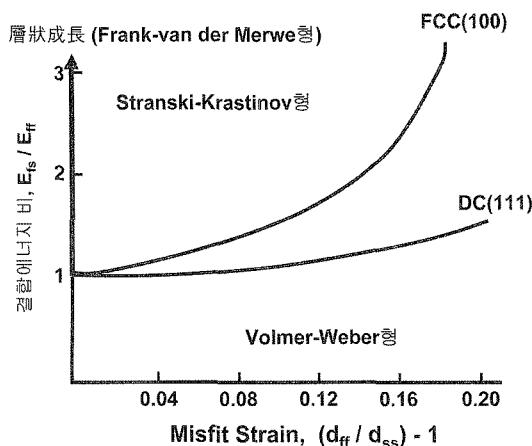


그림 1. 시뮬레이션에 의한 성장양식과 misfit strain의 관계.

판 상에서의 fcc(111) 구조를 갖는 단원자층에 대해서 자세하게 조사되어 있으며, 기판의 potential과 격자 misfit로부터, Nishiyama-Wasserman(NW) 배향과 Kurdjumov-Sachs(KS) 배향을 기초로 하여 체계적으로 정리되어 있다[4, 15].

그리고, 증착조건, 물질의 차이, 기판표면의 형상이 성장과정이나 막 구조에 어떠한 영향을 미칠까?라는 문제를 계산기 simulation에 의한 연구도 진행되고 있다. 2차원격자, 3차원격자 위에서의 성장막 구조의 simulation이 Monte Carlo Method로, Lennard-Jones형 potential 등의 potential을 이용한 분자동역학법, 혹은 2가지 방법을 결합한 hybrid법, 원자간 상호작용에 전자론적인 효과를 도입한 Embedded Atom Method(EAM)에 의한 분자동역학적 simulation으로 박막형성과정에 대하여 연구되고 있다(그림 1). 그러나, 계산기 simulation의 결과와 실험결과에 대하여 물리적 의미를 부여하는 것에는 아직 많은 문제점이 남아있다[16].

일반적으로, 물질 A가 물질 B를 coating하는 경우, 물질 B는 물질 A를 coating하지 못한다. 성질이 다

른 물질을 서로 coating하는 다층막이나 인공격자(A/B/A...)에서는, 이 제약조건이 양질의 박막을 생성시키는 것에는 장애의 요인으로 된다. 이와 같은 성질이 다른 물질간의 epitaxial 성장(heteroepitaxy)에서는, 표면활성인 원소(surface-active species \Rightarrow surfactants)를 첨가하는 것에 의하여 표면에너지가 제어되어 막의 성장과정을 변화시켜 양질인 인공미세구조를 형성시키는 박막기술이 개발되었다. 최초의 시험은, Si/Ge/Si의 성질이 다른 물질 계면에서의 As 단원자층을 증착시키는 것이었다[17]. 그러나, 이 surfactants를 첨가한 성장기구에 대해서도 해명하지 못한 점이 많다. 예를 들어, Si(111) 위에 단원자층인 Au를 증착시킨 위에서는 Si나 Ge의 2차원성장이 억제된다는 연구보고[8, 18]도 있다.

5. 각종 기능성 금속박막의 제작

수년간 여러 가지 성질·기능을 갖는 박막·다층막이 제작되었다. 본 기술해설에서는 다종의 박막제조리는 관점으로부터 박막물질의 종류에 대해서 기술하도록 하겠다 : 자성박막(연자증착, 자기기록매체막 등), 천이금속의 탄화물·질화물, 고용점금속의 silicide, 비정질합금막(Co/Ti 다층막 등의 비정질화), 탄소막(diamond, diamond 유사막, amorphous 탄소막), Ti의 탄화물·산화물·질화물·崩化物, 형상기억합금막(NiTi 등), Al의 산화물·질화물, Sn의 산화물·질화물, In의 산화물·질화물, c-BN, CN, 탄소 cluster막(C₆₀, C₇₀ 등). 이 중에서 다층막에 대한 비정질화에 대한 연구는, 금속다층막에서는 단순히 고상/고상의 비정질화(SSAR)와는 다른 장거리확산도 관계하기 때문에 저온에서 새로운 준안정상 제작이 가능한 것이 주요한 연구과제가 될 것이라 생각된다 [20].

6. 금속인공격자의 자성과 전도성

2종류 이상의 금속박막을 nano meter order의 주기로 서로 번갈아가며 적층한 구조를 갖는 금속다층막은 금속인공격자(Metallic Multilayers)라고 부른다. 금속다층막은 1940년대부터 X-Ray 회절격자로서 이용되었지만, 1980년경부터는 초미세박막이나 계면의

자성, 강자성금속층간의 상호작용 등의 연구용 시료로서 주목되기 시작하였다. 본 기술해설에서는 금속인공격자에 대한 연구결과의 일부를 소개하도록 하겠다[21-32].

자성박막이나 표면·계면에 대한 연구흐름과 amorphous 금속이나 hybrid 재료에 대한 연구의 흐름이 1980년대에 합류되어 금속인공격자에 대한 연구가 커다란 관심사가 되었다. 1990년에 일본 東北大學의 Fujimori 교수를 중심으로 하여 중점영역 연구가 시작되었으며, 1993년에는 일본에서 국제학회가 개최되었다[25]. 한편, 미국이나 유럽에서는 초미세박막의 표면·계면에서의 특이한 물성, 특히 자기적 성질에 대해서 주목되었기 때문에 금속인공격자의 물성에 대한 연구가 급진전하게 되었다[21-24].

인공격자는 각 층의 두께를 원자단위로 제어하여 적층한 인공구조막이다. 대부분의 금속에 대해서 각각의 층이 amorphous, 다결정, 배향성결정, 단결정(epitaxial 결정)으로부터 형성되는 조성변조구조를 갖는 금속인공격자가 합성 가능한 것이 실증되었다[23-24, 26]. 금속인공격자는 초기에 역학적 성질(강도, 탄성), 자기적 성질, 전기적 성질, 화학적 성질 등 여러 각도에서 연구되었다. Ni/Au(Cu) 다층막의 탄성율은 구성된 금속 단독일 때보다 크다고 보고되어, 추가실험이 진행되는 것과 함께 각종 금속다층막(Ag/Pd, Mo/Ni 등)이 실험적·이론적으로 연구되었다[24]. 이후, 탄성이상효과((Supermodulus effect)를 긍정하는 실험결과와 부정하는 실험결과가 보고되었다[27]. 그러나, 그 원인이 명백하다고는 말할 수 없으며, 보다 양질인 인공격자(epitaxial 성장한 인공격자)에 대해서 체계적인 연구가 필요하다고 생각한다.

Fe/Cr 금속인공격자가 거대자기저항효과(GMR, Giant Magneto Resistance)를 나타내는 발견[28]이 계기가 되어, 차세대 자기기록 disk의 head용 재료로서의 기대가 높아져 연구는 한층 더 발전하였다(그림 2). 일반적으로 자기저항효과는 수 % 밖에 안되는 작은 저항변화인 것에 대하여 인공격자에서는 100% 이상의 변화를 나타낸다(그림 3). 이 거대자기저항효과는 전기전도성에 자성이 커다란 영향을 미치는 것을 의미한다. 자성을 갖는 전자 spin과 전도전자 spin이 상호작용 하여 저항변화가 일어나는 현상

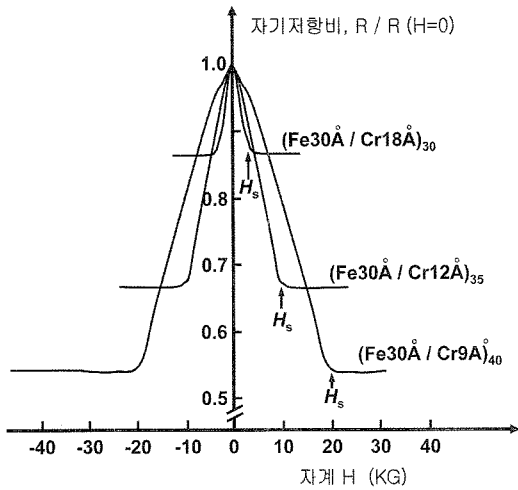


그림 2. Fe/Cr 인공격자 막의 저항에 대한 자장의존성 (4.2 K).

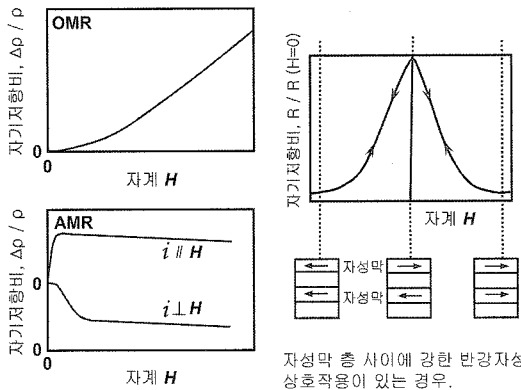


그림 3. 각종 자기저항 효과의 자장(H) 의존성. 정상자기저항효과(Ordinary Magneto Resistance), 이방성자기저항효과(Anisotropic Magneto Resistance / 縱 효과 $i \perp H$, 橫 효과 $i // H$) 및 거대자기저항효과 (Giant Magneto Resistance).

(spin에 의존한 산란기구)이 크게 관여한다고 인식되었다(그림 4). 이 연구는 전술한 것과 같이 실용적인 측면에서도 중요하며, GMR의 비자성층 두께 의존성이나 자성 granular 박막(자성입자를 비자성체에 분산시킨 박막)에서의 GMR의 발견 등, 연구는 다방면으로 확대되었다(표 6)[26]. GMR에 관련된 연구가 시작된 층간결합의 연구는 자성물리분야의 화제가 되기도 하였다[23, 26-30]. 커다란 GMR의 발견에는, 그 밖의 원인에 의한 저항을 극단적으로 작게 할 필요가 있으며, 금속인공격자를 구성하는 각 구성층의 결정완전성을 고려하여, 고품질 epitaxial 인공격자를 이용하는 연구의 중요성이 지적되었다[26, 30]. 금속인공격자의 구조평가나 성장과정에 관한 연구

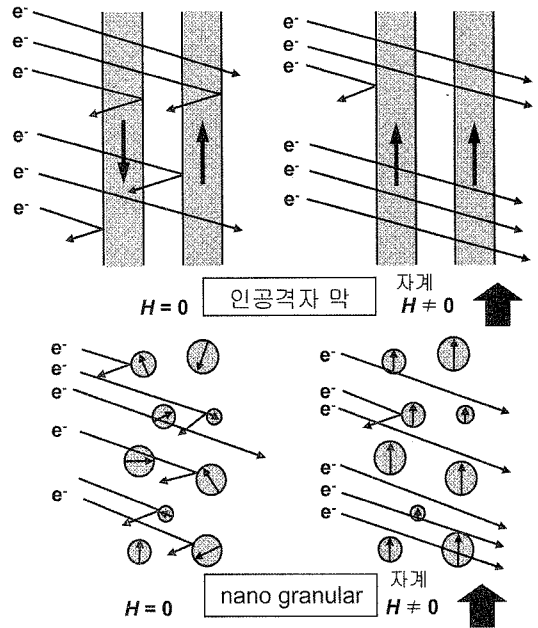


그림 4. 금속인공 격자막과 granular 자성체에서의 전자 산란거동 모델. 무자장과 자장에서는 spin을 달리하는 전자 산란거동이 다르며, 결과로서 자장인가로 전기저항이 변화하게 된다.

는 정밀화 되어 있다. 적층구조는 주기구조, 계면 흠어짐, 주기 흠어짐, 변형량 등에 대해서 해석한 연구 보고가 있다[26]. 양질의 금속인공격자의 제작에 있어서 buffer 층의 역할에 대해서는, 최초로 기판 상에 단위자층 정도인 3d 금속층을 증착하는 것이 유효하다고 하지만, 그렇지 않다고 하는 보고도 있다. 양질의 금속인공격자나 단위자층 제어의 규칙합금 형성에서 buffer층의 중요성에는 변함이 없지만, 상세한 mechanism에 대해서는 차후의 과제로 남아있다 [26, 31].

GMR 연구에 wedge형 혹은 미세가공기술을 응용한 type의 구조제어를 한 금속인공격자가 사용되었다[26]. Wedge형 구조의 다층막에서는 조성이 다른 막의 제작이 가능하기 때문에 목적하는 특성을 나타내는 구조를 효율 높게 결정할 수 있는 점 등의 이점이 있다. 막에 수직한 방향뿐만 아니라 막의 면내에서도 구조를 제어한 3차원적 인공격자에 대한 연구도 진행되고 있다. 금속인공격자에 대한 연구분야에는, 청색에 가까운 단파장 laser광용 광자기 기록 매체의 응용, 양자우물의 검출, 거대비선형효과나 자기원 2색성, 고주파 연자성 다층막(다층화에 의한 과

전류손실·보자력의 저감과 투자율의 증대, 다층화에 의한 nano 결정화) 등, 많은 분야를 포함하고 있다[24, 32]. 고기록밀도인 광자 기록매체로서의 수직자기이방성의 다층막 제작도 기대된다. 또한, 전자 spin과 전자 전도성을 합한 개념으로부터의 자성에 대한 연구와 응용을 기대한다.

자성 이외의 관심분야로서는, 초전도, 역학물성, 확산현상, X선 분광학 등이 있다[24]. 다층막에서의 확산현상은 계면 수가 많고, 또한 계면구조 그 자체에 현저하게 영향을 받는다. 금속인공격자의 응용에 있어서는 정밀한 구조해석과 함께 다층막에서의 확산현상에 대한 이해와 확산기구의 해석이 대단히 중요하게 될 것이라고 생각한다[23]. 금속인공격자의 광학현상, 특히 자기광학효과에 대한 연구는 역사도 짧으며, 실험적 검증에 많은 과제가 남아 있다. 측정된 미세한 광학현상을 전자구조계산의 결과와 비교하여 결론짓는 연구도 필요할 것이다[24].

금속인공격자는 연구용 시료로서도 가치가 있지만, 응용적인 가치를 찾아낸다면, 열평형상태에서는 얻을 수 없는 신물질들을 제작할 수 있다는 점, 또, 층 두께, 구조, 물질 조합에 무한한 가능성이 있는 점으로부터, 신물질로 될 수 있는 요소를 가진 재료라고 말할 수 있겠다.

7. 막의 기계적 성질

박막의 기계적 성질, 특히 박막의 응력에 대한 문제는 반드시 해결해야 할 과제이다. 박막에 도입된 응력 또는 변형은, 박막 그 자체의 형상을 변화시킬 뿐만 아니라, 전기·자기특성이나 광학특성 등에 영향을 미친다. 다층막의 초탄성효과의 발표는 laser 곡률측정, nano indentation, bulge test, 인장시험, X선 회절 등의 측정법을 발전시켰다[33]. 박막에는 항상 기판이 관여하기 때문에 기판과 박막과의 상호작용인 adhesion도 동시에 중요한 인자가 된다. Adhesion(물리적 adhesion과 실용적 adhesion)상태의 평가는 측정법에 의존하며, 일반적으로는, 부착력, 부착 에너지, 부착강도가 측정된다[34-35]. 실용적인 의미에서 부착·밀착의 향상은 현재 박막기술 중에서 최우선과제이다. 그러나, adhesion mechanism 그 자체가 미해명 상태이며, 실험결과의 해석방법이

나 정량적 평가 등에 대한 표준을 설정하여, 차후의 연구발전에 기여하여야 할 것이다[36].

8. 결 론

본 기술해설에서는 박막·다층막의 연구동향에 대하여 기술하였다. 박막의 성장과정은, 기판과 성장물질의 물리화학적 성질, 상호작용, 격자 misfit 인자 뿐만 아니라 기판온도, 과포화도나 기판표면의 morphology 등이 관여하여 대단히 복잡하다. 양질의 금속인공격자를 얻기 위해서는, 각각의 계(기판/성장막)에서 어느 인자가 성장과정이나 막 구조에 관여할 까를 확인하는 것이 중요하다. 박막의 성장과정을 in-suit로 측정·분석평가 하는 증착기술의 개발이 절대적으로 필요하다고 생각한다.

참고문헌

1. 隅山 兼治, 鈴木 謙爾 : *Materia*, **35** (1996) 42.
2. B. Lewis and J.C. Anderson : *Nucleation and Growth of Thin Films*, Academic, New York (1978).
3. J.A. Venables, G.D.T. Spiller and M. Hanbucken : *Rep. Prog. Phys.*, **47** (1884) 399.
4. 河津 璋 : *表面科學의 基礎와 應用*, 日本表面科學會, (1991) 420.
5. C. Argile and G.E. Rhead : *Surface Science Reports*, **10** (1989) 277.
6. 小野 雄敏 : *應用物理*, **56** (1987) 1126.
7. K. Yagi et al. : *Thin Solid Films*, **228** (1993) 12.
8. 日本物理學會 : *表面新物質과 epitaxy*, 培風館 (1992).
9. 青野 正和, 片山 光浩 : *應用物理*, **57** (1988) 1686.
10. *Proc. 1st Intl. Conf. Spectroscopic Ellipsometry : Thin Solid Films*, **233** (1993).
11. S. Hasegawa and S. Ino : *Thin Solid Films*, **228** (1993) 113.
12. 高柳 邦夫 : *日本金屬學會會報*, **29** (1990) 213.
13. W.A. Jesser and J.H. Van der Merwe : *Phil. Mag.*, **24** (1971) 295.
14. K. Takayanagi et al. : *Thin Solid Films*, **48** (1978) 137.
15. J.H. van der Merwe : *Chemistry and Physics of Solid Surfaces*, V. R. Vanselow and M. Howe. eds., Springer, Berlin (1984) 365.
16. 山本 良一 : *日本金屬學會會報*, **31** (1992) 644.
17. M. Copel, et al. : *Phys. Rev. Lett.*, **63** (1989) 632, 1826.
18. K. Yagi, H. Minoda and M. Shima : *Thin Solid Films*, **228** (1993) 12-17.

19. 古川 柳藏 : 日本金屬學會 春期大會 講演概要, (1997) 143.
20. A. Siber et al. : Thin Solid Films, **275** (1996) 73.
21. Synthetic Modulated Structures, ed. L. L. Chang and B. C. Giessen, Academic Press, New York, (1985).
22. T. Shinjo and T. Takada, eds. : Metallic Superlattices, Elsevier Science Pub., Amsterdam, 1987 / 新庄 輝也 : 日本金屬學會會報, **23** (1984) 689.
23. 金屬人工格子의 構造, 物性과 應用 : 日本金屬學會會報, **31** (1992) 777.
24. 藤森 啓安 : 金屬人工格子, 아그네 연구센터 (1994).
25. Proc. of MML '93 : J. Mag. Mag. Mat., **126** (1993).
26. 新庄 輝也 : Materia, **35** (1996) 190.
27. 阪上 潔 : 應用物理, **64** (1995) 678.
28. M.N. Baibich et al. : Phys. Rev. Lett., **61** (1988) 2472.
29. 新庄 輝也 : 應用物理, **61** (1992) 1214.
30. 井上 順一郎, 前川 暢通 : 日本應用磁氣學會誌, **16** (1992) 623.
31. 高梨 弘毅 : Materia, **35** (1996) 1204.
32. Proc. of MML '95 : J. Mag. Mag. Mat., **156** (1996) Nos. 1-3, April II.
33. Thin Films : Stresses and Mechanical Properties V, Mater. Res. Soc. Pittsburgh (1995).
34. A. Kinbara and I. Kondo : J. Adhesion Sci. Technol., **7** (1993) 767.
35. K.L. Mittal : Adhesion Measurement of Thin Films, Thick Films, and Bulk Coatings, ed. K. L. Mittal, ASTM, Philadelphia (1987).
36. 金原 察 : 眞空, **37** (1994) 379.