

증착방법에 따른 Al 피막의 증착율 및 증기분포에 관한 연구

정재인 · 정우철 · 손영호 · 이득진* · 박성렬*

포항산업과학연구원 센서·계측연구팀, *VMT(주) 기술연구소
(2000년 1월 26일 접수)

Study on the deposition rate and vapor distribution of Al films prepared by vacuum evaporation and arc-induced ion plating

Jae-In Jeong, Woo-Chul Jung, Young-Ho Son, Deuk-Jin Lee,* and Serng-Yerl Park*

Sensor & Instrumentation Research Team, RIST, *R&D Lab., VMT Co. Ltd.

(Received January 26, 2000)

요 약 - 진공증착 및 이온플레이팅 방법을 이용하여 냉간 압연된 강판상에 알루미늄 피막을 형성시킨 후, 증발율 및 증기분포 변화를 측정하고 각 증착방법에서의 증발율에 따른 증기분포 변화를 비교 및 검토하였다. 본 실험에서의 이온플레이팅은 증발원 근처에 이온화전극을 설치하는 방법으로 고전류 아크 방전을 유도하여 10^{-4} Torr 이하에서도 기존의 이온플레이팅에 비해 높은 이온화율을 얻을 수 있는 아크방전 유도형 이온플레이팅 (Arc-induced Ion Plating; AIIP) 방법을 이용하였다. 전자빔을 이용하면서 알루미나 크루시블을 사용하여 알루미늄을 증발시킬 경우 분당 $2.0 \mu\text{m}$ 이상의 높은 증발율을 얻을 수 있었으며, 이온플레이팅의 경우 이온화된 증기의 상호작용에 따른 산란 효과로 증발율이 다소 낮아짐을 알 수 있었다. $\cos^n\theta$ 로 이루어지는 증기분포의 결정인자(n)의 값이 진공증착의 경우는 1에 근접하는 것으로 나타났고 AIIP의 경우는 2 또는 그보다 더 큰 값으로 이루어지는 것을 확인하였다. 이로부터 이온플레이팅의 경우 이온화율 또는 기판 바이어스 전압의 효과가 다른 조건에 비해 증기분포에 더 크게 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

Abstract - Al films on cold-rolled steel sheet have been prepared by vacuum evaporation and arc-induced ion plating, respectively, and the evaporation rate and vapor distribution (thickness distribution over the substrate) have been investigated according to deposition conditions. The arc-induced ion plating (AIIP) method have been employed, which makes use of arc-like discharge current induced by ionization electrode located near the evaporation source. The AIIP takes advantage of high ionization rate compared with conventional ion plating, and can be carried out at low pressure of less than 10^{-4} torr. Very high evaporation rate of more than $2.0 \mu\text{m}/\text{min}$ could be achieved for Al evaporation using alumina liner by electron beam evaporation. The geometry factor n for the $\cos^n\theta$ vapor distribution, which affects the thickness distribution of films at the substrate turned out to be around 1 for vacuum evaporation, while it features around 2 or higher for ion plating. For the ion plated films, it has been found that the ionization condition and substrate bias are the main parameters to affect the thickness distribution of the films.

1. 서 론

알루미늄 피막은 색상이 미려하고 대기중에서 부식에 의한 색상 변화가 다른 금속에 비해 작기 때문에, 화장품 케이스나 액세서리 등의 장식용 코팅은 물론 반도체의 도전막, 반사판 그리고 자성재료나 강판의 내식성 보호피막 등에 폭넓게 이용되고 있다 [1, 2]. 또한 알루미늄은 이 금속이 갖는 제 특성(밀도가 낮고, 가공성,

내식성 및 열전도성이 우수)으로 인하여 산업상 응용분야가 매우 다양하다. 최근 우주개발이나 항공산업이 크게 발달하면서 각종 소재에 알루미늄을 피막처리 함으로서 내식성 및 기계적 성질을 우수하게 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 예로서 McDonnell Douglas 사에서는 비행기에 사용되는 각종 부품에 알루미늄을 코팅하여 내부식 및 내마모 재료로 사용하고 있다 [3]. 용융도금에 의한 알루미늄 도금강판은 자동차의 머플러,

배기계 등의 재료에 널리 이용되고 있으며, 독일에서는 강판상에 알루미늄을 진공증착하여 저장용 캔 재료 및 가전제품에 사용하고 있는 등 그 응용은 매우 다양하다. 한편, 1984년에 처음 발견된 Nd-Fe-B 영구자석 [4, 5]은 우수한 자성에도 불구하고 대기중 또는 부식환경에서 쉽게 부식이 발생하기 때문에 니켈이나 아연 등을 도금하거나 에폭시 코팅 또는 알루미늄을 증착하여 내식성을 향상시키고 있다 [6-9].

알루미늄은 전기도금으로 코팅할 경우 그 효율이 낮아 생산성이 떨어지기 때문에 대부분 물리증착법을 이용하고 있다. 물리증착에는 크게 진공증착, 스퍼터링 그리고 이온플레이팅이 있으며 내식성 향상을 위한 목적의 경우에는 일반적으로 이온플레이팅 방법을 이용하고 있다. 이온플레이팅은 1963년 미국의 Mattox에 의해 개발된 물리증착 기술의 일종으로 [10], 진공 분위기에서 증발된 증기를 플라즈마층내에서 이온화시켜 피도금체인 음극에 가속시켜 부착시키는 코팅 방식이다. 피도금체에는 증착 물질뿐만 아니라 가스, 이온 등도 함께 입사, 충돌하므로 코팅층의 치밀화 및 밀착력 향상 효과를 가져올 수 있다 [11]. 물리증착법으로 코팅한 알루미늄 피막은 대체로 피막층에 많은 구멍을 포함하고 있을 뿐만 아니라 기판과의 밀착성이 열악한 단점도 가지고 있는바, 이를 해결하기 위해서 진공증착의 경우는 기판을 고온으로 가열하여야 하며 이온플레이팅에서는 기판에 인가되는 전압을 증가시키거나 이온화율을 증대시키기 위해 더 많은 양의 방전 가스를 도입할 필요가 있게 된다. 그러나 기판을 고온으로 가열할 경우는 기판에 손상을 줄뿐만 아니라 기판이 고온이 될수록 부착량이 감소하여 경제성이 저하되며, 기판에 고전압을 인가하는 방법 또한 기판에 손상을 주게 된다. 방전가스 도입량을 증대하여 이온화율을 높여야 하면 방전가스가 피막에 혼입되어 피막을 손상시키게 되며 방전가스와 증발되는 알루미늄 사이에 산란이 일어나 역시 부착량의 감소를 초래하게 된다.

본 연구에서는 전자빔 증발원을 사용하는 진공증착 및 이온플레이팅에 의해 강판상에 알루미늄 피막을 형성시킨 후 증발 및 증기분포를 실험적으로 구하고 이론적으로 계산한 그래프와의 비교를 통해 증기분포를 결정하는 구조인자를 결정하고자 하였다. 특히, 알루미늄 나 크루시블을 라이너로 이용하여 알루미늄을 고속으로 증발시킬 경우의 증착방법에 따른 증기분포를 구하였다.

본 연구에서 사용된 이온플레이팅은 부착량의 문제점

을 해결하면서도 밀착성 및 내식성을 향상시킬 수 있는 아크방전형 이온플레이팅(Arc-induced Ion Plating; AIIP)방법 [12, 13]을 이용하여 고진공에서의 이온플레이팅을 실현하였으며, 본 방법을 이용하여 알루미늄의 증발 및 증기분포를 실험적으로 도출하였다. 또한, 이들 결과로부터 증착 시스템의 생산성을 향상시키기 위한 설계자료로의 활용은 물론 피증착재의 코팅층 두께의 균일성을 확보하여 효율적인 코팅의 가능성을 제시하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1. AIIP의 원리 및 특성 [12, 13]

AIIP의 원리를 설명하기 위한 개략도를 그림 1에 나타내었다. 일반적으로 공업적인 용도의 경우 증착물의 증발면에서의 증기압은 0.1~1 Torr 정도가 된다. 증발원과 이온화전극사이의 공간에서의 압력분포는 2차곡선의 경향을 나타내며 증발원에서 멀어짐에 따라 압력은 낮아진다. 이렇게 증발물을 증발시키면서, 증발원 근처의 적당한 위치에 이온화전극(ionization electrode)을 배치하고, 증발원에 대해 20~100 V의 양의 전압을 걸어주면 증발원에서 방출하는 열전자 혹은 2차전자가 이온화전극을 향해 이동하면서 증발입자와 충돌하게 되어 증발입자를 이온화시킨다. 즉, 그림 1에 나타낸 바와 같

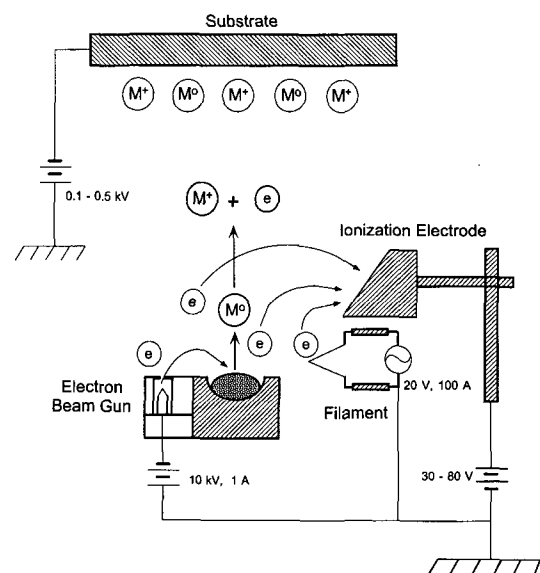


그림 1. Schematic diagram illustrating the principle of arc-induced ion plating.

이 증발입자는 $M \rightarrow M^+ + e$ 라는 형태로 플라즈마 이온과 전자로 분리되는 것이다. 이때, 저융점 물질을 코팅하는 경우에는 증발원의 가열온도가 낮아 열전자 방사율이 적으므로 그림 1에서처럼 증발원 바로 옆에 열전자 방사용 필라멘트를 설치하면 보다 효과적으로 물질을 이온화시킬 수 있다.

플라즈마상의 이온으로 된 증발입자의 운동방향은 초속도를 가진 방향이 지배적이지만 전계분포의 영향도 받게 된다. 이렇게 이온화된 증발입자는 초속도 또는 전계의 방향으로 이동하면서 다시 증발입자와 충돌하여 플라즈마 이온과 전자를 만들어 낸다. 이와 같은 과정이 반복되면서 많은 증발입자가 이온화되는 소위 cascade 현상이 생겨 이온화전극에는 많은 전류가 흐르게 된다. 전자가 이온화전극을 향해서 진행되는 공간의 압력분포는 증발면이 0.1~1 Torr이고 이온화전극 부근이 10^{-3} ~ 10^{-4} Torr 정도이기 때문에 전자는 증발입자와 충돌확율이 높은 증발면 부근에 많게 되어 이온화전극으로 향하기 때문에 접지 전위에 있는 증발원과 증발원에 대해 양으로 대전된 이온화전극간의 임피던스는 대단히 작게 되고, 따라서 도체의 경우에는 자유전자가 흐르는 것과 같이 되어 아크에 가까운 방전이 생긴다. 이때, 아크 방전이 조절할 수 없을 정도로 지나치지 않고, 안정적이며 지속적으로 유지하기 위해서는 증발물질의 증발율을 제어해야 한다. 이 경우 열전자와 이차전자는 조중사의 역할을 하고 있는 것이다. 증발물질이 도체일 경우 열전자, 이차전자 또는 이온화에 의해 생성된 전자 이외에 자유전자가 증발물이 존재하는 증발원과 이온화전극사이의 공간을 주행하기 때문에 증발입자의 이온화가 대단히 높게 된다. 이 방식은 기본적으로 불활성 가스를 사용하지 않고도 높은 이온화율을 얻을 수 있으며 따라서 밀도가 높고 내식성도 높은 양질의 피막을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

2.2. 증기분포의 이론적 배경

증발원으로부터 증발되는 증기의 증기분포 즉, 기판에서의 두께분포는 Hert [14, 15] 및 Mayer [16] 등에 의해 이론 및 실험적으로 계산되었다. 그 후 새로운 형태의 증발원이 개발되면서 종종 증발율 및 증기분포에 대한 실험적인 데이터가 발표되기도 하였으나 [17], 증기분포가 각종 증착변수에 민감하게 반응하여 달라지기 때문에 일관된 데이터를 이론적으로 계산한 논문은 그다지 발표되지 않았다. 본 논문에서는 Hert 등이 채택한 증발원 즉,

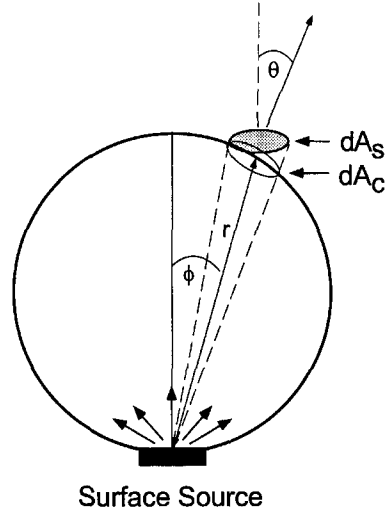


그림 2. Evaporation from a surface source.

미소 영역 (small area) 또는 면증발원 (surface source)에 적용되는 증발 분포의 계산식을 사용하여 이를 이론적으로 고찰하고 이론적인 데이터와 실험값을 증착변수 및 증착방법을 달리하여 비교 및 검토하였다.

그림 2는 면증발원에서의 증기분포의 각도 의존성을 도식적으로 나타낸 것이다. 그림에서 dA_s 는 기판 미소면적의 표면적이며 $dA_c = dA_s \cos \theta$ 의 관계가 있다. 면증발원 즉, 그림 2와 같은 형태에서의 증기의 각도의 존성은 일반화된 식을 사용할 경우 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다 [18, 19].

$$\frac{dM_s}{dA_s} = \frac{M_e(n+1) \cos^n \phi \cos \theta}{2\pi r^2} \quad (1)$$

여기서 dM_s 는 dA_s 에 도달하는 증발물의 질량이며 dA_s 는 그림 2에서와 같이 기판의 미소면적을 나타내는 표면적이다. M_e 는 증발물의 총질량이며, n 은 증착방법이나 증착기의 내부 구조와 관련되어 변화되는 인자로 결국 증기분포 즉, 기판에서의 두께분포를 결정하는 구조인자(geometry factor)가 된다. 일반적으로 진공증착의 경우, n 은 대략 1~2에 가까운 값을 가지는 것으로 알려져 있으며, n 이 클수록 증기는 기판의 중앙 쪽으로 몰리게 되어 그 만큼 기판의 폭 방향 두께 편차는 커지게 된다 [19]. 한편, 본 실험에서 사용한 것과 같은 평행판 기판을 사용할 경우는 그림 3과 같은 증착 구조를 가지며 증착두께는 단면적과 밀도로부터 계산할 수 있으므로 이 경우 증착

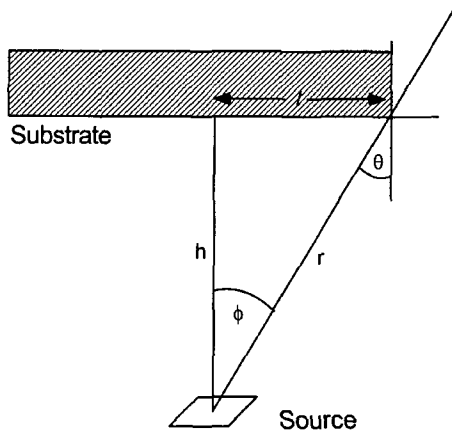


그림 3. Geometry of evaporation onto parallel plane substrate.

두께는 식 (1)로부터 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$d = \frac{dM_s}{\rho dA_s} \quad (2)$$

식 (2)에서 ρ 는 증발물질의 밀도이다. 그림 3에서 보는 바와 같이 평행판 기판의 경우 $\cos\theta = \cos\phi = h/r$ 이므로 식 (1)과 (2)를 조합하면 다음 식 (3)과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$d = \frac{M_e(n+1)\cos^n\phi\cos\theta}{2\pi\rho r^2} \left(\frac{h}{r}\right)^n \frac{h}{r} \\ = \frac{n+1}{2} \frac{M_e}{\pi\rho} \frac{h^{n+1}}{(h^2+l^2)^{\frac{n+3}{2}}} \quad (3)$$

기판의 중심 부위 즉, 두께가 가장 두꺼운 부분($l=0$)에서의 두께는 식 (4)와 같다.

$$d_0 = \frac{n+1}{2} \frac{M_e}{\pi\rho h^2} \quad (4)$$

따라서 기판의 길이방향에 대한 증착두께의 상대비는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{d_0} = \frac{1}{(1+(l/h)^2)^{\frac{n+3}{2}}} \quad (5)$$

본 연구에서는 식 (5)를 이용하여 기판의 폭방향 두께를 측정하여 증기분포를 구하였으며, n 의 값을 변화

시키면서 이론적으로 얻은 그래프와 실험데이터를 비교하여 최종적으로 n 의 값을 결정하였다.

2.3. 진공증착 및 AIP 실험방법

알루미늄 피막의 제조는 실험용 이온플레이팅 장치를 이용하였으며 본 장치의 개략도를 그림 4에 나타내었다. 증발원으로는 10 kW 전자총을 사용하였고, 증발을 원활하게 하고 증발율을 증가시키기 위해 알루미늄 크루시블을 라이너로 사용하였다. 본 연구에서 사용한 기판은 가로, 세로가 각각 200 mm이고 두께가 0.8 mm인 도금용 냉연강판을 사용하였으며, 증착전 초음파 세척에 의해 충분히 탈지한 후 증착기내에서 글로우 방전에 의한 청정을 실시하여 표면 산화막을 제거하였다.

진공증착의 경우는 전자빔 증발원을 이용하여 다른 증착변수를 고정시키고 증발율만을 변화시켜 단순히 증발시킨 경우이며, AIP의 경우는 이온화전극과 필라멘트를 이용하여 아크 방전을 유도한 후 기판에 바이어스 전압을 인가하여 실험을 수행하였다. 한편, AIP의 경우는 이온화 효율을 높이기 위해 아르곤 가스를 10^{-4} Torr 정도 주입한 경우와 별도의 이온화용 가스를 주입하지 않은 경우를 각각 비교하였다. 증발원과 기판사이의 거리는 25 cm로 고정하였고, 기판온도는 200°C , 기

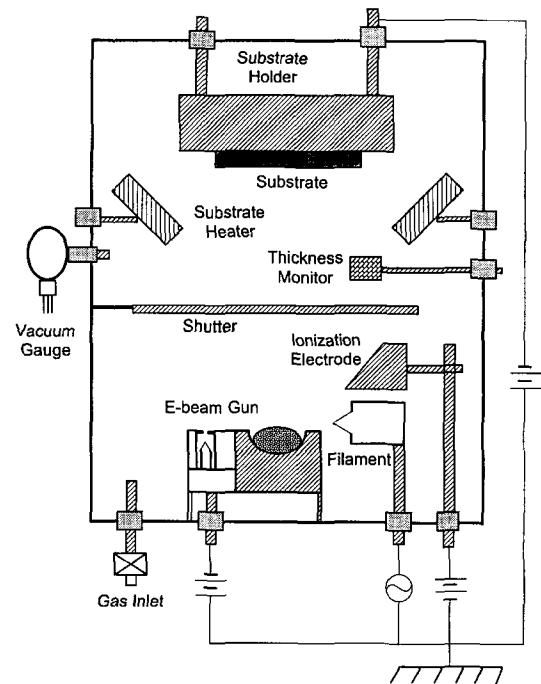


그림 4. Schematic diagram of the experimental system.

표 1. Experimental parameters and values for Al evaporation and ion plating

증착방법	증착변수	조절범위
진공증착	전자빔 전력	10 kV, 200~600 mA
	증발원과 기관간 거리	25 cm
	기관온도	200°C
	증발율	0.5~2.5 $\mu\text{m}/\text{min}$
	증착두께	20~40 μm
AIPP	전자빔 전력	10 kV, 200~600 mA
	증발원과 기관간 거리	25 cm
	기관온도	200°C
	증발율	0.5~2.5 $\mu\text{m}/\text{min}$
	증착두께	10~20 μm
	기관바이어스	200 V, 0.4~1.2 A
	이온화 전극	50 V, 10~24 A
	보조전극(필라멘트)	10 V, 50 A
아르곤 가스 압력	0~5 $\times 10^{-4}$ Torr	
증착 두께	20~40 μm	

판 바이어스 전압은 200 V로 유지하였으며, 증착두께는 20~40 μm 범위로 한정하였다. 표 1은 본 연구에 사용된 증착변수 및 실험 조건을 나타낸 것이다.

증발율은 저속 증발에서부터 2.0 $\mu\text{m}/\text{min}$ 이상의 고속 증발까지 변화시켰으며 증착방법에 따른 증발율의 변화를 관찰하였고, 증착 후 두께를 측정하여 증기분포를 결정하였다. 증착 두께의 측정은 XRF(X-ray Fluorescence)와 와전류식 두께 측정기를 사용하여 측정하였으며, 수정진동자를 이용하여 in-situ로 증발율을 측정하여 일정 두께의 피막을 형성하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 증착방법에 따른 증발율의 변화

그림 5는 진공증착 및 AIPP에서의 전자빔 전력에 따른 증발율의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 AIPP(1)은 아르곤 가스를 주입한 경우이며, AIPP(2)는 아르곤 가스를 주입하지 않은 경우이다. 그림에서 보면 증착방법에 관계없이 비교적 낮은 전력임에도 불구하고 매우 높은 증발율을 나타냄을 알 수 있다. 이러한 현상은 알루미늄 크루시블을 사용하여 열 손실을 최소화하였기 때문에 저항가열증발원 [20]이나 수냉 구리 도가니 [21]를 사용할 경우의 증발율과 비교하면 동일한 전력에서 2배에서 5배정도 높은 값이다. 전자빔의 전력이 5kW 이상이 되면 더 이상 급하게 증가하지 않고 증발율이 포화상태에 이르는 것을 알 수 있다. 이는 전력의 증

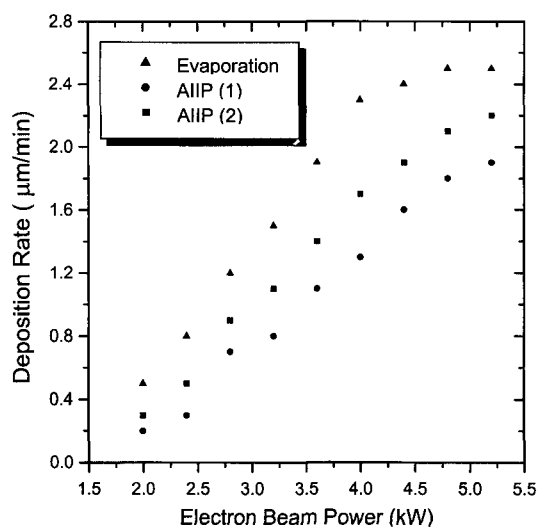


그림 5. Al evaporation rate according to the electron beam power for evaporation and ion plating, respectively. The alumina crucible liner is used for evaporation, and the source to substrate distance is 25 cm. AIPP (1) means AIPP deposition at the Ar atmosphere of 4×10^{-4} Torr, and AIPP (2) means AIPP deposition without introduction of any ionization gas.

가에 따른 증발물의 spitting 발생이나 전자빔이 증발물 내부로 너무 깊게 투과하여 증발물 표면의 형상변화는 물론 표면 증발물체의 에너지 전달이 포화 상태에 이르기 때문인 것으로 해석할 수 있다 [21, 22]. 이러한 현상은 증발율이 높은 진공증착의 경우가 보다 현저하게 나타남을 그림으로부터 알 수 있다. 아르곤 가스를 3×10^{-4} Torr 주입하여 AIPP 방법으로 증착한 경우가 가장 증발율이 낮게 나타나고 있는데, 이는 증발물이 가스에 의해 산란되어 나타나는 현상으로 해석할 수 있다. 또한, 가스를 주입하지 않고 AIPP로 증착한 경우에도 일반 증착에 비해 낮은 증발율을 보이는 것은 중성 원자에 비해 이온화된 원자 또는 분자들의 상호작용에 따른 산란 효과가 보다 크기 때문에 나타난 현상으로 설명할 수 있다.

그림 6은 진공증착 방법으로 증착한 경우에 전자빔의 전력이 2.0 kW 이하로 낮은 경우의 증발율의 변화를 보여주고 있다. 증발율이 거의 직선적으로 변화하면서 기울기가 매우 급격함을 알 수 있다. 전자빔의 전력이 높을 경우와 비교하면 전력의 증가에 따라 증발율의 변화가 보다 급격하다는 것이다. 이는 알루미늄 크루시블을 이용하여 열 손실을 방지하였고 알루미늄이 비교적 낮은 온도에서 증발이 일어나기 때문인 것으로 해석할

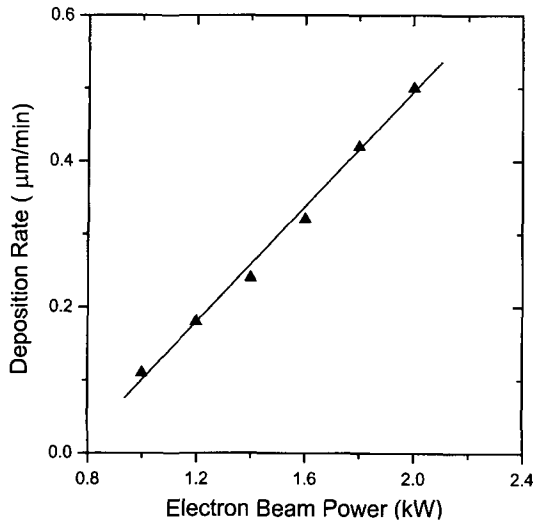


그림 6. Change of Al evaporation rate at low beam power.

수 있다.

3.2. 증착조건에 따른 증기분포의 변화

증기분포의 변화는 크게 증발율에 따른 변화, 증착방법 및 조건에 따른 변화를 관찰하였다. 각각의 실험결과를 식 (5)의 이론적인 계산값 즉, $\cos^n \phi$ 에서의 n 의 값을 변화시켜 그런 이론적인 그래프와의 비교를 통해 구조인자 n 의 값을 결정하였다.

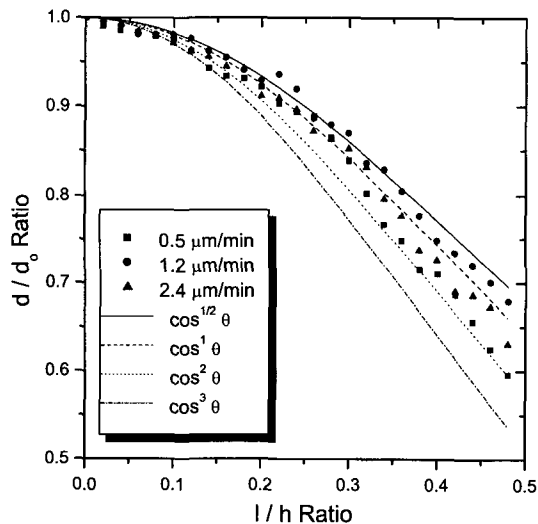


그림 7. Thickness distribution of evaporated Al films deposited at different evaporation rate. The $\cos^n \phi$ function of thickness distribution is also plotted for $n = 0.5, 1, 2, 3$, respectively.

그림 7은 진공증착으로 알루미늄 피막을 형성시켜 두께분포를 구한 것으로 증발율을 각각 0.2, 1.2, 2.4 $\mu\text{m}/\text{min}$ 으로 변화시키면서 기판의 중심으로부터 0.5 cm 단위로 두께를 측정하여 그린 그림이다. 증기분포의 구조인자를 결정하기 위해 $\cos^n \phi$ 함수에서 n 의 값이 각각 0.5, 1, 2, 3일 경우의 증기 분포 그래프도 동시에 나타내었다. 그림 7에서 l/h 의 값이 0.2 이상 즉, 기판의 중심부로부터 조금 떨어진 곳에서의 증기분포를 살펴보면, 증발율이 낮은 경우에는 구조인자가 2의 값에 가깝게 분포하고 있으며, 고속 증발의 경우에는 1에 가깝게 분포하고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 증발율이 증가하면서 증발입자간 산란으로 인한 증기의 퍼짐 현상으로 이해할 수 있다. 그러나 증발율이 더욱 높아져 2.4 $\mu\text{m}/\text{min}$ 이 되면 1.2 $\mu\text{m}/\text{min}$ 의 경우보다 오히려 구조인자의 값이 커지는데 이는 산란효과보다는 고속 증발을 위해 전력을 증가시킴으로 인한 용융상태의 변화로부터 그 원인을 찾을 수 있다. 즉, 전자빔의 전력이 과다하게 커지면 용융상태의 증발물이 오목하게 들어가면서 증발 표면의 표면적이 달라지고 따라서 오히려 중앙부근에서의 증발율이 이상적으로 증가하면서 결국 구조인자의 값을 크게 하는 효과로 나타나는 것이다 [21].

그림 8은 그림 7과 같으나 l/h 의 값이 0.2이하인 경우 즉, 기판 중심부근에서의 증기분포를 확대시켜 그린 그림이다. 그림 8로부터 기판 중심부근에서의 두께분포를 살펴보면 우선, 두께분포가 $\cos^n \phi$ 와는 다른 양상을

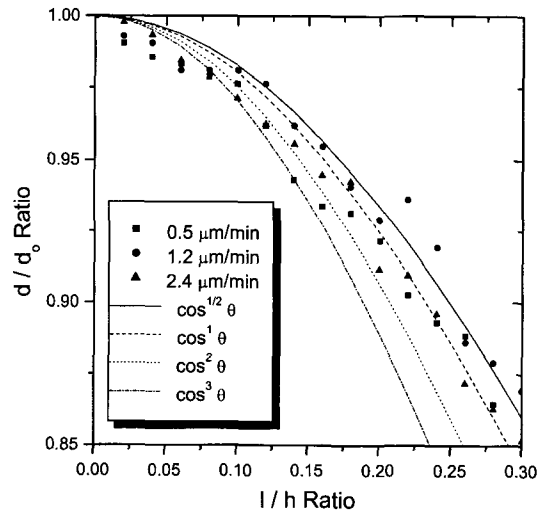


그림 8. Thickness distribution of evaporated Al films at low l/h ratio from Fig. 7.

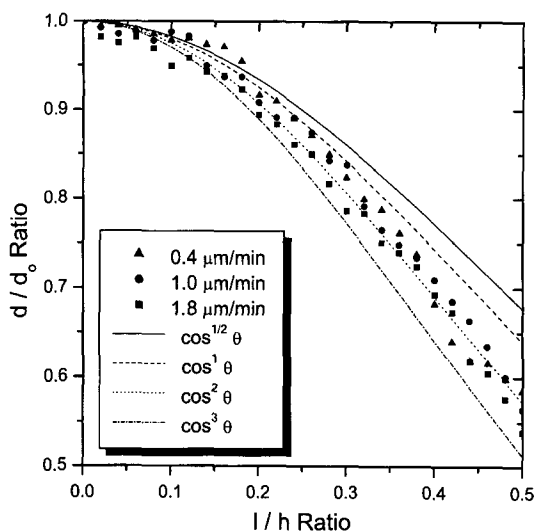


그림 9. Thickness distribution of ion plated Al films deposited at different evaporation rate. The AIPP was performed at the Ar atmosphere of 3×10^{-4} Torr.

보이고 있음을 알 수 있다. 증발율이 낮은 경우에는 어느 정도 $\cos^n\phi$ 의 경향을 따라가고 있으나 고속 증발의 경우에는 $\cos^n\phi$ 와는 상당한 차이를 보이고 있으며, 어떤 경향성을 보이고 있지 않다. 이는 기관 중심부근에서의 증기분포는 $\cos^n\phi$ 의 분포가 잘 성립하지 않음을 보여주는 것이다. 오히려 기관중심에 매우 가까운 곳에서는 구상 분포에 가까운 경향을 보이고 있다.

그림 9는 아르곤 가스를 3×10^{-4} Torr 주입하여 AIPP로 알루미늄 피막을 형성시켜 두께분포를 구한 것으로 이때의 증발율은 각각 0.3, 1.0, 1.8 $\mu\text{m}/\text{min}$ 으로 변화시키면서 측정하여 그린 그림이다. 진공증착의 경우에는 달리 증발율 변화에 따른 두께분포의 변화가 그다지 크지 않음을 알 수 있다. l/h 의 값이 0.2 이상에서는 대체로 $\cos^2\phi$ 의 분포를 나타내고 있다. AIPP에서 증발율의 변화에 따른 특정한 경향성을 보이지 않는 것은 AIPP의 경우 진공증착과는 달리 증발물의 증발양태 보다는 이온플레이팅 효과 즉, 이온화조건과 기관에 인가된 바이어스 전압의 효과가 증기분포에 더 많은 영향을 미치고 있음을 의미하는 것이다. 여기서 한가지 주지할 사실은 AIPP 방법에서는 증발율에 따라 동일한 이온화 전극의 전압에서 이온화전류가 달라지므로 증발율의 변화는 곧 이온화조건의 변화와 연관된다는 것이다. 물론, 동일 증발율에서의 이온화조건을 달리하는 방법에 있으나 본 실험에서는 생략하였다. 위의 사실로부터 추론해

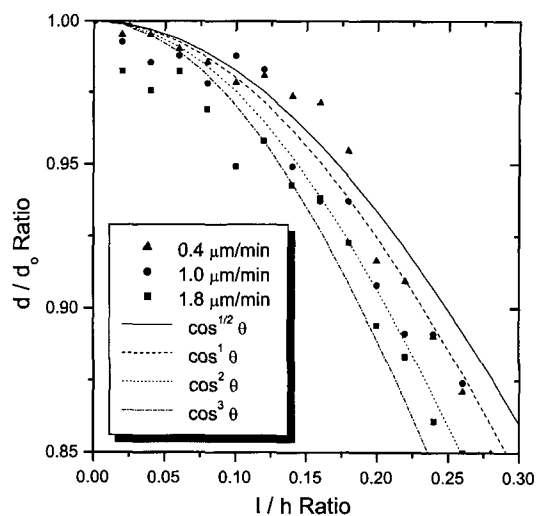


그림 10. Thickness distribution of ion plated Al films at low l/h ratio from Fig. 9.

보면 AIPP에서의 구조인자가 진공증착과 다르게 나타나는 것은 결국 AIPP의 경우 바이어스 전압의 효과가 크게 작용하고 있음을 이해할 수 있다. 이러한 사실은 뒤에서 설명하는 그림 11에서도 나타난다.

그림 10은 그림 9로부터 기관의 중심부근의 두께분포를 나타낸 그림으로 진공증착과 마찬가지로 $\cos^n\phi$ 의 경향성은 보이지 않고 있다. 반면 진공증착과 비교할

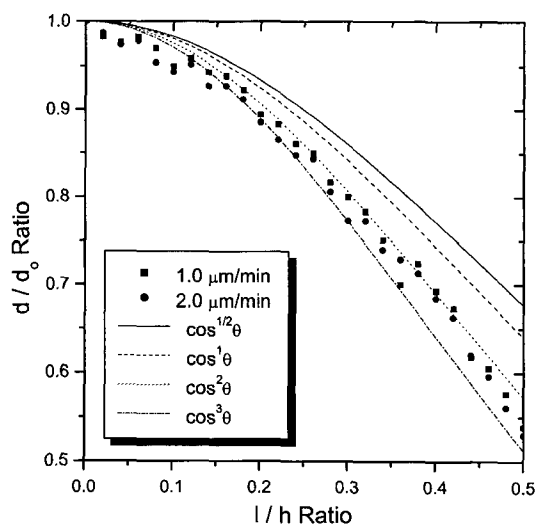


그림 11. Thickness distribution of ion plated Al films deposited at different evaporation rate. The AIPP was performed without introduction of ionization gas.

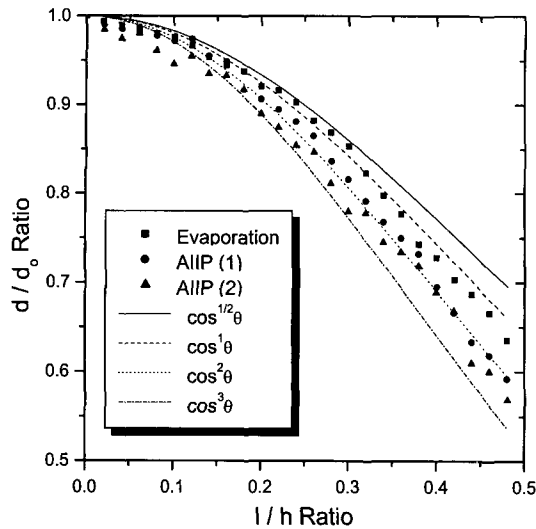


그림 12. Thickness distribution of Al films deposited at different deposition methods. The thickness value was averaged for each deposition method.

경우 두께 분포의 편차가 훨씬 크게 나타나고 있음을 볼 수 있다.

그림 11은 AIIIP 방법으로 증착시키되 아르곤 가스를 도입하지 않고 피막을 형성시킨 경우이다. 그림 11에서는 증발율을 2가지 경우로만 측정하였는데, 이는 아르곤 가스를 도입하지 않고 AIIIP를 할 경우에는 증발율이 높을 경우에만 아크 방전이 형성되었기 때문이다. 그림 9 즉, 아르곤 가스를 주입한 경우보다 구조인자의 값이 더 커짐을 알 수 있다. 이러한 현상은 아르곤 가스가 없을 경우 가스에 의한 증기의 산란 효과가 작아지면서 기판 바이어스의 효과가 그림 9보다 더 크게 작용하고 있음을 의미하는 것이다. 다시 말하면 바이어스 전압이 인가된 기판 쪽으로 이온화된 증기가 가속되면서 중앙부근으로 증기가 몰리기 때문에 나타난 현상으로 이해할 수 있다.

그림 12는 각 증착방법의 두께를 평균하여 하나의 그래프로 나타낸 그림이다. 그림에서 AIIIP (1)은 아르곤 가스를 주입한 경우이며, AIIIP (2)는 아르곤 가스를 주입하지 않은 경우이다. 그림 12로부터 결론적으로 얘기하면 진공증착의 경우에는 구조인자가 1에 근접하여 분포하고 있으며, AIIIP의 경우는 2에 가깝게 나타나지만 가스를 주입하지 않은 경우가 구조인자의 값이 좀 더 크게 나타난다.

4. 결 론

진공증착 및 이온플레이팅에 의해 알루미늄 피막을 형성시켜 증발율 및 증기분포를 실험적으로 구하고 그 값을 이론값과 비교를 통해 $\cos^n \phi$ 의 형태로 나타나는 증기분포의 구조인자 (n)를 결정하였다. 알루미늄의 증발에는 전자빔 증발원을 사용하였고, 알루미늄 크루시블을 라이너로 사용하였으며 도금용 냉연강판상에 20~40 μm 의 두께로 증착하여 강판의 폭방향 두께를 측정하였다. 본 연구결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 알루미늄 크루시블을 라이너로 사용하여 알루미늄을 증발시킨 경우 낮은 전력에서도 분당 2.0 μm 이상의 높은 증발율을 얻을 수 있었으며, 이온플레이팅의 경우 이온화된 증기의 상호작용에 따른 산란 효과로 증발율이 다소 낮아짐을 확인하였다.
2. 증기분포 계산으로부터 진공증착의 경우는 대체로 구조인자 값이 1에 근접하는 것으로 나타났으며, 이온플레이팅의 경우는 2 또는 그 보다 큰 값으로 구성됨을 확인하였다.
3. 진공증착의 경우 증발율에 따라 증기분포의 변화가 뚜렷하게 나타난 반면 이온플레이팅의 경우는 그다지 큰 변화는 나타나지 않았다.
4. 진공증착의 경우 증발율이 낮을 경우 구조인자의 값이 보다 크게 나타나 폭방향 두께 편차가 커짐을 알 수 있었다.
5. 이온플레이팅에서의 두께 분포는 이온화용 가스를 주입하지 않을 경우 구조인자의 값이 커져 두께 편차가 그 만큼 커짐을 확인하였다. 이온플레이팅의 구조인자가 커지는 사실로부터 이온플레이팅에서는 이온화율 또는 기판 바이어스 전압의 효과가 증발양태의 변화에 따른 영향보다도 증기분포에 더 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다.

참고문헌

- [1] L. I. Maissel and R. Glang, Handbook of Thin Film Technology (McGraw-Hill, New York, 1983).
- [2] H. K. Pulker, Coatings on Glass (Elsevier, New York, 1984), Chap. 9.
- [3] E. R. Fannin and D. E. Muehlberger, 14th Airlines Plating Forum, Oklahoma (1978), MCAIR 78-006, MCDONNELL AIRCRAFT COMPANY.

- [4] M. Sagawa, S. Fujimura, N. Togawa, H. Yamamoto, and Y. Matsuura, *J. Appl. Phys.* **55**, 2083 (1984).
- [5] J. J. Croat, J. F. Herbst, R. W. Lee, E.F. Pinkerton, *J. Appl. Phys.* **55**, 2078 (1984).
- [6] T. Minowa, H. Yoshikawa, and M. Honshima, *IEEE Trans. Magn.* **25**, 3776 (1989).
- [7] P. Mitchell, *IEEE Trans. Magn.* **26**, 1933 (1990).
- [8] K. W. Kang, B. C. Kim, and J. T. Song, *J. Mater. Sci.: Mater. Sci. in Electronics* **6**, 4 (1995).
- [9] C-D. Qin, A. S. K. Li, and D. H. L. Ng, *J. Appl. Phys.* **79**(8), 4845 (1996).
10. D.M. Mattox, *J. Appl. Phys.* **34**, 2493 (1963).
- [11] N. A. G. Ahmed, *Ion Plating Technology; Developments and Applications* (John Wiley & Sons Ltd, New York, 1987).
- [12] J. I. Jeong, J. H. Hong, J. S. Kang, H. J. Shin, and Y. P. Lee, *J. Vac. Sci. Technol. A* **9** (5), 2618 (1991).
- [13] 정재인, 문종호, 홍재화, 강정수, 이영백, *한국표면공학* **회지** **25**(1), 24 (1992).
- [14] M. Knudsen, *Ann. Physik* **28**, 75 (1909).
- [15] M. Knudsen, *Ann. Physik* **52**, 105 (1917).
- [16] H. Mayer, *Z. Physik* **52**, 235 (1929).
- [17] Y. Kawasimo, M. Nakasone, and E. Komatsu, *J. Vacuum Society of Japan* **29**(5), 341 (1986).
- [18] H. K. Pulker, *Coatings on Glass* (Elsevier, New York, 1984), Chap. 6.
- [19] M. Ohring, *The Material Science of Thin Films* (Academic Press Inc., San Diego, 1992).
- [20] J. I. Jeong, B. M. Lim, J. H. Moon, J. H. Hong, J. S. Kang, and Y. P. Lee, *J. Vac. Sci. Technol. A* **12**(3), 873 (1994).
- [21] R. J. Hill, *Physical Vapor Deposition* (The BOC group, USA, 1986).
- [22] D. L. Smith, *Thin Film Deposition* (McGraw-Hill, Singapore, 1997), Chap. 8.