

표면처리된 흑연 보트를 이용한 알루미늄의 증발 특성

정재인*, 양지훈

포항산업과학연구원 설비자동화연구본부

Evaporation Characteristics of Aluminum by Using Surface-treated Graphite Boat

J. I. Jeong*, J.H. Yang

Facility & Automation Research Division, Research Institute of Industrial Science & Technology, Pohang City, Gyoung-buk 790-330, Korea

(Received February 19, 2009 ; revised February 24, 2009 ; accepted February 27, 2009)

Abstract

Resistive heating sources are widely used to prepare thin films by vapor deposition because they are cheap, and easy to install and handle in vacuum system. Graphite is one of materials used to make the resistive heating source, but until now only limited applications have been possible as it reacts easily with evaporating materials at high temperature. In this study, evaporation characteristics of aluminum have been investigated by using graphite boat thermally treated with BN powder. The employed graphite boat has been prepared by spray-coating BN powder onto the cavity surface of the boat and thermal treatment with aluminum in vacuum at the temperature of more than 1400°C. The voltage-current characteristics as well as resistivity changes of the graphite boat have been investigated during aluminum evaporation according to the applied voltage and time. The evaporation aspect has been picturized during flash evaporation for 40 seconds based on the characterization results. The evaporation rate of the graphite boat has been compared with that of BN boat. The graphite boat showed some different characteristics compared with BN boat, in that the evaporation occurred at the last stage of flash evaporation. The film appearance according to the applied voltage has been compared, and also the reflectance of the resulting film has been investigated according to the film thickness. It has been found that the graphite boat thermally treated with BN powder can be used for aluminum evaporation without problem.

Keywords: Resistive heating source, Evaporation boat, Graphite boat, Aluminum film, Evaporation characteristics, Physical vapor deposition

1. 서 론

저항가열 증발원은 저렴하면서도 간편하기 때문에 진공증착을 이용한 박막 제조에 널리 이용되며 일반적으로 텅스텐이나 몰리브덴과 같은 내화물 금속을 코일이나 보트 형태로 제작하여 사용하고 있다¹⁻⁴⁾. 이러한 저항가열 증발원은 증발원 전체가 가열되면서 물질을 증발시키기 때문에 고온에서 증발원이 쉽게 파손되거나 증발물질과 증발원 사이의

반응(고온에서의 합금형성 등)으로 인하여 증발량이 일정치 못한 경우가 많으며, 따라서 박막의 정밀 제어가 어려울 뿐만 아니라 때에 따라서는 1 μm 이상의 후막 형성에도 어려움이 있는 등 그 응용에 많은 제약을 갖는다.

내화물 금속과 함께 흑연이나 TiB₂·BN(이하 BN 보트) 등과 같이 용융점이 높고 전기 전도성을 가진 재료 등도 보트 또는 도가니 형태로 제작하여 저항가열 증발원으로 오랫동안 사용되어 왔으며 특히 BN 보트는 브라운관의 내면코팅과 유기 EL 전극용 알루미늄 박막의 제조 등에 널리 이용되고 있다^{1,4,5)}.

*Corresponding author. E-mail : jijeong@rist.re.kr

알루미늄 박막은 열 및 전기적 특성이 뛰어나고 가공성 및 내식성이 우수하기 때문에 산업상 응용 분야가 매우 다양하다. 반도체의 Metallizing에 알루미늄 박막이 사용되고 있음은 잘 알려진 사실이며^{6,7)}, 이 외에 각종 금속의 내식성 및 기계적 성질의 향상은 물론 다양한 용도의 광학부품 등에도 알루미늄을 피막처리하여 사용하고 있다⁸⁻¹³⁾. McDonnell Douglas사에서는 비행기에 사용되는 각종 부품에 알루미늄을 코팅하여 내부식 및 내마모 재료로 사용하고 있다¹¹⁾. 최근에는 알루미늄 합금에 의한 부식방지¹⁴⁾ 알루미늄이 첨가된 투명도전막 등의 제조에도 널리 이용되고 있다¹⁵⁾.

알루미늄은 융점이 낮은 반면 증기화되는 온도가 높을 뿐만 아니라 고온에서는 대부분의 내화물 금속과 반응하기 때문에 저항가열 증발원을 이용하여 증발시키기가 매우 까다로운 물질중의 하나이다¹⁶⁾. 이러한 이유로 지금까지는 알루미늄과 반응이 적고, 젖음(Wetting) 특성이 우수한 BN 보트를 사용하거나⁹⁾ 텅스텐 필라멘트를 이용한 한시적 증발이 주로 이용되어 왔다^{3,4)}. 그러나 BN 보트는 가격이 비싸고 원리적으로 보트 전면에 젖은 상태에서 증발이 되기 때문에, 증발물의 손실을 초래함은 물론 증발물의 양에 따라 증발율이 현저하게 변화하거나 증발물이 덩어리로 튀는 현상(Splash)이 나타나는 등의 단점이 있다. 따라서 이 보트는 알루미늄 Wire를 연속적으로 공급하면서 증발시키는 경우나 순간 고속 증발(Flash Evaporation, 이하 플래시 증발)에 많이 이용되고 있다¹¹⁾. 텅스텐 필라멘트를 이용하는 경우는 수명이 수 회 내외로 짧고 증발율의 조절이 어려우며, 최대 증착 두께가 수천 Å 정도에 그치는 등의 문제점이 있다⁴⁾.

비정질탄소나 흑연은 다양한 산업분야에서 사용되고 있으며 일부는 진공 증발용으로도 사용되고 있다³⁾. 이들 재료로 만들어진 보트는 BN 보트 대비 저렴하다는 장점은 있으나 알루미늄 증발용으로 사용할 경우, 보트의 온도가 약 800°C 이상이 되면 탄화물(Al_4C_3)이 형성되어 보트가 파손되기 때문에 사용할 수 없게 된다.

지금까지 흑연 보트의 표면처리를 통해 코팅층(반응 방지를 위한 보호층)을 형성하여 알루미늄 증발에 사용하기 위한 연구는 매우 제한적으로 이루어져 왔다^{4,17)}. 상기 논문에서는 질화붕소(BN)를 스프레이 코팅한 후 고온에서 알루미늄과 반응시켜 보트 표면에 코팅층을 형성시킨 후 코팅층의 반응 기구를 규명하고 알루미늄의 증발을 등을 조사하여 그 결과를 발표하였다. 그러나 코팅된 흑연 보트를 이용한 알루미늄의 증발에 있어서 구체적인 증발

특성과 코팅 특성 등에 대해서는 아직까지 규명되지 않고 있다.

본 연구에서는 표면처리를 통해 코팅층을 형성시킨 흑연 보트를 이용하여 알루미늄을 증발시키는 공정에서 알루미늄의 제반 증발 특성을 조사하였다. 특히, 브라운관의 내면 코팅이나 광학 필름에 이용되는 플래시 증발 특성을 체계적으로 정리하였고, 증발 과정에 대한 모식도를 완성하였다. 또한, 증발된 알루미늄의 증기분포를 조사하여 BN 보트와 비교하였고, 알루미늄 피막의 반사율을 측정하여 저항가열 증발원으로서의 사용 가능성을 검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서의 실험은 크게 보트 설계 및 가공, BN powder spray 처리, 열처리에 의한 코팅층 형성, 흑연 보트의 전압-전류 및 온도 특성 조사, 증발 실험 및 특성 평가 순서로 진행하였다.

흑연 재질은 Toyo Tanso사의 HK-75 모델을 이용하였으며 상기 흑연은 밀도가 1.84 g/cm^3 이고 비저항은 $1,650 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 이다. 보트의 크기는 플래시 증발에 널리 이용되는 크기로 폭이 7 mm이고 길이를 110 mm로 가공하였으며, 증발이 일어나는 Cavity의 크기는 60 mm로 가공하였다.

그림 1은 상기의 크기로 가공된 보트의 설계도를 보여주고 있다.

가공된 흑연 보트의 표면처리를 통한 코팅층의 형성은 다음과 같이 실시하였다. 우선, 가공된 보트의 증발이 이루어지는 Cavity 내부 표면에 스프레이형 BN(일본 ShinEtu사 제품; 트리클로로 에탄 용액에 BN 분말이 약 50-55% 함유되어 있음)을 20~30 μm 의 두께로 스프레이 코팅하였다. 이렇게 스프레이 코팅된 흑연 보트는 약 2시간 정도 공기 중에서 건조시킨 후, 반응시킬 알루미늄을 담아 진공 용기내의 보트 홀더에 장착하였다. 보트를 장착시킨 후 용기내의 진공이 10^{-5} Torr 이하가 되면 보트 내의 불순물과 오염물질들을 제거하기 위해 약 500°C

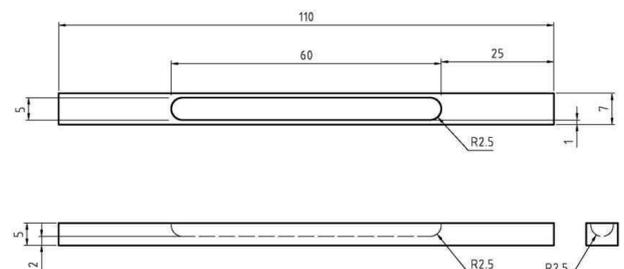


Fig. 1. The drawing of the graphite boat for flash evaporation of aluminum.

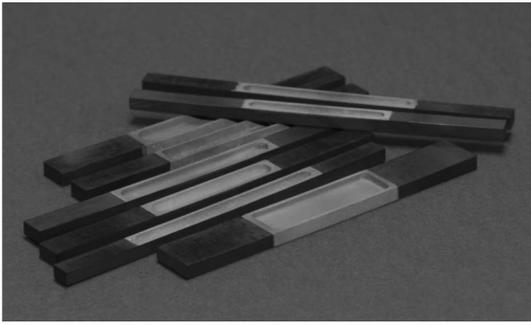


Fig. 2. A photograph of surface-treated graphite boat for aluminum evaporation.

에서 수분간 열처리를 행한 후 알루미늄의 용융온도 이상으로 온도를 올려 알루미늄을 녹인다. 알루미늄이 녹아 증발부위 전면에서 완전히 Wetting되면 보트 온도를 1400°C 이상에서 수분간 유지하여 알루미늄과 BN을 반응시켜 흑연 표면에 코팅층을 형성시켰다. 이렇게 형성된 코팅층은 대부분이 AlN으로 이루어져 있으며 B은 Al과 결합한 화합물을 이루어 덩어리 형태로 코팅층과 흑연 사이의 계면에 존재하였다^{4,17)}.

그림 2는 표면처리가 완료된 흑연 보트의 사진이다. 그림의 회색으로 보이는 부분이 표면처리된 부분으로 실제 증발이 이루어지는 Cavity이다.

표면처리가 완료된 흑연보트는 그림 3의 저항가열식 증착 장치를 이용하여 증발 실험을 실시하였다. 그림 3은 저항가열식 증착 장치의 내부 구조를 보여주는 개략도이다. 진공용기는 SUS 304로 만들어진 지름 400 mm의 Bell jar 형태이며, 유회전 펌프(Rotary pump)와 액체질소(LN₂) Trap이 달린 유

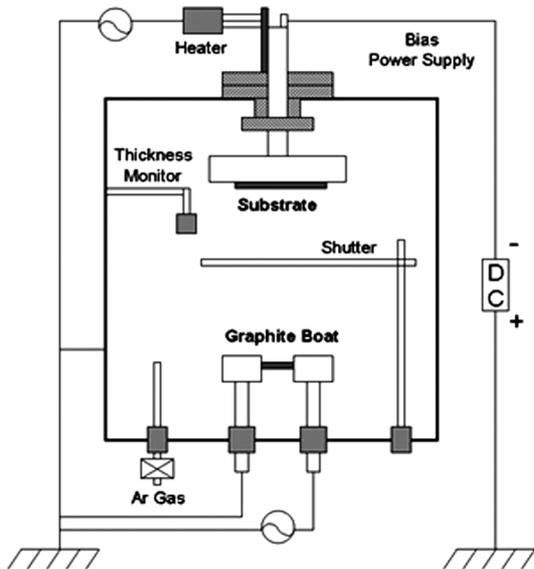


Fig. 3. Schematic diagram of thermal evaporation system.

확산 펌프(Diffusion pump)로 이루어진 배기계, 두 개의 증발원 홀더가 장착된 내부장치 그리고 히터가 내장되어 최고 400°C까지 가열할 수 있는 기관 홀더로 이루어져 있다. 진공도는 30분 이상 배기하였을 때 5×10⁻⁵ Torr를 얻을 수 있으며, 필요한 경우 LN₂ Trap을 사용하면 더 낮은 압력을 얻을 수 있다. 흑연 보트에 공급하는 Power는 10 V, 500 A (5 kW)의 고전류 교류 Transformer를 사용하였으며, Power의 조절은 SCR 정류기를 사용하였다. 흑연보트의 고정은 별도의 증발원 홀더를 사용하였으며 증발원 홀더는 다시 냉각이 되는 구리 봉에 부착하여 사용하였다.

본 연구에서의 증발율의 측정은 수정진동자 방식의 두께 측정기(XTC2 deposition controller, INFICON)를 이용하였고 알루미늄 피막의 반사율은 Spectrophotometer(UV-1601, SHIMADZU)를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 알루미늄의 증발 특성

그림 4는 코팅된 흑연 보트의 전압에 따른 표면 온도 변화를 보여주는 그림이다. 보트 표면의 온도는 Pyrometer를 이용하여 측정하였으며 표면의 절대적인 온도 보다는 상대적인 온도이므로 실제 보트의 표면 온도와는 차이가 있을 수 있다. 전압이 5 V에 도달하면 알루미늄의 증발이 비교적 원활히 이루어지는 1200°C에 도달하고 6 V가 넘으면 1400°C 이상이 됨을 볼 수 있다. 흑연 보트에 인가한 전압에 따라 보트의 표면온도는 선형적으로 변화하고 있으나 1200~1300°C 구간에서처럼 알루미늄의 용융 및 증발이 수반될 경우 전압 상승에 따

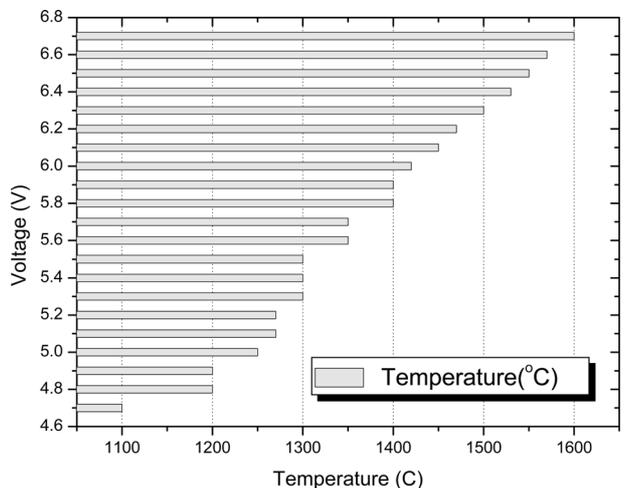


Fig. 4. Temperature change of evaporation surface according to the applied voltage.

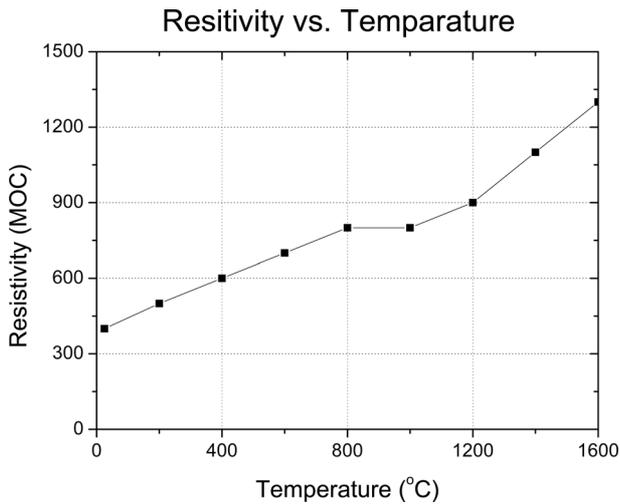


Fig. 5. Resitivity change of the boat according to the temperature rise.

라 온도 변화가 발생하지 않는 구간이 나타남을 볼 수 있다. 이는 알루미늄이 용융되어 보트 표면에 Wetting되면서 인가된 전력이 용융 및 증발열로 빼앗기기 때문인 것으로 판단된다.

알루미늄의 경우 증착이 비교적 원활하게 이루어지는 10^{-2} Torr의 Vapor pressure를 얻을 수 있는 온도는 약 1200°C 이며 브라운관 내부의 알루미늄 증착처럼 플래시 증발을 이용하는 경우는 $1400\sim 1500^{\circ}\text{C}$ 정도를 이용하는 것이 일반적이다. 따라서 플래시 증발을 위해서는 6 V 내외의 전압 인가가 필요함을 알 수 있다.

그림 5는 흑연 보트의 온도에 따른 비저항의 변화를 조사한 그래프이다. 비저항은 전압을 올려 흑연 보트의 온도를 올리면서 그때의 전류-전압 특성을 이용하여 산출하였다. 그림에서 MOC는 Micro-ohm centimeter($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)를 의미한다. 800°C 까지는 비저항이 선형적으로 증가하나 $800\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 사이에서는 비저항이 크게 변화하지 않았다. 그러다가 1100°C 이상이 되면서 비저항이 상승하는 결과를 얻었다. 이는 1000°C 부근에서 저항이 감소하는 흑연의 비저항 특성이 반영된 것으로 판단된다.

그림 6은 알루미늄을 증발시키면서 관찰한 흑연 보트의 가열 양상과 전류-전압 특성을 보여주는 그래프이다. 증발물인 알루미늄은 무게가 40 mg이고 직경이 1.5 mm인 Wire를 사용하였다. 전압이 약 4 V 정도되면 보트가 붉게 가열되기 시작하여 5 V 가까이 도달하면 알루미늄이 뭉쳐진 후 녹기 시작하며 6 V 근처에서 완전히 녹아 Cavity 전면에 Wetting되면서 증발이 일어난다. 그림에서 알 수 있듯이 알루미늄이 완전히 Wetting되어 보트 전면에 퍼지면 전류가 급격히 상승했다가 증발이 완료되면

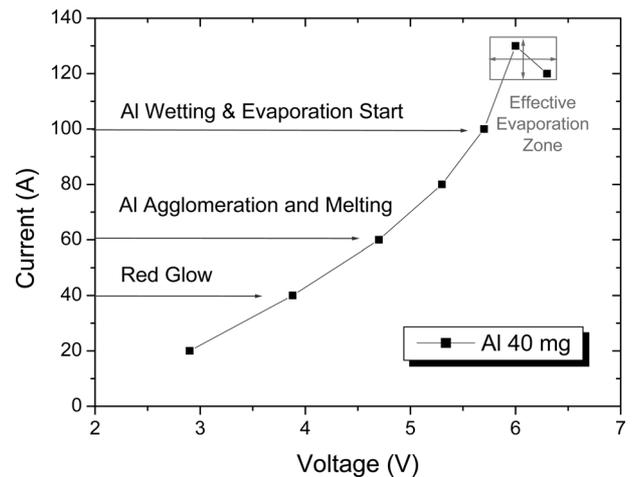


Fig. 6. I-V characteristics and appearance change of the boat during Al evaporation.

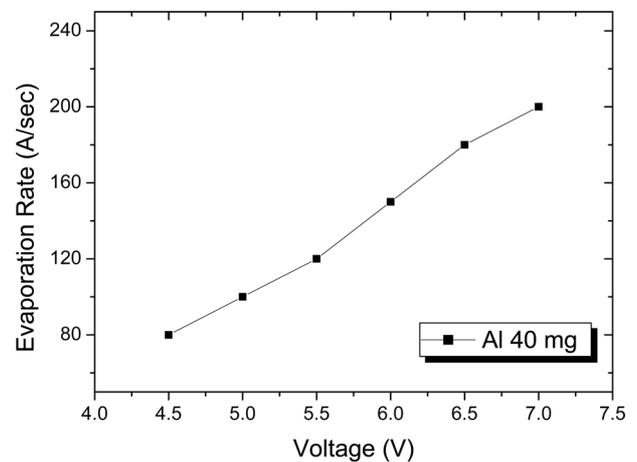


Fig. 7. Change of evaporation rate according to the applied voltage.

전류가 감소하고 있음을 볼 수 있다. 그림에서 상자로 그려진 부분은 증발이 가장 활발히 일어나는 전압 및 전류 범위를 나타낸 것이며 이 영역의 범위를 Effective evaporation zone으로 표시하였다.

그림 7은 전압에 따른 증발률 변화를 관찰한 것이다. 상기 증발율은 4 V의 전압에서 1분간 예열을 거친 후 0.5 V씩 전압을 올려가면서 30초 이상 그 전압을 유지한 후 두께측정기에 측정되는 최대의 증발율을 나타낸 것이며 이때 두께측정기와 증발원 사이의 거리는 25 cm로 고정하였다. 전압이 5 V 이상이 되면 100 \AA/s 정도의 증발율에 도달하며 6 V 근처에서는 150 \AA/s 내외의 증발율을 기록하고 있다.

그림 8은 플래시 증발 조건에서 나타나는 전류 변화를 측정된 것으로 알루미늄을 증발시키면서 증발 시간에 따른 보트의 전류 변화를 관찰한 것이다. 이때 증발 시간은 40초를 기준으로 하고 예열시간 20초 본 가열 시간을 20초로 나누었으며 예열은 4.5 V, 본 가열은 6 V로 고정하여 실험한 것이다. 증

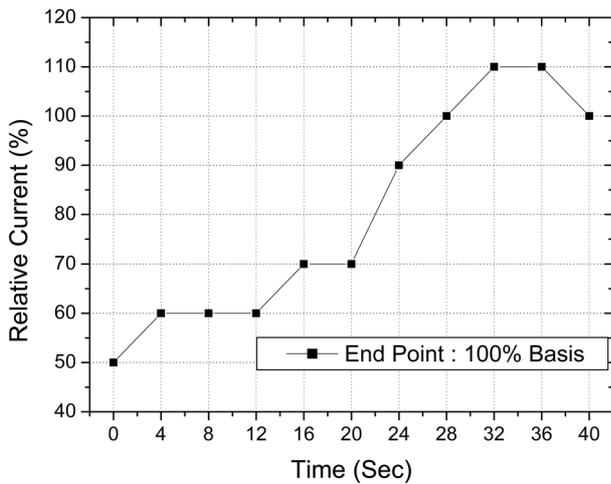


Fig. 8. Relative change of boat current according to the time at flash evaporation.

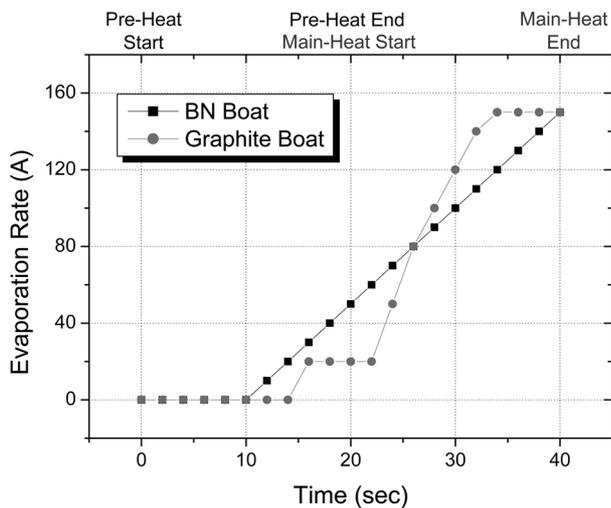


Fig. 9. Comparison of evaporation rate between graphite and BN boat.

발물인 알루미늄은 무게가 40 mg이고 직경이 1.5 mm ϕ 인 Wire를 사용하였다. 그림에서 보면 알루미늄이 녹아 완전히 Wetting이 되면 증발물이 없는 상태의 전류 값에 비해 약 10% 정도의 전류가 상승하며 알루미늄 증발이 완료되면 다시 전류가 감소함을 알 수 있다. 즉, 알루미늄이 전류 상승에 기여하고 있다는 것이다. 이는 알루미늄이 보트 전체에 퍼져서 증발되고 있음을 의미하며 전류가 상승하는 비율은 보트 내에 담겨있는 알루미늄의 양에 비례하게 된다.

그림 9는 플래시 증발에서 증발 시간에 따른 증발율의 변화를 측정하고 BN 보트와 비교한 그래프이다. BN 보트는 증발 초기부터 증발이 일어나 선형적으로 증가하는 경향을 보이는 반면 흑연 보트의 경우 본 가열의 전압이 인가된 이후 증발율이 서서히 증가하다가 알루미늄이 완전히 Wetting된 이

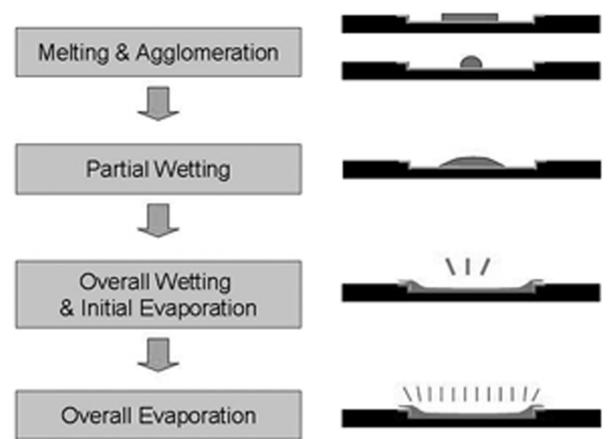


Fig. 10. Evaporation aspect of Al by the passage of time at flash evaporation.

후에 대부분이 증발되는 경향을 보이고 있다. 이는 본 연구에서 실험한 흑연 보트가 기존의 BN 보트와 가장 큰 차이점이라고 볼 수 있다. 이러한 양상은 흑연 보트의 Wetting 특성 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 즉, 흑연 표면에 형성된 코팅층의 Wetting 특성이 BN 보트와는 달리 일정 온도 이상에서만 알루미늄을 충분히 Wetting시키며 완전한 Wetting이 이루어졌을 때 효과적인 증발이 일어난다는 것이다.

반면 BN 보트의 경우는 알루미늄이 보트 표면에 Wetting되면서 동시에 증발이 일어나며 따라서 온도에 따라 선형적인 증발을 곡선을 나타내는 것이다.

그림 10은 흑연 보트를 이용한 알루미늄의 플래시 증발에서 초기 가열부터 증발 과정까지의 양상을 시간에 따라 육안으로 관찰하고 관찰 결과를 도식적으로 나타낸 증발 양상의 모식도이다. 초기에는 알루미늄 Wire가 둥글게 뭉쳐져 있다가 시간이 지나면서 보트 표면에 Wetting되기 시작한다. 시간이 지나 알루미늄이 보트 표면에 완전히 Wetting되면 이때부터 고속의 증발이 일어나 증착이 이루어지게 된다.

3.2 알루미늄 박막의 두께 분포와 특성

그림 11은 흑연 보트를 이용하여 플래시 증발 조건에서 유리 기판상에 알루미늄 피막을 제조한 후 두께 분포를 측정하고 BN 보트로 증발시킨 경우 및 이론적 계산치와 비교한 그래프이다. BN 보트가 $\cos^4\theta$ 에 가까운 두께 분포를 보인 반면 흑연 보트는 $\cos^{1/2}\theta$ 의 식을 따르고 있어 BN 보트보다 우수한 증기분포를 보이고 있음을 알 수 있다.

그림 12는 흑연 보트에 인가된 전압 및 전류에 따라 형성된 알루미늄 피막의 외관상태를 정리하여 나타낸 그래프이다. 여기서의 전압은 본 가열 전압

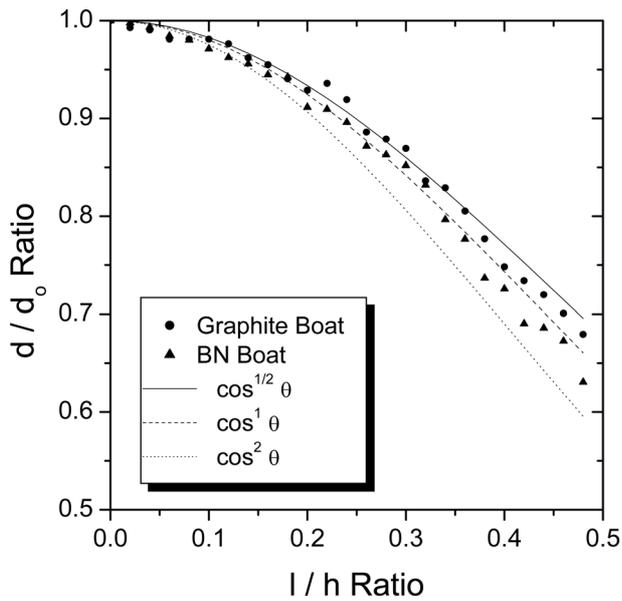


Fig. 11. Thickness distribution curve of graphite and BN boat, respectively.

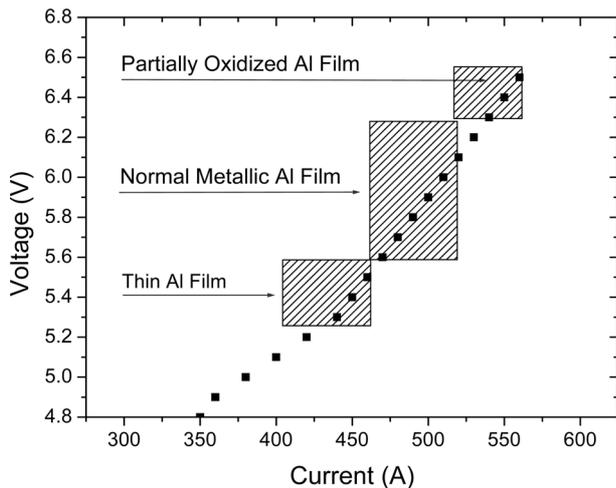


Fig. 12. Appearance of Al films according to the applied current.

을 의미하며 본 가열 시간은 20초로 통일하였다. 5.5~6.4 V까지는 Normal한 알루미늄 피막이 형성되며 5.5 V 이하에서는 피막의 두께가 얇고, 6.5 V 이상이면 표면이 약간 산화되는 경향을 보이고 있다. 이러한 산화 피막은 전압 상승에 의해 보트 전체의 온도가 상승하여 증발물 이외의 보트 표면에 존재하던 불순물이 증발물과 동시에 증발되면서 생성되는 것으로 판단되나 이러한 산화물 생성의 정확한 구명을 위해서는 좀더 깊이 있는 분석이 필요하다.

그림 13은 유리 기판에 두께 별로 알루미늄 피막을 제조하고 그 반사율을 Spectrophotometer로 측정 한 그래프이다. 두께가 1000 Å 이상이 되면 반사율이 포화되고 있음을 볼 수 있다. 이는 BN 보트

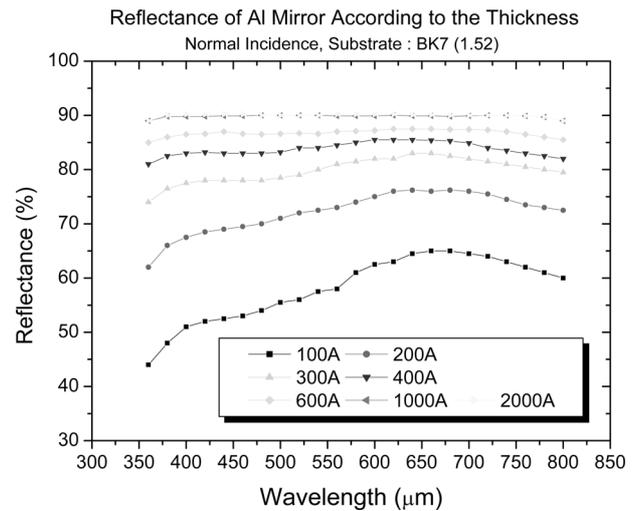


Fig. 13. Reflectance change of Al films according to the film thickness.

와 유사한 결과이며 이로부터 본 연구에서 실험한 흑연 보트가 알루미늄 피막 제조에 효과적으로 사용될 수 있음을 알 수 있었다.

4. 결 론

흑연 보트 표면에 BN 분말을 Spray한 후 고온 열처리를 통해 알루미늄과 반응시켜 코팅층을 형성 시킨 흑연 보트를 이용하여 알루미늄을 증발시키면서 다양한 조건에서 알루미늄의 증발 및 피막 특성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 흑연 보트에 인가한 전압에 따른 보트의 표면 온도는 선형적으로 변화하였으며 알루미늄의 용융 및 증발이 발생할 경우 전압이 증가하여도 온도 변화가 발생하지 않는 구간이 나타났다. 이는 알루미늄이 용융되어 보트 표면에 Wetting되면서 인가된 전력이 용융 및 증발열로 빼앗겼기 때문인 것으로 판단되었다.

2. 흑연 보트의 온도에 따른 비저항은 800°C까지는 선형적으로 증가하나 800~1000°C 사이에서는 비저항이 크게 변화하지 않았다.

3. 흑연 보트의 전압에 따른 가열양상을 관찰하여 전압이 약 4 V 정도 되면 보트가 붉게 가열되기 시작하여 5 V 가까이 도달하면 알루미늄이 뭉쳐진 후 녹기 시작하며 6 V 근처에서 완전히 녹아 Cavity 전면에 Wetting되면서 증발이 일어남을 확인하였으며 알루미늄이 완전히 Wetting되어 보트 전면에 퍼지면 전류가 급격히 상승했다가 증발이 완료되면 전류가 감소하고 있음을 알 수 있었다. 이로부터 알루미늄 증발에 효과적인 Effective evaporation zone의 존재를 검증하였다.

4. 흑연 보트의 증발율은 5 V 이상이 되면 100 Å/s 정도의 증발율에 도달하며 6 V 근처에서는 150 Å/s 내외에 도달함을 확인하였고 플래시 증발 조건에서 나타나는 전류 변화로부터 알루미늄이 전류 상승에 기여하며 전류가 상승하는 비율은 보트 내에 담겨있는 알루미늄의 양에 비례함을 알 수 있었다.

5. 플래시 증발 조건에서 유리 기판상에 알루미늄 피막을 제조한 후 두께 분포를 측정된 결과 $\cos^{1/2}\theta$ 의 식을 따르고 있어 BN 보트보다 우수한 증기분포를 보이고 있음을 확인하였고 피막 두께에 따른 반사율의 변화를 측정하여 본 연구에서 실험한 흑연 보트가 알루미늄 피막 제조에 효과적으로 사용될 수 있음을 확인하였다.

결론적으로 BN 보트의 경우 본 가열 초기부터 증발이 일어남에 비해 흑연 보트의 경우 본 가열 후반부에 급속한 증발이 일어나는데 이는 흑연 표면에 형성된 코팅층의 Wetting 특성이 BN 보트와는 달리 일정 온도 이상에서만 알루미늄을 충분히 Wetting시키며 완전한 Wetting이 이루어졌을 때 효과적인 증발이 일어나기 때문인 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Vacuum Evaporation Sources, Catalogue by R. D. Mattis Company, Long Beach, California, U.S.A. (1989).
2. Vacuum Evaporation Sources, Catalogue by Jori Resources Corp., Ventura, California, U.S.A. (1989).
3. Evaporation Sources, Catalogue by Vac's Metal Corp., Tokyo, Japan (1989).
4. 정재인, 임병문, 문중호, 홍재화, 강정수, 이영백, 한국표면공학회지, 24 (1991) 1.
5. *Graphite Applications*, Catalogue by Toyo Tanso, Osaka, Japan (1990).
6. D. Pramanik and A. N. Saxena, *Solid State Technol.*, Part I. 26(1) (1983) 127.
7. *Ibid*, Part II. 26(3) (1983) 131.
8. L. I. Maissel and R. Glang, *Handbook of Thin Film Technology* (McGraw-Hill, New York, 1983), Chap. 23.
9. K. L. Chopra, *Thin Film Phenomena* (McGraw-Hill, New York, 1969), Chap. 2 and 6.
10. H. K. Pulker, *Coatings on Glass* (Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, The Netherlands, 1984), Chap. 9 and references therein.
11. N. A. G. Ahmed, *Ion Plating Technology* (John Wiley & Sons Ltd., 1987), Chap. 3 and 7, and references therein.
12. M. Neiryneck, W. Samaey, and L. Van Poucke, *J. Vac. Sci. Technol.*, 11(4) (1974) 647.
13. S. Schiller, H. Förster, G. Hotzsch, and G. Jäsch, in *Proc. of the Conf. on Electron Beam Melting and Refining*, Part 2, edited by R. Bakish (Bakish Materials Corp., Englewood, 1989), p.155.
14. 김찬욱, 조기현, 석한길, 한국표면공학회지, 40(5) (2007) 214.
15. 박상은, 박세훈, Lue Jie, 송풍근, 한국표면공학회지, 41(4) (2008) 142.
16. M. B. Bever, *Encyclopedia of Materials Science and Engineering* (Pergamon Press Ltd., 1986), Vol. 1, pp.398-402.
17. 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) (1994) 873.