

집속이온빔을 이용한 구리 기판위에 성장한 MgO 박막의 스퍼터링 수율

현정우 · 오현주 · 추동철 · 최은하 · 김태환 · 조광섭 · 강승언†

광운대학교 전자물리학과, 서울 139-701
(논문접수일 : 2001년 9월 5일)

Sputtering yield of the MgO thin film grown on the Cu substrate by using the focused ion beam

J. W. Hyun, H. J. Oh, D. C. Choo, E. H. Choi, T. W. Kim, G. S. Cho, and S. O. Kang†

Department of Electrophysics, Kwangwoon University, Seoul 139-701
(Received September 5, 2001)

요 약

전자빔 증착기를 이용하여 1000 Å의 두께를 가진 MgO 박막을 구리 기판위에 상온에서 증착하였다. 스퍼터링 수율 측정시 MgO 층에 충전현상을 없애주기 위해서 1000 Å 두께의 Al을 증착하였다. 갈륨 액체금속을 집속이온빔 이온원으로 사용하였다. 두 개의 정전렌즈를 사용하여 이온빔을 집속하였고, MgO에 이온빔을 주사하기 위해 편향기를 사용하였다. 가속전압의 변화에 따라 시료대 전류와 이차입자 전류를 측정하였고, 이 전류값은 소스에 인가하는 가속전압에 따라 변화되었다. MgO 박막의 스퍼터링 수율은 분석된 시료대 전류, 이차입자 전류 및 순수빔 전류의 값을 사용하여 결정하였다. 집속이온빔 장치의 가속전압이 15 kV일 때 MgO 박막의 스퍼터링 수율은 0.30으로 나왔고 가속전압의 값이 증가할 때 스퍼터링 수율이 선형적으로 증가하였다. 이러한 결과를 볼 때 집속이온빔 장치를 이용하면 MgO 박막의 스퍼터링 수율을 측정할 때 매우 효과적임을 알 수 있다.

Abstract

MgO thin films with 1000 Å thickness were deposited on Cu substrates by using an electron gun evaporator at room temperature. A 1000 Å thick Al layer was deposited on the MgO for removing the charging effect of the MgO thin film during the measurements of the sputtering yields. A Ga ion liquid metal was used as the focused ion beam(FIB) source. The ion beam was focused by using double einzel lenses, and a deflector was employed to scan the ion beams into the MgO layer. Both currents of the secondary particle and the probe ion beam were measured, and they dramatically changed with varying the applied acceleration voltage of the source. The sputtering yield of the MgO layer was determined using the values of the analyzed probe current, the secondary particle current, and the net current. When the acceleration voltage of the FIB system was 15 kV, the sputtering yield of the MgO thin film was 0.30. The sputtering yield of the MgO thin film linearly increases with the acceleration voltage. These results indicate that the FIB system is promising for the measurements of the sputtering yield of the MgO thin film.

† E-mail : sokang@daisy.kwangwoon.ac.kr

1. 서 론

80년대 중반부터 집속이온빔(Focused Ion Beam ; FIB) 장치가 개발되어 현재 여러 가지 기초 및 응용분야에 사용되고 있다 [1-5]. FIB 장치에 사용되는 액체금속 이온원은 특성상 높은 밝기 [6], 이온빔의 진행방향의 낮은 에너지 퍼짐 및 작은 에너지 손실을 갖는다는 장점이 있다 [7]. 이때 사용되는 이온원으로는 Ga, In, Au 및 Ni 등의 액체금속 이온원과 AuSi, CoGe 및 CoNd 등의 여러 가지 액체합금들이 주로 사용되고 있다. FIB 장치의 응용에는 마스크 없는 이온주입 [8,9], 리소그래피 [10,11], 미세가공 [12], 가스를 이용한 증착 그리고 집적회로의 수정과 표면분석 등이다. FIB 장치는 사용목적에 따라 이온 에너지가 30 kV 이상인 장치와 30 kV 이하인 장치로 구분된다. 일반적으로 이온주입이나, 리소그래피 등에는 고 에너지의 FIB 장치가 필요한 반면, 고해상도를 요구할 때는 저 에너지의 FIB 장비로도 가능하다. 저 에너지의 FIB 장비가 주로 사용되는 분야가 스퍼터링이다. FIB 장치에서 집속된 이온빔을 주사하여 발생한 스퍼터링된 이차 입자들의 효과를 이용하여 여러 가지 분석적인 연구가 이루어 졌다. 이와 같은 이차 입자들은 에너지가 충분한 이온이 시료 표면에 입사될 때 중성 원자의 스퍼터링, 시료 재질의 양 또는 음의 이온 방출, 이차 전자의 방출, 시료 이온이나 원자와의 충돌에 의한 입사 이온의 표면 반사, 시료 물질 내에서의 일반적인 복사, 그리고 화학적 반응, 표면 층에서의 성장 등의 다양한 형태로 방출된다. 스퍼터링을 이용하여 초미세 기어나 부품을 직접 가공하는 마이크로 단위의 미세가공 [8], 집적회로의 수정, 시료의 분석, 미세가공에 의한 투과전자현미경의 박막 시료 제작 등을 할 수 있다.

본 연구에서는 비교적 간단하게 FIB 방법으로 특별한 예칭 가스의 주입 없이 스퍼터링 수율 값을 쉽게 구하였다.

2. 실험방법

2.1 집속이온빔 장치의 구성

FIB 장치는 크게 원료통과 시료통으로 크게 나눌

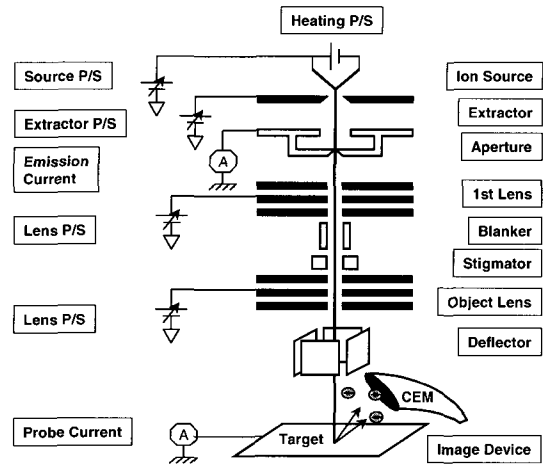


그림 1. 집속이온빔 장치의 개략도.

수 있다. 원료통은 이온원과 두 개의 정전렌즈, 차단기, 비점수차 조정기 및 편향기 등으로 구성되어 있다. 액체금속 이온원에서 발생한 Ga 이온빔을 첫 번째 정전렌즈에서 집속 시키고 비점수차 조정기에서 빔의 단면을 원형화 시켜 다시 두 번째 렌즈에서 빔을 집속 시킨 후 편향기를 이용해 주사시킨다. 시료에 주사된 빔은 시료와 반응을 하며, 이때 발생한 이차입자를 전자증배기로 증폭시켜 이 신호를 이용한다. 그림 1은 본 실험실의 스퍼터링 수율을 구하기 위한 FIB 장치의 개략도이다. 이온원 바로 아래에는 패러데이컵을 위치시켜 이온빔의 총 방출 전류를 측정하도록 하였고 그 아래에는 3극의 가속형 정전렌즈로 빔을 평행하게 만들어 주며, 다시 같은 형태의 두 번째 렌즈에서 빔을 집속시킨다. 첫 번째 렌즈와 두 번째 렌즈 사이에 위치한 8극의 비점수차 조정기는 마주보는 두 극을 한 쌍으로 하여 모두 네 쌍으로 구성되며 각 쌍의 극에 같은 전위를 가해주면 그 사이를 지나가는 빔의 단면이 변화하게 된다. 또한 서로 수직인 두 쌍에 적절한 전위를 다시 가해주어 빔을 중앙으로 위치시키는 역할도 하게 된다. 그 아래 위치한 차단기는 두 극 사이에 전위차를 주면 한 쪽 극으로 빔이 편향됨을 이용하여 빔을 순간적으로 차단시킬 때 사용된다. 두 번째 렌즈 바로 아래에는 시료의 원하는 위치에 빔을 주사시키기 위한 4극의 편향기가 있다. 마주보는 두 극을 한 쌍으로 두 쌍의 극에 각각의 주사 신호를 보내면 해당하는 전압의 크기에 따라 빔의 편향정

도가 달라지게 된다. 컴퓨터로 이 주사신호를 제어하면 시료의 원하는 부분에 빔을 주사시킬 수 있다. 또한 이온빔 전류의 안정성을 위해서 원료통은 10^{-7} torr 이하의 진공이 늘 유지되어야 한다. 이를 위해서 시료통에는 이온펌프를 장착하였고, 차단 장치를 이용하여 시료통과 차등을 두어 진공이 유지되게 하였다.

시료통에는 X와 Y방향으로 시료를 움직일 수 있게 설계된 시료대와 이차입자를 검출하여 증폭시키는 전자증배기가 있다. 시료대는 $3 \mu\text{m}$ 분해능으로 X방향과 Y방향으로 제어할 수 있으며 수동으로 Z 방향으로의 움직임이 가능하다. 전자증배기는 나팔관 모양으로 전자나 이온이 내벽을 때리면 많은 전자가 표면으로부터 생성되어 안쪽으로 가속되며 이 전자들이 다시 벽을 때리게 되는 방법으로 시료로부터 나온 이차전자나 이온을 약 10^7 배 정도 증폭시킨다. 한편 진공시스템은 로터리 오일펌프, 터보분자펌프 그리고 이온펌프의 3가지 진공용 펌프를 사용하였다.

2.2 스퍼터링 수율을 구하는 방법

스퍼터링 수율 측정 방법에는 여러 가지가 있는데 본 실험에서 사용한 방법은 두께감소를 측정하여 스퍼터된 원자의 수를 계산하고 순수한 빔 전류를 얻어 이에 해당하는 이온의 수를 계산하여 이들의 비를 구하는 방법을 이용하였다. 시료대에서 측정된 전류는 입사된 이온의 전류와 이로 인해 발생하는 이차 입자에 의한 전류가 합쳐져 측정되기 때문에 입사하는 이온의 수를 계산할 수가 없다. 따라서 시료 위에 제작한 컬렉터를 통해 시료로부터 방출되는 이차 입자 전류를 측정하여 시료대에서 측정된 전류와 계산을 해서 순수 빔 전류를 구할 수 있다. 그림 2에서와 같이 시료대에서 측정된 전류 값을 I_p 로 나타내었고 이차 입자 측정된 전류 값을 I_s 로 나타내었다.

따라서 순수 빔 전류는 $(I_p - I_s)$ 로 계산할 수 있다. 이를 이용하여 가속전압에 따른 순수빔 전류를 측정하였다. 실험적으로 스퍼터링 수율을 구하기 위해 필요한 입사이온의 수를 이 결과로 계산할 수 있다.

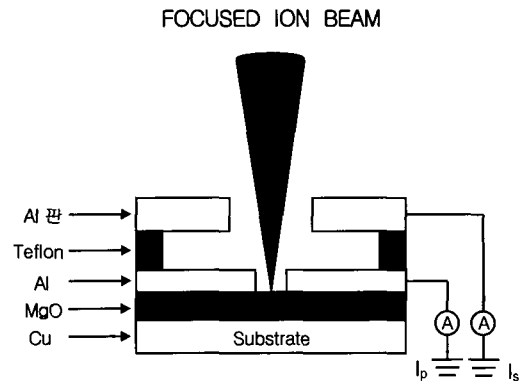


그림 2. 빔 전류 측정 개략도.

시료의 표면으로부터 이온들의 충격에 의해 충분한 에너지의 원자들이 방출되어 나오는 현상을 스퍼터링이라 하고 이때 입사된 이온의 수에 대한 시료에서 방출되는 원자수의 비를 스퍼터링 수율이라 한다. 스퍼터링 수율의 측정방법은 시료의 질량 감소, 시료의 두께 감소 및 스퍼터링된 이차 입자들의 수집과 검색 등이 있다. 이 실험에서는 두께 감소를 측정하여 이에 해당하는 부피 안에 있는 시료원자의 수를 계산하고 그 시간 동안에 입사한 이온의 수를 계산하여 비를 구했다.

먼저 디지털화상의 배율을 일정하게 고정시키고 제작된 패턴 편집기로 $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ 의 패턴을 그린 후 패턴닝을 실시하며, 이와 동시에 시료에서의 전류신호를 측정하여 그래프를 그린다. 빔이 Al을 주사하면서 시료를 스퍼터링 시키고, 1000 Å 두께의 Al이 모두 스퍼터링 되면 빔은 MgO 박막을 스퍼터링 하게 된다. 1000 Å의 MgO 박막이 모두 스퍼터링 되면 구리 기판을 주사하게 된다. Al을 모두 스퍼터링 시키고 MgO 박막을 스퍼터링 하기 시작하는 때와 MgO 박막에서 구리로 스퍼터링 될 때 이 시점을 종점이라 하며, 이것은 측정되는 전류의 변화로 알 수 있다.

또한 부도체에 이온빔을 주사할 때는 표면에서 충전 효과가 나타나 이를 막기 위해 표면에 얇게 금속을 입혀 실험을 한다. 여기서 부도체인 MgO 박막의 스퍼터링 수율을 측정하기 위해 MgO를 Cu 기판 위에 전자빔 증착기로 1000 Å을 증착하였고, MgO 박막 위에 Ga 이온빔의 충전 현상을 방지하기 위해 Al을 1000 Å 두께로 증착하였다. 집속이온빔

장치로 가속전압을 12 kV 에서 15 kV 까지 변화시키면서 스퍼터링 수율을 구하였다. 스퍼터링 수율을 구하기 위해 시료대 전류, 이차 입자 전류와 순수빔 전류를 가속전압의 변화에 따라 측정하였다.

3. 실험결과

3.1 시료대 전류와 이차 입자 전류 및 순수빔 전류 측정 결과

스퍼터링 수율을 구하기 위해서는 시료대 전류와 이차 입자 전류를 측정해야 한다. 우선 시료대 전류를 측정하였다. 실험실에서 직접 제작한 패터닝 프로그램을 이용하여 스퍼터링을 해주면서 그때의 시료대 전류를 측정하였다. 그림 3은 가속전압 15 kV 의 Ga 이온으로 스퍼터링 시킬 때 시료대에서 측정

된 전류의 변화이다. Ga 이온빔의 충전현상을 방지하기 위해 증착한 Al이 스퍼터 되면서 전류가 감소하다가 MgO 박막이 스퍼터되면 전류가 상승한다. 일정한 시간이 지나 MgO 박막이 다 없어지고 Cu 기판이 스퍼터되면서 다시 감소하게 된다. 시료대 전류 값을 측정한 그래프가 그림 3, 4, 5 및 6에서 보여주고 있다.

이차 입자 전류를 구하기 위하여 마찬가지로 패터닝 프로그램을 이용하여 패터닝을 하고 직접 제작한 컬렉터를 이용하여 측정한다. 컬렉터는 충전효과를 막기 위해 증착한 Al 위에 테플론 두께(1 mm)를 이용하여 절연을 시키고 테플론 위에 구멍을 뚫은 Al 판(1 mm)을 덮어주어 만들었고, Al 판에 전류계를 연결하여 이차 입자 전류를 측정하였다. 이차 입자 전류 값을 측정한 그래프가 그림 7, 8, 9 및 10에 나타나 있다.

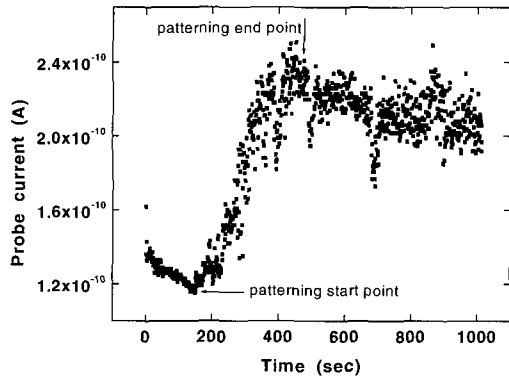


그림 3. 가속전압 15 kV 일때의 시료대 전류.

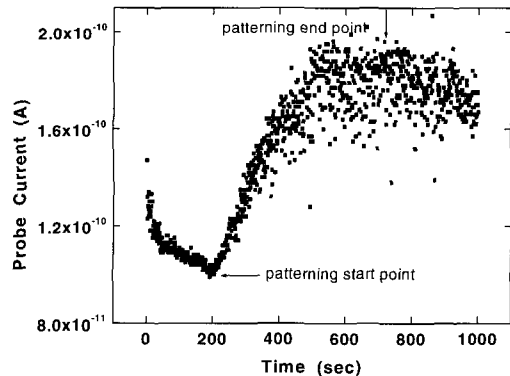


그림 5. 가속전압 13 kV 일때의 시료대 전류.

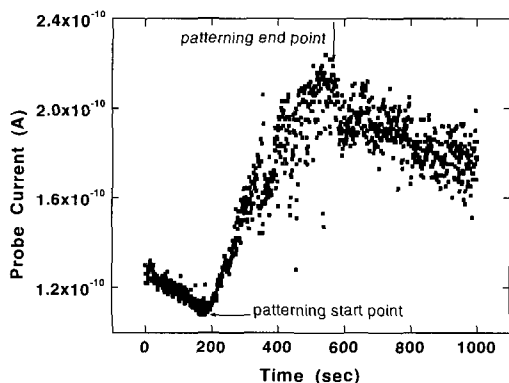


그림 4. 가속전압 14 kV 일때의 시료대 전류

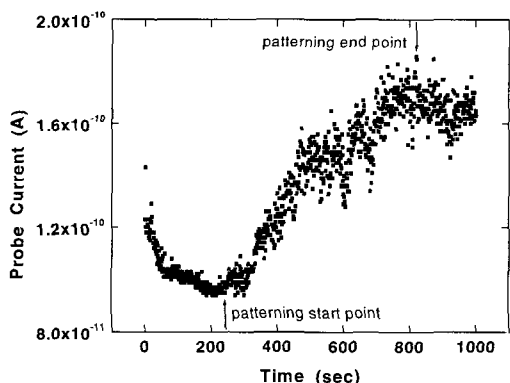


그림 6. 가속전압 12 kV 일때의 시료대 전류.

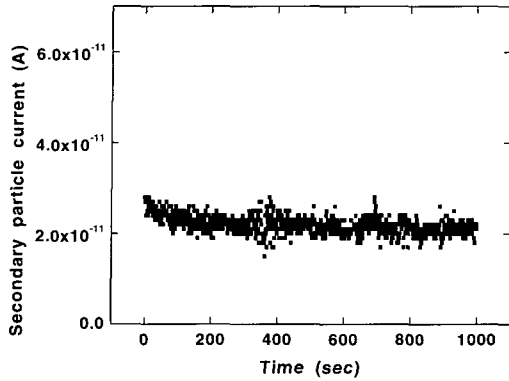


그림 7. 가속전압 15 kV 일때의 이차 입자 전류.

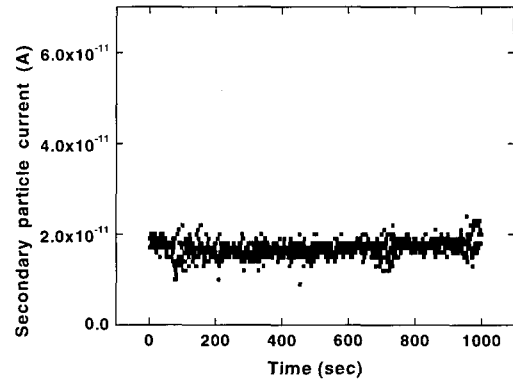


그림 9. 가속전압 13 kV 일때의 이차 입자 전류.

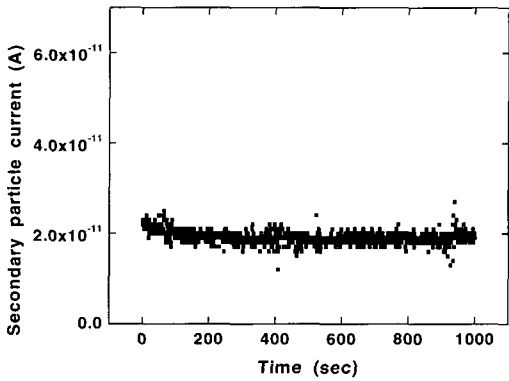


그림 8. 가속전압 14 kV 일때의 이차 입자 전류.

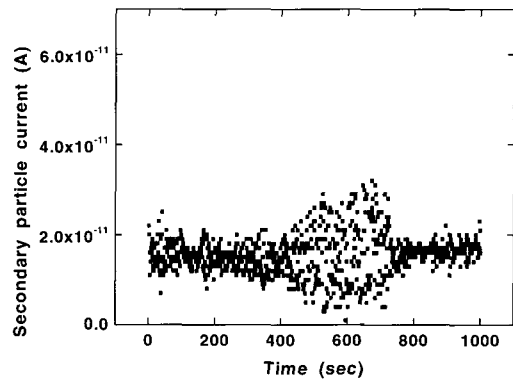


그림 10. 가속전압 12 kV 일때의 이차 입자 전류.

3.2 스퍼터링 수율 결과

구리 위에 MgO를 1000 Å을 증착하고 충전 현상을 방지하기 위해 Al을 1000 Å을 증착한 시료를 $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ 패턴을 하면서 시료대의 전류 변화를 측정하였다. 이 변화로 시료의 종점을 검출하여 Ga 이온에 대한 스퍼터링 수율을 계산하였다. 입사 이온의 가속전압에 따라 MgO 박막의 스퍼터링 수율을 측정하였다. 가속전압을 변화시켜 주면서 그에 따른 시료대 전류와 이차 입자 전류를 구해주었다. Ga 이온빔의 방출 전류는 항상 10 μA 를 유지하였고 전자증배기의 전압은 1500 V를 가해 주었다. 예를 들어 가속전압을 15 kV로 주었을 때 시료대 전류가 234 pA 이었고 MgO 박막이 스퍼터된 시간은 331초였다. 이차 전류를 측정한 평균값은 21.9 pA (그림 8)이므로 시료대 전류에서 이차 입자 전류를 뺀 순수빔 전류는 212.1 pA 이다. 표 1은 가속전압

표 1. 가속전압에 따른 시료대 전류, 이차 입자 전류 및 순수 빔 전류.

가속전압 (kV)	시료대 전류(pA)	이차 입자 전류(pA)	순수 빔 전류(pA)
15	234	21.9	212.1
14	206	19.2	186.8
13	188	16.8	171.2
12	174	15.4	158.6

12~15 kV에서 구한 순수빔 전류를 표시하였다. 앞에서 구한 순수빔 전류를 이용하여 입사된 Ga의 이온수를 구하고 MgO 박막의 부피에 대한 원자수를 구한 값을 가지고 스퍼터링 수율을 구하였다. 순수빔을 이용하여 Ga의 이온수를 구하는 방법은 다음과 같다. 가속전압이 15 kV일 때의 순수빔 전류를 이용하여 순수빔 전류와 전하량 비율이 Ga의 이온수가 되며 이 값은 1.32×10^{-12} 이 된다.

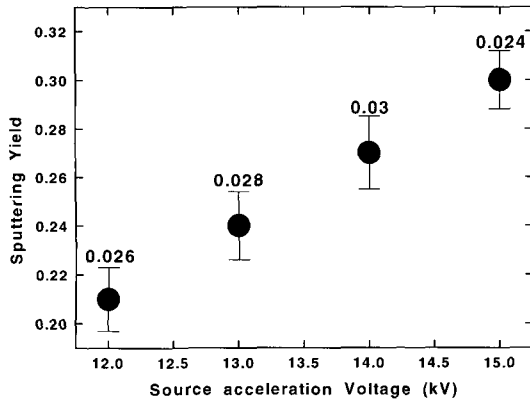


그림11. Ga 이온에 대한 MgO 보호막의 스퍼터링 수율.

MgO 박막이 스퍼터된 원자수는 MgO의 밀도와 부피를 이용하여 구할 수 있다. 우선 MgO의 밀도는 $3.58 \times 10^{-12} \text{ g}/\mu\text{m}^3$ 이다. 밀도를 이용하여 패터닝을 하고자하는 부분의 부피에 MgO의 밀도를 곱하면 MgO의 스퍼터된 부피($5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m} \times 1000 \text{ \AA}$)에 해당하는 질량은 $8.95 \times 10^{-12} \text{ g}$ 이 된다. 그리고 MgO의 원자량과 수소원자의 질량을 곱하면 MgO의 질량은 $6.73 \times 10^{-23} \text{ g}$ 이 된다. 이 두 개의 값을 이용해서 스퍼터된 부피에 해당하는 질량을 MgO의 질량으로 나누면 스퍼터된 MgO 원자의 개수는 1.33×10^{11} 개가 된다. 따라서 스퍼터된 MgO 원자의 개수를 MgO 박막이 완전히 스퍼터되는 시간(331초)동안 입사된 Ga 이온의 개수로 나누어 주면 스퍼터링 수율은 0.30이 된다. 이와 같은 방법으로 가속전압에 따른 MgO 박막의 스퍼터링 수율을 구했다. 그림 11은 위의 식을 이용하여 가속전압의 변화에 따른 스퍼터링 수율을 측정된 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 그래프에서도 알 수 있듯이 스퍼터링 수율 값이 가속전압이 커질수록 0.03씩 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있었다.

4. 결 론

MgO 박막의 스퍼터링 수율을 빔의 가속전압에 따라 측정하였다. 스퍼터링 수율을 측정하기 위해 FIB 장치를 사용하였다. 이온원으로는 Ga 액체 금속 이온원을 사용하였으며 충분한 시간을 주어 이온빔이 안정될 때까지 기다렸다가 실험을 하였다.

그리고 진공도는 $9.0 \times 10^{-7} \text{ Torr}$ 상태에서 실험을 하였다. 이온빔에 의해 발생하는 MgO 박막의 충전 현상을 없애주기 위하여 MgO 박막 위에 Al을 증착하였다. 이차 입자 전류 측정은 MgO 박막 위에 작은 구멍을 뚫은 Al 컬렉터를 장착하고 그 구멍을 통해 빔은 통과되고 통과된 빔이 MgO 박막을 스퍼터시켜 튀어나오는 이차 입자들을 컬렉터를 이용해 전류를 측정하였다. 측정된 값을 가지고 스퍼터링 수율을 측정하였다.

계산한 MgO 박막의 스퍼터링 수율은 12 kV, 13 kV, 14 kV 및 15 kV 일 때 0.21, 0.24, 0.27 및 0.30 이었다. 가속전압이 증가하면서 스퍼터링 수율도 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있었다. 가속전압이 12 kV, 13 kV, 14 kV 및 15kV 일 때 오차범위는 0.026, 0.028, 0.03 및 0.024 이다. 집속 이온빔 장치를 이용하여 간단하게 MgO의 스퍼터링 수율을 측정할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2000년도 광운대학교 교내학술연구비에 의하여 연구되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] J. Z. Wan, J. G. Simmons, and D. A. Thompson, *J. Appl. Phys.* **81**(2), 765 (1997).
- [2] G. Ben Assayag, C. Vieu, and J. Gierak, *J. Vac. Sci. Technol. B* **11**(6), 2420 (1993).
- [3] Yeong-Ah Soh, Gregory L. Snider, Michael J. skvarla, Harold G. Craighead, *J. Vac. Sci. Technol. B* **11**(6), 2629 (1993).
- [4] H. Kim, T. Noda, and H. Sakaki, *J. Vac. Sci. Technol. B* **16**(4), 2547 (1998).
- [5] G. Bacher, T. Kümmell, D. Eisert, A. Forchel, B. König, W. Ossau, C. R. Becker, and G. Landwehr, *J. Appl. Phys.* **75**, 956 (1999).
- [6] L. Seliger, J. W. Ward, V. Wang, and R. L. Kubena, *Appl. Phys. Lett.* **34**, 310 (1979).
- [7] H. S. Uhm, E. H. Choi, G. S. Cho, and S. O. Kang, *Phys. Plasmas* **1**, 4105 (1994).
- [8] M. Tamura, S. Shukuri, M. Moniwa, and M. Default,

- Appl. Phys. A **39**, 183 (1996).
- [9] H. J. Lezec, C. R. Musil, J. Melngailis, L. J. Mahoney, and J. D. Woodhouse, J. Vac. Sci. Technol. B **9**, 2709 (1991).
- [10] S. Matsui, Y. Kojima, Y. Ochiai, and Honda, J. Vac. Sci. Technol. B **9**, 622 (1991).
- [11] J. S. Huh, M. I. Shepard, and J. Melngailis, J. Vac. Sci. Technol. B **9**, 173 (1991).
- [12] T. Ishitani, T. Ohnishi, and Y. Kanwanami, Jpn. J. Appl. Phys. **29**, 2283 (1990).