

DC 마그네트론 스퍼터링 방법에 의해 증착된 Mo 박막의 특성

공선미 · 소우빈 · 김은호 · 정지원[†]

인하대학교 화학공학과
402-751 인천광역시 남구 용현동 253
(2010년 4월 8일 접수, 2011년 1월 3일 채택)

Characteristics of Mo Thin Films Deposited by DC Magnetron Sputtering

Seon Mi Kong, Yubin Xiao, Eun Ho Kim and Chee Won Chung[†]

Department of Chemical Engineering, Inha University, 253 Yonghyun-dong, Nam-gu, Incheon 402-751, Korea
(Received 8 April 2010; accepted 3 January 2011)

요 약

DC 마그네트론 스퍼터링 방법을 이용하여 soda lime glass 위에 Mo 박막을 증착하였다. DC power와 증착 압력을 변화시키면서 상온에서 Mo 박막을 증착하였고 증착된 박막의 전기적 성질 및 구조적 성질을 조사하였다. DC power가 증가할수록 박막의 증착속도는 증가되었고 전기 저항도는 감소하였으며 박막의 결정성이 향상되는 것을 관찰할 수 있었다. 증착 압력이 감소할수록 박막의 증착속도와 전기 저항도가 감소하였으며 가늘고 긴 모양의 결정입자가 조밀하게 박막을 형성하였다. 압력이 증가함에 따라서 결정입자는 원형으로 변형되었으며 박막의 표면에 공극의 생성이 증가하였다. Mo 박막의 전기 저항도는 Mo 원자에 결합된 산소의 양이 많아질수록 증가하게 되고, 박막의 결정성이 높아지면 산소의 결합도가 감소하여 낮은 저항도를 갖게 되는 것을 확인하였다.

Abstract – Mo thin films were deposited on soda lime glass at room temperature by using DC magnetron sputtering. The electrical and structural properties of the films were investigated by varying DC power and gas pressure as the deposition parameter. As DC power increased, the deposition rate of Mo films was increased and the electrical resistivity was decreased. It was observable that the crystallinity of the films was improved with increasing DC power. As gas pressure decreased, the deposition rate and resistivity of the films were decreased, and long rectangular grains were densely formed. With increasing gas pressure, the grains were transformed to a round shape and the voids on the film surface were increased. It was confirmed that the electrical resistivity of Mo films was increased as the amount of oxygen combined with Mo atoms increased. It was also disclosed that the films have low resistivity as the degree of coupling of oxygen with Mo was reduced due to the enhancement of the crystallinity of the films.

Key words: Molybdenum Thin Film, DC Magnetron Sputtering, Back Contact Electrode, CIGS Solar Cells

1. 서 론

최근에 에너지 자원의 고갈이 다가오는 상황에서 신에너지원으로서 태양에너지를 이용하는 태양전지 분야가 주목받고 있으며 이에 대한 시장이 급격하게 확대되고 있다. 그러나 현재의 태양전지는 매우 고가이기 때문에 태양전지의 제조비용을 줄이기 위한 노력이 계속되고 있다. 현재 상용화되고 있는 태양전지 가운데 90% 이상이 단결정 및 다결정 실리콘 웨이퍼를 이용하고 있는 실리콘 태양전지이다. 실리콘 태양전지는 에너지 전환효율은 높지만 기판으로 사용되는 실리콘 웨이퍼가 제조원가의 60%를 차지하기 때문에 매우 고가이다. 따라서 이를 극복하기 위하여 전환효율은 낮더라도 제조비용이 절감되는 박막형 태양전지의 연구가 활발히 이루어지고 있다.

박막형 태양전지 중에서 차세대 박막 태양전지로서 주목받고 있는 것은 Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) 박막 화합물 반도체 태양전지이다. CIGS는 Ga의 농도에 따라 1.02~1.68 eV의 다양한 에너지 밴드갭 (band gap)을 갖는 직접 천이형 반도체 물질이다. 또한 CIGS 물질은 반도체 중 가장 높은 $1 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ 의 광흡수계수를 가지고 있으며, 450~590 °C의 고온 공정에도 매우 안정하여 열 경화현상을 거의 보이지 않으므로 박막형 태양전지의 광흡수층 재료로서 적합하며 활발히 연구가 진행되고 있다[1-4]. 현재 CIGS 태양전지의 실험실 최대 효율은 20.3%로 다결정 실리콘 태양전지의 효율에 근접하는 값을 나타내고 있어 더욱 기대되고 있다[5].

한편, CIGS 태양전지의 전극으로 사용되는 물질은 우수한 전기적 성질을 가지는 것은 물론, 기판과의 열팽창계수 차이로 인한 박리현상이 일어나지 않도록 유리 기판에의 부착성이 뛰어나야 한다[1]. 또한 CIGS 흡수층을 제조하는 공정 중에 Cu와 In의 확산에 충분히 안

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: cwchung@inha.ac.kr

정해야 한다[5]. 이러한 배면전극의 후보 물질로는 Pt, Au, Au/Be, Al, Ni, Ag, Cu 등 여러 가지 금속이 연구되었지만, 현재 Mo 물질이 가장 우수한 특성을 보이면서 가장 널리 연구되고 있다[3-5]. Mo는 녹는점이 높아서 고온의 CIGS 공정에도 안정하고 매우 높은 전기전도도(conductivity) 즉, 낮은 저항도(resistivity)($5.4 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}$ 의 고유저항)를 가지면서 동시에 유리 기판과 비슷한 값의 열팽창계수를 가져서 부착성도 매우 뛰어나기 때문에 CIGS 박막 태양전지의 배면전극물질로서 가장 적합하다[3].

CIGS 박막 태양전지의 배면전극으로 사용될 Mo 박막을 증착하기 위한 방법으로 DC 마그네트론 스퍼터링(direct current magnetron sputtering) 공정이 가장 많이 사용되고 있다. 박막 제조 시에 증착공정의 여러 가지 변수들 중에서 DC power 및 증착 압력 등을 변화시킴으로써 양질의 Mo 박막을 형성시킬 수 있다[1]. 다양한 증착조건들에서 증착된 Mo 박막의 전기적 성질 및 기계적 성질들에 연구가 지속되어 왔지만 대부분 증착압력의 변화에 집중되어 있다[1-6]. 본 연구에서는 Mo 배면전극을 DC 마그네트론 스퍼터링법을 이용하여 Mo 박막을 증착하였고 Mo 박막의 특성 조사 및 특성의 향상을 위해 DC power와 증착 압력을 다양한 조건으로 변화시키면서 증착된 Mo 배면전극의 전기적 특성 및 구조적 특성을 조사하여 최적의 증착조건을 도출하고자 하였다.

2. 실험

Mo 박막은 Ar 가스를 이용한 DC 마그네트론 스퍼터링 방법으로 증착되었다. 타겟은 순도가 99.99%이고 지름 3 in×두께 1/4 in 크기의 Mo 타겟을 사용하였다. 기판으로는 15 mm×15 mm×2 mm 크기의 soda lime glass를 사용하였다. Mechanical pump와 turbo molecular pump를 사용하여 chamber의 초기 진공을 3×10^{-6} Torr 이하로 잡아 준 뒤 50 sccm의 Ar 가스를 주입하여 상온에서 증착을 진행하였다. 박막을 증착하기 전에 타겟 표면에 남아있는 오염물을 제거하기 위해 예비 스퍼터링을 10분 동안 진행하였다.

유리 기판은 아세톤, 에탄올 및 deionized water를 사용하여 초음파 세척을 하여 준비하였다. Mo 박막의 특성 향상을 위하여 DC power와 증착 압력을 공정 변수로 선택하여 적용하였다. DC power는 30, 60, 90, 120, 그리고 150 W로 변화시켰고, 증착 압력은 1.7, 3, 5, 및 8 mTorr로 변화하여 Mo 박막을 증착하였다. 이 때 기판과 타겟 사이의 거리는 7.5 cm, 증착 온도는 실온으로 고정하여 선택된 변수 외에 다른 영향을 방지하였고, 박막의 균일한 증착을 위해 기판을 10 rpm의 속도로 회전하여 최종적으로 5,000 Å 박막을 증착하였다.

증착된 Mo 박막의 두께는 Tencor P-1 profiler를 이용하여 측정하였고, Mo 박막의 전기적 특성을 관찰하기 위해 four-point probe를 이용하여 기판의 두 대각선 방향에서 sheet resistance를 측정하였다. Field-emission scanning electron microscopy(FESEM)와 atomic force microscopy(AFM)를 이용하여 증착된 Mo 박막의 미세 표면구조를 관찰하였고, 박막의 결정성을 관찰하기 위해 x-ray diffraction(XRD) 분석이 적용되었다.

3. 결과 및 고찰

DC power의 변화에 대한 Mo 박막의 증착 속도와 저항도의 변화를 Fig. 1의 (a)와 (b)에 각각 나타내었다. DC power가 증가할수록 박막

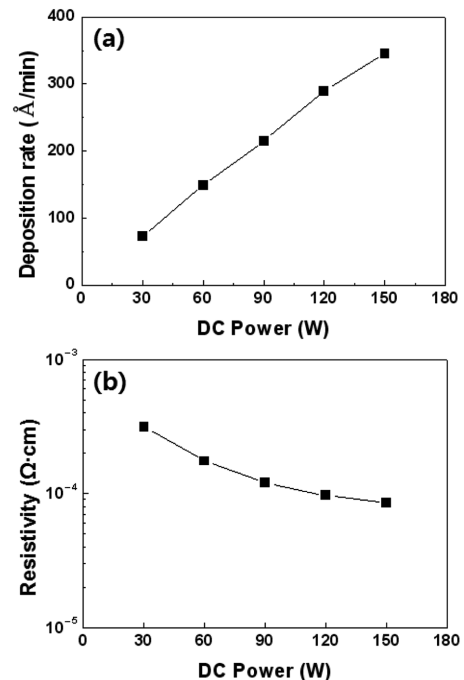


Fig. 1. (a) Deposition rate and (b) resistivity of Mo thin films deposited by varying DC power; deposition conditions: Ar gas of 50 sccm; gas pressure of 5 mTorr; distance between target and substrate of 7.5 cm.

의 증착 속도가 약 72 Å/min에서 346 Å/min까지 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 DC power가 증가하면 Ar 플라즈마 밀도의 단순한 증가에 의하여 Mo 타겟에 충돌하는 Ar 이온의 수가 증가하여 강한 스퍼터링 효과를 나타내기 때문이라고 예상된다. Fig. 1(b)에서 볼 수 있듯이 30 W의 작은 DC power에서는 $3.14 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}$ 의 비교적 높은 저항도를 나타내었고, DC power가 증가할수록 저항도가 감소하여 150 W에서는 $8.43 \times 10^{-5} \Omega\text{-cm}$ 의 낮은 저항도를 나타내었다. 이러한 결과는 박막의 증착 속도가 증가할수록 박막의 저항도는 감소한다는 이전의 실험 결과와 일치되는 것이다[7]. DC power가 증가할수록 Mo 입자들이 빠르게 스퍼터링되고 기판 위에도 빠른 속도로 쌓이게 되어 증착 속도가 빨라지게 된다. 이러한 빠른 증착에서는 박막의 저항도를 증가시키는 산소가 결합되기 전에 Mo 박막의 형성이 빠르게 이루어지므로, DC power가 증가할수록 저항도가 감소하는 것으로 해석할 수 있다.

Fig. 2는 DC power를 변화시키면서 증착된 Mo 박막의 표면 구조를 나타내는 AFM 사진이다. 30 W의 DC power 증착조건에서는 결정입자가 원형으로 규칙성 없이 증착되어 있으며 부분적으로 공극과 유사한 움푹 파인 표면 형상이 관찰되나 60 W와 150 W에서 증착된 Mo 박막들은 원추형의 결정들이 뾰족하게 박막을 형성하고 있는 것으로 관찰된다. 30 W의 증착조건에서는 이런 공극들의 틈사이로 chamber 내에 존재하던 산소입자가 용이하게 결합될 수 있다. 산소의 결합도는 박막의 저항에 영향을 미치고, 산소의 농도가 증가할수록 저항이 높아지는 결과가 이미 보고된 바 있다[6-8]. 따라서, 증착된 Mo 박막의 표면의 공극에 결합된 산소가 박막의 저항도 증가에 큰 영향을 미쳤다고 판단할 수 있다. 또한 Fig. 2에서 DC power가 증가할수록 원추형의 뾰족한 입자들이 뾰족하게 정렬되는 현상은 AFM 분석에서 얻어지는 표면의 거칠기를 나타내는 root mean

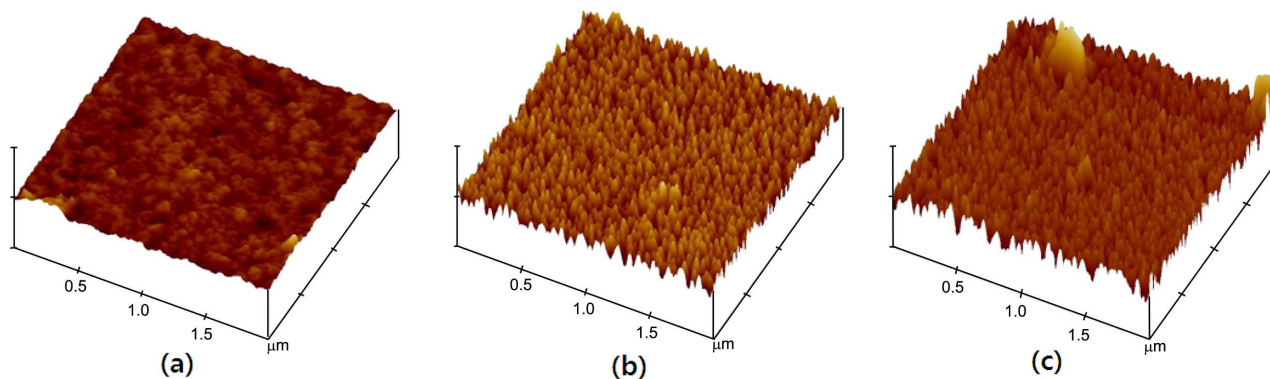


Fig. 2. AFM images of Mo thin films deposited at (a) 30 W, (b) 60 W, and (c) 150 W; deposition conditions: Ar gas of 50 sccm; gas pressure of 5 mTorr; distance between target and substrate of 7.5 cm.

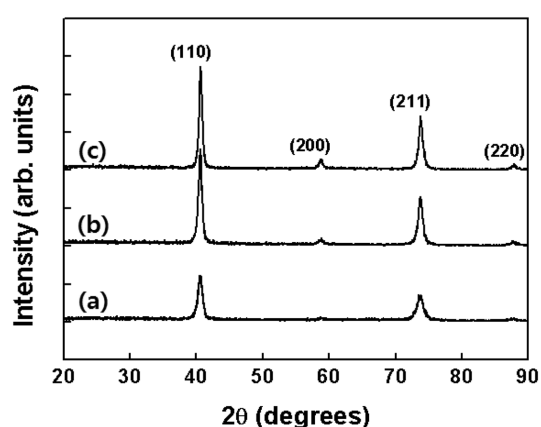


Fig. 3. X-ray diffraction patterns of Mo thin films deposited by varying DC power (a) 30 W, (b) 60 W, and (c) 150 W; deposition conditions: Ar gas of 50 sccm; pressure of 5 mTorr; distance between target and substrate of 7.5 cm.

square(RMS) 값이 증가하는 것으로도 이해할 수 있다. Mo 박막표면의 거칠기 정도를 나타내는 RMS 값은 30 W에서 2.074, 60 W에서 6.763, 그리고 150 W에서 9.893이 늘어났다.

Fig. 3에 DC power의 변화에 따른 Mo 박막의 결정성에 대한 정보를 얻기 위한 XRD의 분석 결과가 보여진다. 41° 의 2θ 값에서 가장 큰 (110) peak가 공통적으로 관찰되었고, 이것은 증착된 Mo 박막들이 cubic 결정구조를 형성하고 있음을 나타낸다. Mo 박막의 (110) peak는 CIGS 박막이 (112)면으로 성장하기에 용이한 결정구조이다[1]. 일반적으로 Mo 박막은 (110) peak 외에 (200), (211)의 2차상(second phase) peak를 갖는다[1]. 이 실험에서는 (200)과(211)의 2차상 peak들이 관찰되었고 30 W의 증착조건에서는 (200) peak가 관찰되지 않았다. 앞에서 제시된 Fig. 2의 AFM 결과들과 부합하여 DC power가 작을수록 peak가 감소하였는데 이것은 결정입자의 크기가 작고 결정성이 미미하다는 것을 의미한다. 큰 결정입자는 빛의 산란을 감소시키고 전도도(conductivity)를 증가시킨다[9]. 또한 결정성의 감소로 인하여 박막 표면에 산소가 결합할 수 있는 공간이 증가하여 저항도가 증가하는 결과를 나타내는 것으로 해석된다.

증착 압력의 변화에 따른 Mo 박막의 증착 속도와 저항도의 변화를 Fig. 4의 (a)와 (b)에 각각 나타내었다. 증착 속도는 증착 압력이 증가할수록 122 Å/min에서 186 Å/min까지 증가하였다. 압력이 증가함에 따라 chamber 내에 머무르는 Ar 가스의 양이 증가되어 결과적으로

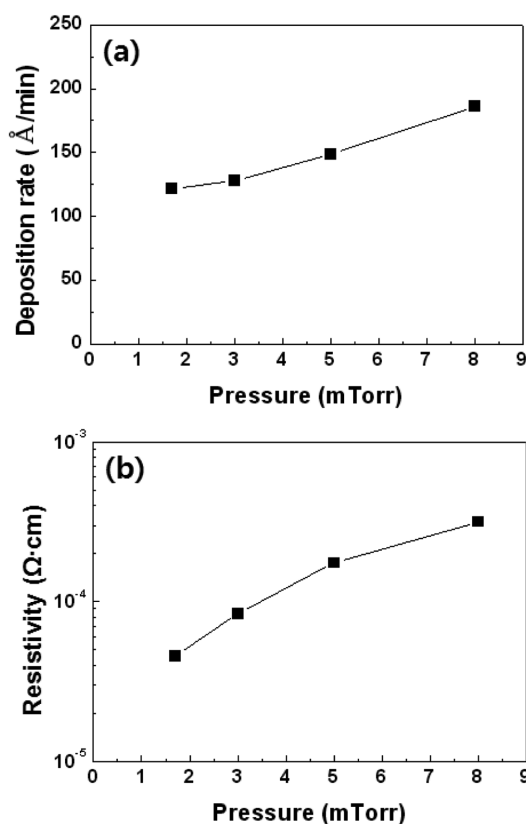


Fig. 4. (a) Deposition rate and (b) resistivity of Mo thin films deposited by varying gas pressure; deposition conditions: DC power of 60 W; Ar gas of 50 sccm; distance between target and substrate of 7.5 cm.

로 Ar 플라즈마의 밀도가 증가된다. 그 결과로서 Ar 이온의 스퍼터링 효과가 증대되어 박막의 증착 속도가 빨라진 것으로 해석된다. 저항도는 1.7 mTorr에서 가장 낮은 값인 $4.52 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ 을 나타내었고, 압력이 증가할수록 저항도가 증가하여 8 mTorr에서는 $3.16 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 의 값을 나타내었다. 앞의 DC power의 변화에서는 증착 속도가 증가할수록 저항도가 감소하는 결과가 나타났지만 chamber 압력의 변화에서는 증착속도가 증가함에 따라서 저항도도 동시에 증가하는 경향이 나타나고 있다. 전자의 경우 빠른 증착속도가 박막으로의 산소의 결합을 방해한 효과가 크게 나타났지만 후자의 경우에는 이후에 설명될 박막의 표면 구조의 영향이 저항도에 더 크게 작용했다

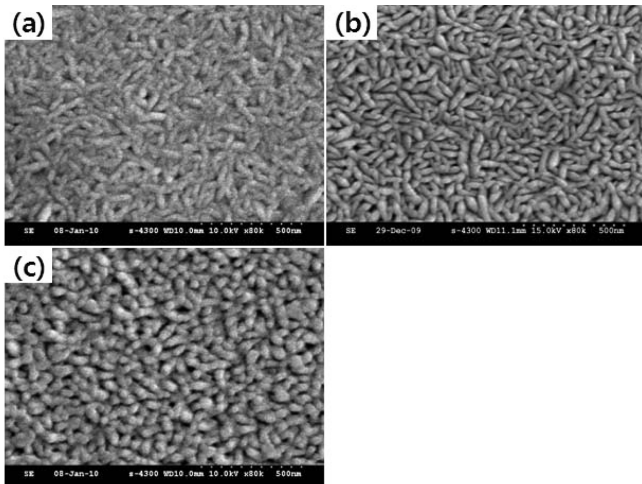


Fig. 5. SEM images of Mo thin films deposited at (a) 1.7 mTorr, (b) 5 mTorr, and (c) 8 mTorr; deposition conditions: DC power of 60 W; Ar gas of 50 sccm; distance between target and substrate of 7.5 cm.

고 예상된다. Fig. 5는 증착 압력의 변화에 따른 Mo 박막 표면의 미세 구조를 나타낸 FESEM 사진이다. 증착 압력이 낮은 경우에 가늘고 길쭉한 형태의 결정입자가 형성되었고, 압력이 높아질수록 결정입자의 모양이 원형으로 형성된 것이 관찰되었다. 또한 낮은 압력에서는 결정입자가 매우 조밀하게 밀집되어 있고, 높은 압력에서는 조밀도가 감소하여 결정입자 사이에 공극이 생성되어 다공성 박막 구조를 형성하였다. 이러한 공극률의 증가는 박막 저항도의 증가에 직접적으로 영향을 미친다[2]. 결정입자 사이에 공극이 생성되면 산소가 결합하기 쉬워지기 때문에 박막의 저항도가 증가한 것으로 사료된다.

보다 자세한 표면의 형상을 알아보기 위하여 증착된 Mo 박막에 대해 AFM 분석이 진행되었고 그 결과가 Fig. 6에 나타내었다. 이전의 FESEM에서 관찰했던 것과 부합하여 낮은 압력에서 증착된 Mo 박막은 원추형으로 형성된 결정이 조밀하게 밀집되었고, 높은 압력에서는 원형의 입자가 형성된 것을 관찰할 수 있다. 또한 AFM 결과에서도 박막의 RMS 값이 1.7 mTorr에서 6.825, 5 mTorr에서 6.763, 8 mTorr에서 3.724로 증착 압력이 증가할수록 감소하였으며 이는 압력이 증가할수록 표면에 더 많은 공극이 생성되었다는 것을 의미한다. 박막에 대한 XRD 분석을 통해 박막의 결정도를 정확하게 살펴

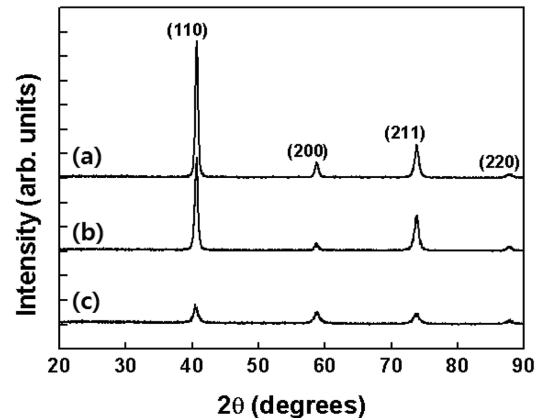


Fig. 7. X-ray diffraction patterns of Mo thin films deposited by varying gas pressure (a) 1.7 mTorr, (b) 5 mTorr, and (c) 8 mTorr; deposition conditions: DC power of 60 W; Ar gas of 50 sccm; distance between target and substrate of 7.5 cm.

볼 수 있다.

증착 압력 변화에 따른 Mo 박막의 XRD 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 3의 결과와 마찬가지로 (110) 방향의 핵심 peak와 (200)과 (211)의 2차상 peak가 관찰되었다. SEM 사진에서 규칙적인 모양의 입자가 조밀하게 관찰되었던 낮은 압력에서 (110)의 핵심 peak가 매우 크게 관찰되어 높은 결정성을 가진다는 것을 확인할 수 있다. 높은 압력에서 증착된 Mo 박막은 핵심 peak인 (110)도 매우 약한 peak를 나타내어 (200)과 (211)의 2차상과 비슷한 세기로 관찰되었다. FESEM 사진에서 관찰된 대로 압력이 높아질수록 결정성이 많이 결여되는 것으로 관찰이 되었다. FESEM 및 AFM 관찰의 결과와 동일하게 XRD 분석에서도 압력이 높을수록 결정성이 줄어드는 것을 관찰할 수 있었고, 높은 압력에서 공극의 생성으로 인해 산소 결합도가 높아지며 또한 높은 압력에서의 높은 산소의 분압도 박막의 저항도의 증가에 기여했다고 판단된다.

DC power 및 증착 압력의 두 가지 변수를 선택하여 Mo 박막의 증착 실험을 수행한 결과, 증착 조건이 변화함에 따라 증착속도 및 증착된 박막의 표면 구조가 다르게 형성되고, 표면 구조의 변화에 따라 산소와의 결합도가 변화하게 되어 이것이 박막의 전기적 성질에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 박막이 규칙적으로 성장되고 결정성이 크게 증착되면 저항도가 낮아져 전기적 성질이 좋아

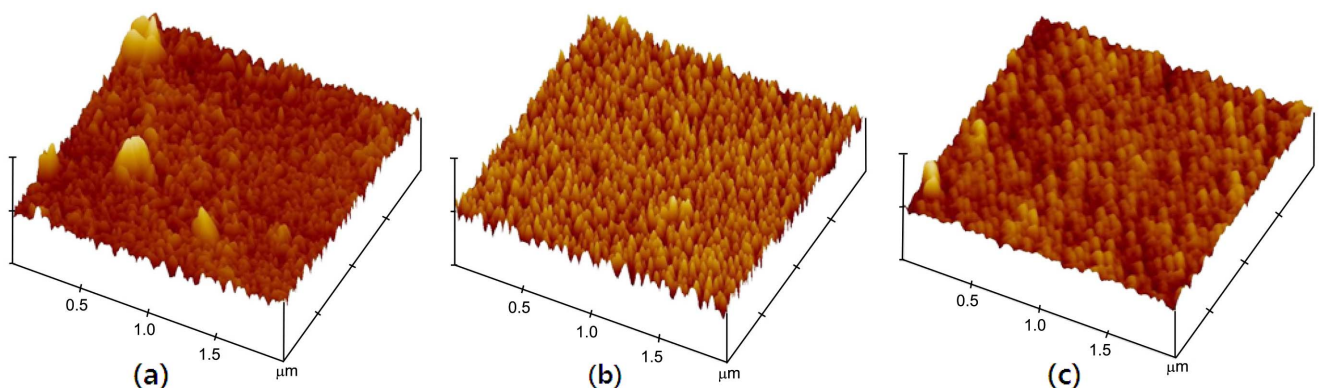


Fig. 6. AFM images of Mo thin films deposited at (a) 1.7 mTorr, (b) 5 mTorr, and (c) 8 mTorr; deposition conditions: DC power of 60 W; Ar gas of 50 sccm; distance between target and substrate of 7.5 cm.

지고, 반면에 결정성이 떨어지고 공극이 생성되면 산소와의 결합도가 높아져 저항도가 증가하는 것을 관찰할 수 있었다. 결과적으로 높은 DC power와 낮은 압력에서 증착된 박막이 우수한 결정성 및 전기적 성질을 나타내는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

DC 마그네트론 스퍼터링 방법을 이용하여 Mo 박막의 전기적 및 구조적 특성을 조사하였다. DC power와 증착 압력을 변화시켜서 박막을 증착하였고 증착된 박막은 증착속도, 전기 저항도, FESEM, AFM 및 XRD 등의 분석을 통하여 박막의 특성이 조사되었다. 증착 조건들이 변화함에 따라 박막의 증착속도와 박막의 표면 구조가 변화하였고 이로 인하여 산소와의 결합도가 변화하여 박막의 전기적 성질이 변화되는 것으로 해석되었다. 증착된 Mo 박막들은 XRD 분석을 통하여 (110)의 핵심 peak를 나타내어 CIGS의 (112)면이 성장하기에 용이하게 증착되었다. DC power가 증가할수록 증착 속도는 증가하였고, 박막의 결정성이 현저하게 향상되었다. 높은 DC power에서의 빠른 스퍼터링 효과와 낮은 증착 압력에서의 표면 구조가 박막의 저항도 변화를 야기하였다. 증착 압력이 낮아질수록 증착 속도는 감소하지만, 결정도가 높고 조밀하게 증착되어 저항도가 감소하였고 높은 압력에서는 다공성의 박막이 형성되어 산소와의 결합도가 높아져 높은 저항도를 나타내었다. 결과적으로 높은 DC power와 낮은 압력에서 증착된 Mo 박막이 낮은 저항도를 나타내어 CIGS 박막 태양전지의 배면전극으로서 보다 향상된 특성을 가지는 것을 알 수 있다.

감 사

이 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(2009-0068182).

참고문헌

- Kim, S. G., Lee, J. C., Yun, K. H., Kang, K. H., Park, L. J., Song, J. W. and Han, S. O., "Morphology and Electrical Properties of Mo Thin Films by DC sputtering," Spring Conference on Korea Solar Energy Society, 181-186(2001).
- Scofield, J. H., Duda, A., Albin, D., Ballard, B. L. and Predecki, P. K., "Sputtered Molybdenum Bilayer Back Contact for Copper Indium Diselenide-based Polycrystalline Thin-film Solar Cells," *Thin Solid Films*, **260**, 26-31(1995).
- Al-thani, H. A., Hasoon, F. S., Young, M., Asher, S., Alleman, J. L., Al-jassim, M. M. and Williamson, D. L., "The Effect of Mo Back Contact on Na Out-Diffusion and Device Performance of Mo/Cu(In,Ga)Se₂/CdS/ZnO Solar Cells," Proc. of the 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 720-723(2002).
- Al-thani, H. A., Hasoon, F. S., Alleman, J. L., Al-jassim, M. M. and Williamson, D. L., "The Deposition and Characterization of Mo/CuInGaSe₂/CdS/ZnO Solar Cells," The Sharjah Solar Energy Conference, 720-723(2001).
- Bollero, A., Andres, M., Garcia, C., Abajo, J. and Gutierrez, M. T., "Morphological, Electrical and Optical Properties of Sputtered Mo Thin Films on Flexible Substrates," *Phys. Status Solidi A*, **206**(3), 540-546(2009).
- Scofield, J. H., Asher, S., Albin, D., Tuttle, J., Contreras, M., Niles, D., Reedy, R., Tennant, A. and Noufi, R., "Sodium Diffusion, Selenization, and Microstructural Effects Associated with Various Molybdenum Back Contact Layers for CIS-based Solar Cells," Proc. of the 24th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 164-167(1995).
- Suzuki, M. and Asai, K., "Characteristics of Sputter-Deposited Mo Films," *J. Electrochem. Soc.*, **131**(1), 185-189(1984).
- Heinß, J. P., Handel, F., Meyer, T. and Wurz, R., "High Productive Deposited Mo Layers for Back Ohmic Contacts of Solar Cells," *Plasma Process. Polym.*, **6**, S29-S35(2009).
- Zhang, L., He, Q., Jiang, W. L., Liu, F. F., Li, C. J. and Sun, Y., "Mo Back Contact for Flexible Polyimide Substrate Cu(In, Ga)Se₂ Thin-Film Solar Cells," *Chin. Phys. Lett.*, **25**(9), 3452-3454(2008).
- Alleman, J. L., Althani, H., Noufi, R., Moutinho, H., Al-jassim, M. M. and Hasoon, F., "Dependence of the Characteristics of Mo Films on Sputter Conditions," NCPV Program Review Meeting 2000, 239-240(2000).
- Chuang, J. C., Tu, S. L. and Chen, M. C., "Sputter-deposited Mo and Reactively Sputter-deposited Mo-N Films as Barrier Layers Against Cu Diffusion," *Thin Solid Films*, **346**, 299-306(2009).
- Vink, T. J., Somers, M. A. J., Daams, J. L. C. and Dirks, A. G., "Stress, Strain, and Microstructure of Sputter-deposited Mo Thin Films," *J. Appl. Phys.*, **70**(8), 4301-4308(1991).