≪연구논문≫ 한국진공학회지 제22권 1호, 2013년 1월, pp.26~30
http://dx.doi.org/10.5757/JKVS.2013.22.1.26

산소 이온 빔에 의한 산화 알루미늄 박막의 식각 효과 및 정전 용량 특성에 관한 연구

조의식* · 권상직

가천대학교 전자공학과, 성남 461-701

(2012년 11월 12일 받음, 2012년 12월 20일 수정, 2013년 1월 2일 확정)

고유전율 절연체의 한 종류인 산화알루미늄 박막을 전자빔 증착법으로 형성하는 과정에서 산소 이온 빔의 조사를 이용, 산소 이온 빔 보조 증착 효과를 기대하였다. 산소 이온 보조 증착법으로 형성된 산화 알루미늄 박막의 두께 측정 결과, 높은 에너지에서의 이온 빔에 의한 식각 효과를 확인할 수 있었으며, 산소 이온 보조 증착 결과보다 높은 커패시턴스 값도 관찰할 수 있었다.

주제어 : 알루미늄 산화막, 산소 이온 빔 보조 증착, 식각 효과, 정전 용량

I. 서 론

디스플레이의 구동 소자로 많이 사용되는 박막 트랜지스터의 구동 전압을 낮추기 위해서는 커패시턴스 값을 최대로 유지시키는 것이 매우 중요하며, 이를 위해서는 높은 유전상수를 가지면서 얇은 두께를 유지하는 게이트 절연막의 특성이 요구된다 [1]. 현재 국내외 여러 그룹에서 HfO_2, TiO_2, Al_2O_3 등의 화합물들이 게이트 절연막으로 많이 사용되고 있다.

고유전체 절연막으로 인한 문제점은 대부분 박막 증착 후 고온에서의 열처리 공정으로 상당 부분 해결이 가능하다. 그러나, 열처리 온도에 따라서는 차세대 flexible 기판 등에 적용이 불가능할 수 있으므로 가능한 낮은 공정 온도를 유지하면서도 높은 커패시턴스 값을 가질 수 있는 고유전체 절연막의 개발이 필요하다.

위 언급한 게이트 절연막 중 가장 가격 대비 경쟁력이 있는 Al_2O_3의 경우, 저온에서의 증착으로 인한 박막 자체 결함으로 인하여 완전한 결정 상태를 유지하는 것이 어렵게 되고, AlO_x 형태로 존재하게 된다 [2,3]. 결국, 안정적인 소자 동작을 위해서는 저온 공정을 유지하면서도 높은 커패시턴스 값을 가질 수 있는 공정을 개발하는 것이 매우 중요하다.

본 실험에서는 Al_2O_3 증착 중 산소 이온빔 보조 증착법(ion beam assisted deposition, IBAD)을 이용, Al_2O_3의 고유전율이 그대로 유지되면서 높은 커패시턴스 값을 얻을 수 있는지의 가능성을 확인하고, 산소 이온빔에 의한 부차적인 영향에 대하여 분석하였다. 이온빔 공정이 박막 증착과 함께 진행됨으로써 추가 공정에 의한 시간 및 비용 부담을 최소화할 수 있으며, 결과에 따라 저전압 구동을 위한 고유전율 절연막 공정의 새로운 방법을 제시할 수 있을 것이라 기대된다 [4,5].

II. 실험방법

전자빔 증착기(e-beam evaporator) 내 crucible에 Al_2O_3 source를 넣고 chamber 내 진공도를 10^{-6} Torr까지 떨어뜨리면서 e-beam 에너지를 5.5~5.6 keV로 형성, 이후 emission current를 증가시켜 Al_2O_3 source 박막을 증착하였다. 박막 증착율을 0.3 Å/sec로 유지하면서 Fig. 1과 같이 Al_2O_3 증착과 동시에 O^+ 이온을 발생시켜서 산소 IBAD 효과가 발생하도록 하였다. 다만 산소 gas 만으로는 IBAD 공정을 위한 초기 플라즈마의 발생이 불가능하므로 MFC (mass flow controller)상에서 Ar 50 sccm, O 10 sccm의 분위기를 형성한 후 RF power의 forward power를 약 100 W까지 증가시키면서 RF 파워 플라즈마를 발생시키고, 이후 차츰 Ar 가스를 감소, 궁극적으로는 O^+ 이온

* [전자우편] es.cho@gachon.ac.kr

만으로 플라즈마 상태를 유지하도록 하였다. 이후 forward power를 200 W까지 증가시키고 별도로 이온빔의 DC power를 100 eV, 300 eV, 500 eV로 가해주었다. 단, 극성이 있는 이온 발생 자체가 전자빔 증착기 내 어느 정도 무리를 주게 되므로 이온빔이 가해진 상태에서 안정적인 공정 조건을 잡는 것이 쉽지 않았다. RF 이온 source 내 필터를 설치할 경우는, O^+ 이온과 동시에 O^- 이온을 발생시켜서 중성 산소 원자를 발생, 산소 중성빔 보조 증착 효과도 확인할 수 있다 [6].

박막 형성 후, 원자현미경(atomic force microscopy, AFM, XE-150, Park Systems)을 이용하여 형성된 Al_2O_3 박막 표면을 관찰하였고, 표면 단차 측정기(a-step)로 두께를 측정하였다. 이후 IBAD 공정이 적용된 Al_2O_3의 커패시턴스를 측정하기 위하여 Al 금속을 전극으로 사용하는 metal-insulator-metal (MIM) 방식의 커패시터를 제작, 커패시턴스 값을 측정하여 비교하였다. 열증발 증착기(thermal evaporator)를 이용, 슬라이드 글라스 위에 알루미늄을 1,000 Å 두께만큼 shadow 마스크를 통하여 증착, 바닥 전극 패턴을 형성하였다. 이후 IBAD를 적용한 Al_2O_3 박막을 증착한 후에 상부 전극 형성을 위하여 다시 동일한 두께의 알루미늄을 shadow 마스크를 통하여 열증발법으로 증착, 커패시터를 형성하였다. 하부 전극 및 상부 전극이 서로 엇갈리면서 형성되는 커패시터의 면적은 600 μm ×100 μm으로 확인되었다.

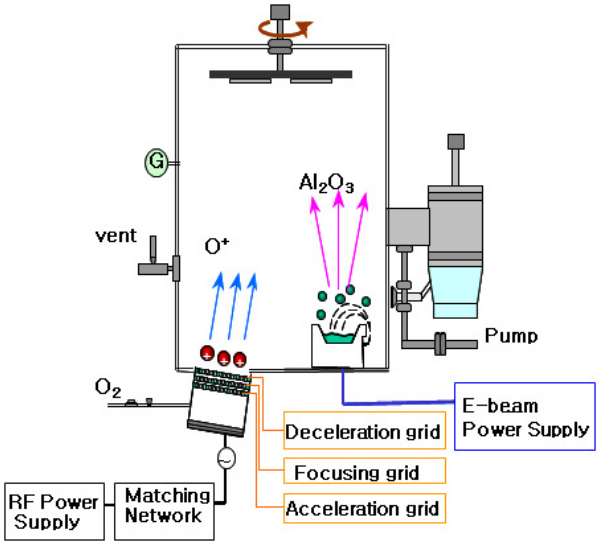

Figure 1. A Schematic of the IBAD process during Al_2O_3 e-beam evaporation.

III. 실험결과 및 고찰

전자빔 증착기의 thickness monitor 기준으로 300 Å의 Al_2O_3 증착 시 산소 IBAD 공정에 따른 두께를 측정하였다. 측정 결과, IBAD DC 에너지가 0일 경우는 330 Å, 100

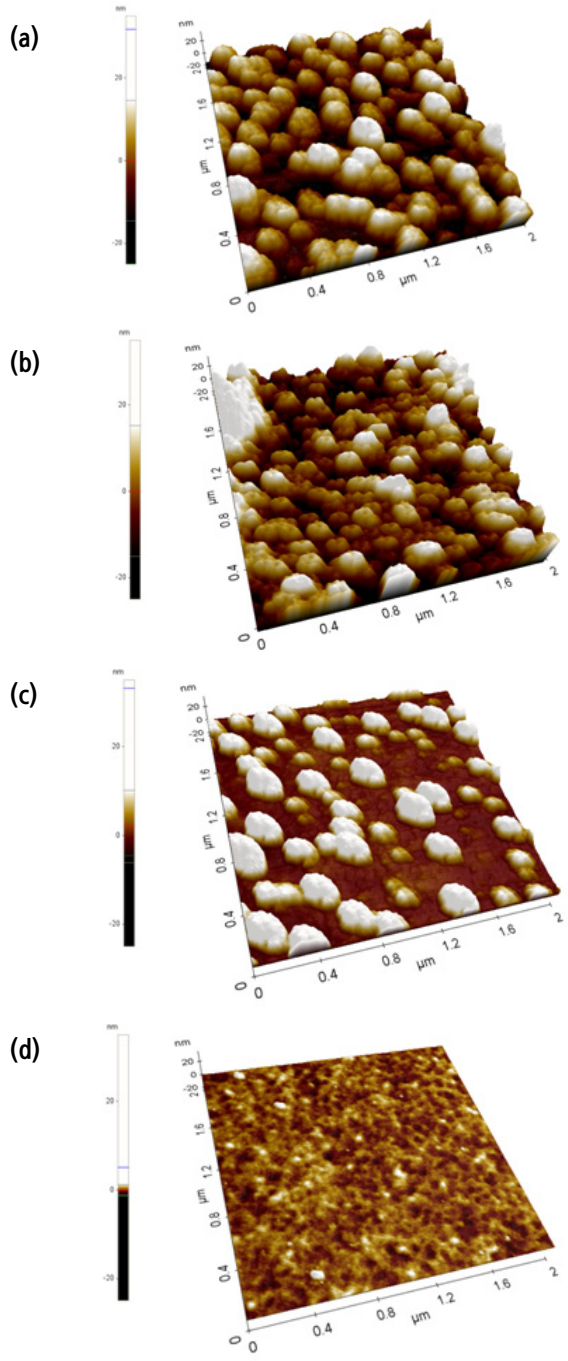

Figure 2. AFM image of Al_2O_3 layers evaporated by O IBAD with an energy of (a) 0 eV, (b) 100 eV, (c) 300 eV, and (d) 500 eV, respectively.

eV 일 경우는 300 Å, 300 eV일 경우는 155 Å의 두께를 얻었고 500 eV일 경우는 측정이 불가능하였다. 전자빔 증착기의 thickness monitor의 보정에서 오차가 심하여 300 Å 증착 시 실제로는 330 Å이 증착됨을 감안하더라도, 측정 결과로부터 O^+ 이온들이 기판에 부딪치면서 당초 기대했던 보조 증착 효과 대신 기존의 박막을 떼어내는 식각 효과를 보여준다고 설명할 수 있다. 이는 얇은 박막 증착에서 상대적으로 더 잘 관찰되었다고 볼 수 있다.

실제로 Al_2O_3 박막의 식각 효과가 발생하였는지를 확인하기 위하여 IBAD 적용한 sample들에 대해서 Fig. 2와 같이 AFM을 측정, 박막 표면의 roughness를 비교, 분석하였다. Fig. 2의 결과로부터, IBAD DC 에너지가 0일 경우는 7.256 nm, 100 eV일 경우는 8.130 nm, 300 eV일 경우는 5.279 nm의 roughness 값을 얻었고 500 eV일 때는 0.297 nm로, roughness값의 거의 박막의 두께에 비례함을 알 수 있다. 또한 IBAD 에너지가 증가할수록 Al_2O_3 박막의 그레인들이 제거되는 것이 확실히 관찰되어졌고, 500 eV의 경우는 잔류하는 Al_2O_3 박막이 존재하지 않음을 확인할 수 있다. Fig. 3의 surface roughness에서도 이를 확실히 보여주고 있는데, 초기 100 eV의 경우 일부 Al_2O_3 그레인들이 제거되는 부분과 그렇지 않은 부분이 공존함으로써 일시적으로 surface roughness가 증가하는 것으로 보이지만, 보다 큰 에너지에서는 확실히 IBAD의 식각 효과에 의하여 roughness가 감소함을 확인할 수 있다. 500 eV의 경우는 두께 자체가 측정이 되지 않으므로 roughness도 거의 존재하지 않는다. 결국 높은 에너지 상에서 산소 이온 빔에 의한 증착 효과뿐 아니라 식각 효과가 존재함을 확인한 결과, 500 eV의 공정조건은 추후 실험에서 적용하기 어렵다는 결론을 내릴 수 있었다.

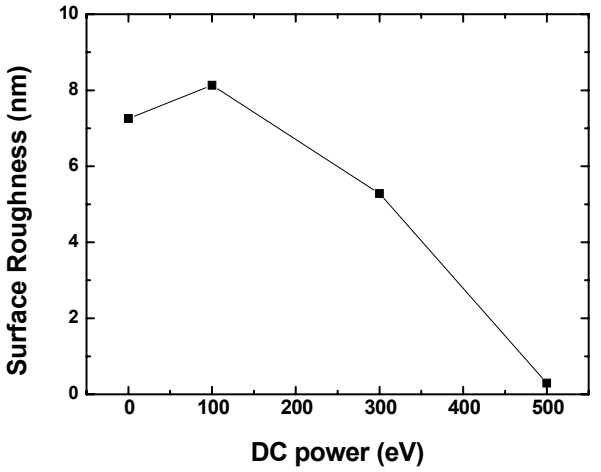

Figure 3. Surface roughness of Al_2O_3 layers evaporated with O IBAD process of Fig. 2.

Fig. 4는 증착된 Fig. 2의 Al_2O_3 박막 위 물방울을 떨어뜨렸을 때 접촉각(contact angle)을 보여주고 있다. 접촉각이 클 경우는 아래와 같은 표면 에너지 공식에 의하여 상대적으로 작은 표면 에너지를 가지게 된다.

$$\text{물의 표면에너지 } r_p = \frac{73}{4}(1+\cos\theta)^2 [mJ]$$

식으로부터 r_p는 물의 에너지, θ는 접촉각을 나타낸다. Fig. 4의 결과로부터 IBAD DC 에너지가 0일 경우는 67.1°, 100 eV일 경우는 46.2°, 300 eV일 경우는 38.3°의 접촉각을 얻을 수 있었다. IBAD의 이온 에너지가 높을수록 작은 접촉각을 가지는 것을 알 수 있으며, 이는 높은 표면 장력을 가짐으로 설명된다. 큰 접촉각의 경우는 게이트 절연막 위 채널층의 증착 – 특히 산화물보다는 펜타신 등의 유기 채널층의 형성 시 수직 방향으로 형성, 높은 전도도를 가지도록 하지만, 반대로 작은 접촉각의 경우는 절연막 위 산화물 반도체 등의 증착, 성장시에는 오히려 장점으로 작용하는 것으로 설명되어진다.

Fig. 5는 박막 형성이 어려운 500 eV의 경우를 제외한 산소 IBAD가 적용된 Al_2O_3 박막으로 $Al/Al_2O_3/Al$ 구조의 커패시터를 제작, 측정한 결과이다. 그림으로부터 커패시턴스 값이 IBAD 에너지가 증가할수록 향상됨을 확인할 수 있었고, 두께 감소를 고려하더라도 상대적으로 유전율 또한 향상됨을 확인할 수 있었다. 다만 박막의 형성 시 어닐

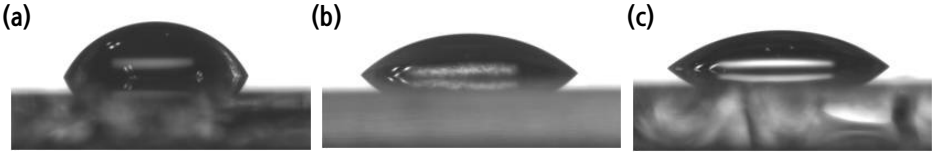

Figure 4. The images of contact angles of water droplet on the Al_2O_3 layers evaporated with O IBAD with an energy of (a) 0 eV, (b) 100 eV, and (c) 300 eV, respectively.

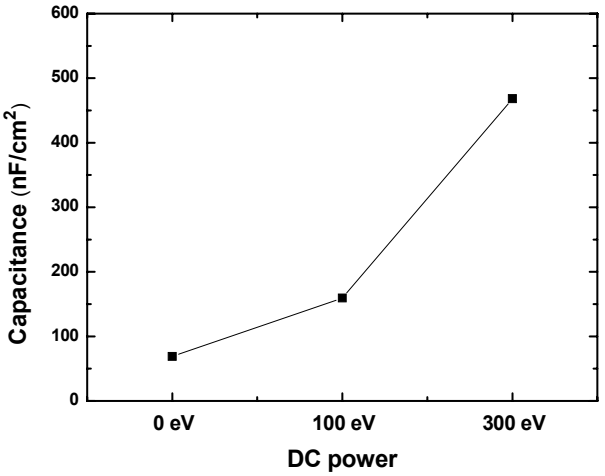

Figure 5. Capacitance of the Al_2O_3 layers evaporated with O IBAD process.

링 공정이 진행되지 않은 관계로 전반적인 특성은 다소 떨어지는 것으로 확인되었다.

IV. 결 론

Al_2O_3 박막의 전자빔 증착시 산소 IBAD를 적용, 박막 증착 시 이온 빔의 에너지에 따라서 박막 증착 시 당초 예상했던 추가 증착이 아니라 식각 효과가 발생함을 두께 측정 및 표면 roughness 분석을 통하여 확인할 수 있었다. 증착된 박막 공정 조건을 이용하여 커패시터를 제작, 측정한 결과 커패시턴스 값이 상대적으로 개선됨을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2009-0076193).

참고문헌

[1] D. A. Muller, T. Sorsch, S. Moccio, F. H. Baumann, K. Evans-Lutterodt, and G. Timp, Nature **399**, 758 (1999).

[2] M. D. Groner, F. H. Fabreguette, J. W. Elam, and S. M. George, Chem. Mater. **16**, 639 (2004).

[3] M. Leskela and M. Ritala, Angew. Chem. **42**, 5548 (2003).

[4] I. Shimizu, Y. Setsuhara, S. Miyake, M. Kumagai, K. Ogata, M. Kohata, and K. Yamaguchi, Surf. Coat. Technol. **131**, 187 (2000).

[5] S. B. Sant, J. Wang, D. Sampson, and J. C. S. Kools, Mater. Lett. **62**, 530 (2008).

[6] E. S. Cho, J. Cho, and S. J. Kwon, Mol. Cryst. Liq. Cryst. **550**, 119 (2011).

≪Research Paper≫ Journal of the Korean Vacuum Society Vol.22 No.1, January 2013, pp.26~30
http://dx.doi.org/10.5757/JKVS.2013.22.1.26

A Study on the Etching Effect and the Capacitance of Aluminum Oxide Thin Film by Oxygen Ion Beam

E. S. Cho* and S. J. Kwon

Department of Electronics, Gachon University, Seongnam 461-701

(Received November 12, 2012, Revised December 20, 2012, Accepted January 2, 2013)

For the realization of high-k insulator, aluminum oxide (Al_2O_3) was deposited by using an oxygen ion beam assisted deposition (IBAD) during e-beam evaporation. From the thickness of the Al_2O_3 layer evaporated with IBAD process, it was possible to investigate the etching effect of ion beam at higher energies during e-beam evaporation. It was also possible to obtain a higher capacitance as a result of IBAD in spite of the reduced thickness of Al_2O_3.

Keywords : Aluminum oxide, Oxygen ion beam assisted deposition, Etching effect, Capacitance

* [E-mail] es.cho@gachon.ac.kr