

Al₂O₃ 기판 위에 제작된 Ta/Ta₂O₅/Ta 박막 커패시터의 전기적 특성

김현주, 송재성, 김인성, 김상수
창원대학교, 한국전기연구원

Electrical Properties of Ta/Ta₂O₅/Ta Thin Film Capacitor deposited on Al₂O₃ Substrate

Hyun-Ju Kim, Jae-Sung Song, In-Sung Kim, Sang-Su Kim
Changwon National University, Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - 최근 전자기기의 경박단소화 추세는 전자기기의 크기와 가격의 감소를 이끌었으며, 이러한 추세는 앞으로 지속될 것이다. 이와 같은 현상으로 전자기기를 구성하는 요소의 절반이상을 차지하는 단위수동소자의 경우 소형화를 넘어 박막화 및 집적화가 절실히 요구되는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 현재 GHz 대역의 휴대용 무선통신 송·수신부 등에 사용되고 있는 기판이 Al₂O₃ 기판인 점을 고려하여 기판의 공평화를 위해 Al₂O₃ 기판 위에 Ta/Ta₂O₅/Ta 구조를 갖는 MIM 박막커패시터를 제작하여 그 특성을 고찰하였다. 모든 박막의 증착은 RF-magnetron reactive sputtering법에 의해 이루어졌으며, 유전체 열처리에는 700 °C 진공상태에서 60 sec 동안 수행하였다. XRD 분석결과, as-deposited Ta₂O₅ 박막은 열처리 후에 비정질상에서 결정질상으로 변환되었다. Ta/Ta₂O₅/Ta/Ti/Al₂O₃ 커패시터의 전기적 특성으로는 C-F, C-V, I-V 를 측정하였다.

1. 서 론

전자기기의 크기가 작아지고, 가격이 하락하는 경향에 따라, 단위소자 역시 소형화, 경량화 및 고성능화가 요구되고 있다. 따라서, 메모리용 게이트 절연막 및 커패시터의 유전박막의 두께감소가 요구되고, 현재 사용되고 있는 실리콘 산화막의 경우 공정상의 어려움과 두께가 수 nm 이하가 될 경우 기판의 표면 거칠기에 의한 신뢰성 문제가 나타나기 때문에 보다 높은 유전율과 낮은 누설 전류 특성을 가지는 물질 개발이 요구되고 있다. 이러한 차세대 물질로서 메모리용 게이트 절연막으로는 Al₂O₃, 커패시터 유전박막으로는 Ta₂O₅와 TiO₂가 주목을 받고 있다.

이들 물질 중 Ta₂O₅(tantalum pentoxide) 박막은 이미 알려진 바와 같이 높은 커패시터 밀도와 유전율(20-30)을 가지고[1-3], 공정 과정이 용이하기 때문에 유전체로서 박막 커패시터 산업에서 응용되고 있다.

또한, 이러한 Ta₂O₅ 유전체를 이용한 커패시터 제작에 있어 현재 전극 제조에 사용되고 있는 물질은 백금(Pt), 팔라듐(Pd), 금(Au)과 같은 고가의 귀금속[4]으로 유전체 제조에 이용되는 타겟과 달라 커패시터의 가격을 높이고, 공정을 복잡하게 하는 문제점이 있다. 이에 비해 금속 Ta(tantalum)는 화학적으로 안정한 특성을 갖고 있고, Ta₂O₅와 열역학적, 전기적으로 양립할 수 있기 때문에 하부전극으로서 적당하다고 보고 되었다[4,5].

따라서 본 연구에서는 커패시터 유전체로서 관심의 대상이 되어온 Ta₂O₅ 물질을 사용하고, 현재 사용중인 고가의 금속 전극 대신 유전체와 전극에 동일한 타겟을 사용함으로써 커패시터 공정과정을 단순화하고, 커패시터의 제조 단가를 낮출 수 있도록 전극 물질로서 상·하부 전극 모두를 Ta 재료를 사용하여 MIM 구조의 박막 커패시터를 제조하였다. 이러한 박막 커패시터의 기판으로는 현재 GHz대역의 휴대용 무선통신 송·수신부 등에 사용하고 있는 것이 Al₂O₃ 기판이므로 기판의 공평화를

위해 Al₂O₃ 기판 위에 이를 적용하여 그 특성을 고찰하였다.

2. 실험 방법

본 논문에서는 순도 96 %의 Al₂O₃ 기판(21×21 mm²)을 사용하여 아세톤과 알코올로 초음파 세척하고, 표면의 자연 산화층을 10%의 HF (hydrofluoric acid) 용액으로 제거한 후 확산 방지막으로 직경 4"의 Al(순도 99.99 %) 타겟을 사용해 RF-magnetron reactive sputtering법으로 Al-O(≒ 2000 Å)를 형성하였으며, 같은 방법으로 산화막과 Ta의 접착력을 강화하기 위해 Ti 막을 증착하였다. 이렇게 제작된 기판 위에 직경 4"의 Ta(순도 99.99 %) 타겟을 사용하여 RF-magnetron reactive sputtering법에 의해 MIM(metal-insulator-metal) 커패시터용 Ta₂O₅ 박막을 제조하였다. 스퍼터링 전 초기 진공도는 1.0×10⁻⁵ torr였으며, 증착 중 진공도는 5.0×10⁻³ torr로 일정하게 유지시켰다[7]. 증착시 온도는 자연상태를 유지하였으며, 방전전력은 150 W로 고정시키고, 가스는 Ar : O₂가 각각 60 % : 40 %로 O₂ 가스량은 33.3 sccm 이었다. 제조 조건을 아래 표 1에 나타내었다. 이와 같이 제조된 Ta₂O₅ 박막은 결정화 온도영역으로 알려진 700°C [7,8], 진공(20~30×10⁻³ torr)분위에서 60 sec 동안 RTA(rapid thermal annealing) 처리되었다. 상하부전극은 Ta를 사용했으며, Ar 가스 50 sccm과 방전 전력 150 W, 5.0×10⁻³ torr 압력 하에서 스퍼터링법에 의해 증착되었다. Ta₂O₅ 박막의 전기적 특성을 측정하기 위한 MIM 커패시터 구조의 제조를 위해 상부전극은 직경 1 mm의 shadow mask를 사용하였다. 이와 같이 제조한 박막의 두께는 α-step(Tencor Alpha-step 200 profilo meter)을 통해 확인 할 수 있었다. I-V 특성은 KEITHLEY 237 계측기를 사용해 30s의 delay time을 주어 측정하였으며, C-F 및 C-V 특성은 HP4194A impedance-gain phase 분석기를 사용하여 제조된 박막의 전기적 특성에 대해 조사하였다. 또한, 제조된 박막의 열처리에 의한 결정성을 알아보기 위하여 XRD(X-ray diffraction)를 사용하고, 유전체의 stoichiometric 여부를 확인하기 위해 RBS(Rutherford Backscattering Spectroscopy)를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

RF-magnetron reactive sputtering법에 의해 제작된 Ta₂O₅ 박막의 열처리 전후 결정화 거동을 보기 위해 X-ray 회절 패턴을 측정하고, 그 결과를 그림 1에 나타내었다. As-deposited Ta₂O₅ 박막에서는 Ta(β-Ta) 전극이 (111) 면이 주된 피크로 Ti 위에 성장하였고, Ta₂O₅ 박막의 결정피크가 나타나지 않는 것으로 보아 비결정질 상태이며, 700 °C에서 60 sec 동안 vacuum RTA 처리한 Ta₂O₅ 박막의 경우 결정화(orthorhombic)로 인해 (1 11 0) 면이 주피크로 성장한 것으로 나타났다.

표 1 MIM 커패시터의 증착 조건

Table 1. Deposition condition of MIM capacitor

deposition parameter	condition
base pressure	1.0×10^{-5} torr
working pressure	5.0×10^{-3} torr
substrate	Al ₂ O ₃ (96 %)
target	Ta(99.99%)
Ar/O ₂ ratio	60 %: 40 % (33.3 sccm)
RF power	150 W (fixed)
temperature	room temperature
top electrode	Ta, Ø=1 mm
bottom electrode	Ta, 1100 Å

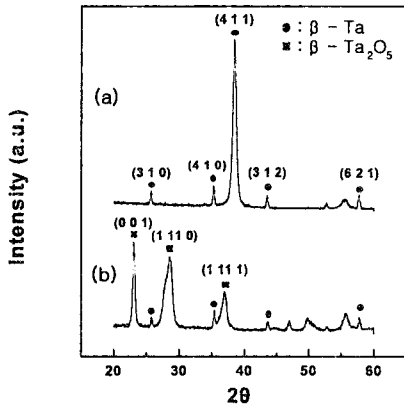


그림 1 Ta₂O₅ 박막의 XRD 패턴.

Fig. 1 XRD pattern of Ta₂O₅ thin film.

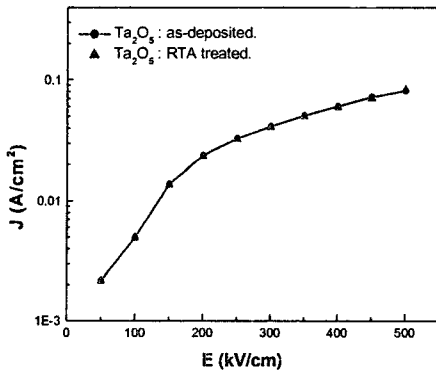


그림 2 열처리 전후 Ta₂O₅ 박막의 J-E 특성

Fig. 2. J-E properties of Ta₂O₅ thin films fabrication on Al₂O₃

메모리 소자나 rf 수동소자로서 사용되기 위한 중요한 전기적 특성 중의 하나가 바로 누설 전류밀도이다. 같은 재료를 사용하더라도 박막이 기존의 Si 기판 위에 증착된 경우와 표면 상태가 다른 Al₂O₃ 기판위에 증착된 경우 이에 대한 누설전류밀도가 달라질 것으로 사료된다. 이러한 관점에서 제작된 소자에 대한 누설전류를 측정하

여 가해진 전기장에 대한 누설전류밀도를 그림 2에 나타내었다. 일반적으로 많은 연구자들[6,7]이 비정질 Ta₂O₅의 누설전류가 높은 온도에서 열처리된 결정질 Ta₂O₅보다 더 낮다고 보고하고 있지만, Al₂O₃ 기판을 사용한 본 실험에서는 그림에 나타나듯이 열처리 전후에 따른 큰 차이는 찾아 볼 수가 없었다. 한편, 측정 결과를 보면, 일반적으로 사용하는 Si-p 기판 위에 나타난 결과와 비교해 볼 때, 누설전류가 상대적으로 큰 값을 보였다. 이렇게 거칠기를 가지는 Al₂O₃ 기판 위에 극히 얇은 박막을 형성할 경우 나타나는 이러한 현상을 극복하기 위해서는 표면 거칠기를 제거 할 수 있는 공정 내지는 표면처리가 절실하게 요구되어지며, 이것이 저렴한 비용으로 고성능의 소자를 개발하기 위한 가장 큰 장애물이 될 것으로 사료되어진다. 하지만 많은 누설전류에도 불구하고 전계에 지배적인 전도 메카니즘은 저전계($E < 1 \times 10^5$ V/cm)에서는 로그 전류밀도가 전기장이 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 Hopping 전도메카니즘으로 나타났으며, 고전계($E > 1 \times 10^5$ V/cm)에서는 전류밀도가 전기장의 제곱에 비례하여 나타나는 Space Charge Limited 전도 메카니즘을 따르는 것으로 나타났다.

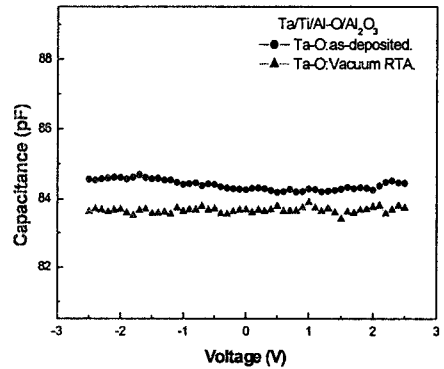


그림 3 열처리 전후 Ta₂O₅ 박막의 C-V 특성

Fig. 3. C-V properties of Ta₂O₅ thin films fabrication on Al₂O₃

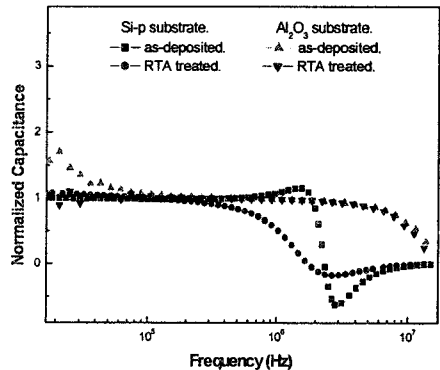


그림 4 Si 및 Al₂O₃ 기판위에 제작된 열처리 전후 Ta₂O₅ 박막 커패시터의 C-F 특성

Fig. 4. C-F properties of Ta₂O₅ thin film capacitors fabricated on Si and Al₂O₃.

제작된 소자의 특성을 평가할 수 있는 방법 중의 하나로 정전용량의 전압 의존성이 있다. 이에, 각 샘플에 대한 정전용량의 전압 의존성을 측정된 결과를 그림 3에 나타내었다. 각 조건에 따른 박막은 -2.5 V ~ 2.5 V 범위에서 일정한 시간을 두고 100 kHz에서 0.1 V 씩 인가하여 측정된 결과 83~85 pF의 일정한 정전용량 값을 유지하여 전압 변화에 대해 안정함을 보였다.

그림 4는 Si 기판위에 제작된 박막 커패시터와 Al₂O₃ 위에 제작된 것의 주파수에 따른 커패시턴스를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 주파수 특성은 Al₂O₃ 기판위의 것이 Si 기판 위의 것에 비해 월등히 좋음을 확인 할 수 있었다. 따라서, Ta 전극과 Ta₂O₅ 유전체를 가진 박막 커패시터가 현재 커패시터의 기판으로 GHz대역의 휴대용 무선통신 송·수신부 등에 사용하고 있는 Al₂O₃ 기판 위에 적용가능한 것으로 판단된다.

3. 결론

본 연구에서는 RF 반응성 마그네트론 스퍼터링법을 사용하여 Al₂O₃ 기판위에 전극물질로 유전체와 동일 재료 Ta를 사용하고, 유전체로서 Ta₂O₅를 가지는 MIM 커패시터를 제작하고 그 특성을 평가하였다.

C-F 측정 결과에서 보듯 제작된 커패시터는 Si 기판 위에 것 보다 월등한 주파수 특성을 보였고, 전압 특성 측정 결과 역시 MIM 커패시터의 특성으로 전압의 변화에 대해 안정한 결과를 보였다. 그러나 일반적으로 사용되어온 Si 기판의 결과와 비교해 볼 때 극히 얇은 박막의 경우 상대적으로 낮은 커패시턴스 값을 나타내었다.

I-V 특성 측정결과에서는 Si 기판의 것과는 다르게 열처리 전후 큰 차이를 볼 수 없었으며, 이에 비해 비교적 큰 누설전류를 보였다. 이는 주파수 의존성 결과에서 보여주듯 재료 자체의 문제에서 나타나는 결과라기보다 표면이 거친 기판 위에 박막이 균일하게 증착되지 않아, 더 큰 누설전류가 발생하는 것으로 사료되어진다.

위와 같은 결과들을 Si를 기판으로 사용한 경우의 특성과 비교해 볼 때 재료 자체의 문제라기보다는 Si에 샘플에 비해 훨씬 큰 표면 거칠기를 가진 Al₂O₃ 기판의 경우 순수 Ta 층이나 TaOx 박막이 균일하게 형성되지 못하여 mixing layer 등이 형성된 결과로 사료되어진다. 따라서 Al₂O₃ 기판 위에 고성능의 MIM 커패시터 구현에 있어 우선 Al₂O₃ 기판의 표면상태 개선의 측면에서 연구가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

[참 고 문 헌]

- [1] S. Ezhivalavan and Tseung-Yuen Tseng, "Conduction mechanisms in amorphous and crystalline Ta₂O₅ thin films", J. Appl. Phys., Vol. 83 No. 9, p. 4797, 1998.
- [2] 유영각, 이준웅, "졸-겔법에 의한 Ta₂O₅ 박막의 전기적 특성", 전기전자재료학회 논문지, Vol. 10, No. 1, p 61, 1997.
- [3] 김인성, 이동윤, 송재성, 윤문수, 박정후, "Ta₂O₅ 커패시터 박막의 유전특성과 열 안정성에 관한 연구", Trans. KIEE. Vol 51, No 5, p 185, 2002.
- [4] S. Ezhilvalavan and Tseung-Yuen Tseng, "Electrical properties of Ta₂O₅ thin films deposited on Ta", Applied Physics Letters, Vol. 74 No. 17, p 2477, 1999.
- [5] S. Ezhilvalavan and Tseung-Yuen Tseng, "Properties and reliability of Ta₂O₅ thin films deposited on Ta", 1999 Electronic Components and Technology Conference. IEEE, p 1042, 1999.
- [6] S.O.Kim, and H.J.Kim, J.Vac.Sci.Technol. B, 12 (1994) 3006
- [7] I.Kim, J.S.Chun, and W.Lee, Mater. Chem. Phys., 44 (1996) 288
- [8] F. C. Chiu, J.J. Wang and J. Y. Lee, J. Appl. Phys. 81 (1997) 6911