

논문 16-9-10

Al₂O₃ 기판위에 형성된 Ti-O 완충층을 가진 Ta/Ta₂O₅/Ta 커패시터의 특성

The Characteristics of Ti-O Buffer Layered Ta/Ta₂O₅/Ta Capacitors on the Al₂O₃ Substrate

김현주*, 송재성**, 김인성**, 김상수*
(Hyun-Ju Kim*, Jae-Sung Song**, In-Sung Kim**, and Sang-Su Kim*)

Abstract

We investigated the electrical characteristics of Ta₂O₅(tantalum pentoxide) film and Ti-O/Ta₂O₅ film deposited on Al₂O₃ based substrate. Ta (tantalum) electrode and Al₂O₃ substrate was used for the purpose of simplifying the manufacturing process in IPD's (integrated passive devices). Dielectric materials (Ta₂O₅ and Ti-O/Ta₂O₅ films) deposited on Ta/Ti/Al₂O₃ were annealed at 700 °C for 60 sec. in vacuum. The XRD results showed that as-deposited Ta₂O₅ film possessed amorphous structure, which was transformed to crystallines by rapid thermal heat treatment. We compared the lnJ-E^{1/2}, C-V, C-F of both as-deposited and annealed dielectric thin films deposited on Ta bottom electrode. From this results, we concluded that the leakage current could be reduced by introducing Ti-O buffer layer and conduction mechanisms of Ta₂O₅ and Ti-O/Ta₂O₅ could be interpreted appropriately by Schottky emission effect.

Key Words : RF-magnetron reactive sputtering, Al₂O₃ substrate, Ta₂O₅(tantalum pentoxide), Ti-O buffer layer, Ta electrode

1. 서론

최근 전자제품의 경박단소화 추세로 전자기기의 크기가 작아지고, 가격이 하락하고있으며, 이에 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 누설전류 특성을 가지는 물질 개발이 요구되고 있다. 이러한 차세대 물질로서 메모리용 게이트 절연막용으로는 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 있지만, 누설전류와 절연파괴 강도에 있어서는 아직까지 다른 유전체재료에 비해 큰 단점을 가지고 있다[4]. 이에 여러 가지 방법으로 특성을 개선하기 위한 연구가 활발하게 진행 중에 있지만, 스퍼터 된 Ta₂O₅ 박막에 대한 연구는 미진하다.

또한, 이러한 Ta₂O₅ 유전체를 이용한 커패시터 제작에 있어 현재 전극 제조에 사용되고 있는 물

* : 창원대학교 대학원 물리학과
(경남 창원시 사림동 9,

Corresponding Author : hjk9123@keri.re.kr)

** : 한국전기연구원 전자기소자연구그룹
2002년 12월 16일 접수, 2003년 2월 8일 1차 심사완료,
2003년 4월 4일 2차 심사완료, 2003년 4월 30일 3차 심사완료,
2003년 5월 13일 최종 심사완료

질은 백금(Pt), 팔라듐(Pd), 금(Au)과 같은 고가의 귀금속[5]으로 유전체 제조에 이용되는 타겟과 달라 캐패시터의 가격을 높이고, 공정을 복잡하게 하는 문제점이 있다. 그러나, 이에 비해 금속 Ta(tantalum)는 화학적으로 안정한 특성을 갖고 있고, Ta₂O₅와 열역학적, 전기적으로 양립할 수 있기 때문에 하부전극으로서 적당하다고 보고되었다[5,6].

따라서 본 연구에서는 고가의 전극 재료 물질을 대신하고, 유전체와 전극에 동일한 타겟을 사용함으로써 캐패시터 공정과정을 단순화하고, 캐패시터의 제조 단가를 낮출 수 있도록 전극 물질로서 상하부 모두 Ta를 사용하였고 누설전류 문제 등 전기적 특성의 개선을 위해 유전체와 전극사이에 Ti-O 층 도입을 시도하여 Ta₂O₅ 캐패시터 박막을 제조하고 그 특성을 고찰하였다.

또한, 이러한 캐패시터를 표면처리 및 buffer layer층 형성으로 일정한 roughness와 waveness를 갖게 된 Al₂O₃ 기판 위에 구현하였는데, 이것은 GHz대역의 휴대용 무선통신 송·수신부 등에 사용하고 있는 기판이 Al₂O₃ 기판이므로 기판의 공동을 위해 적용한 것이다.

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 Ti막을 증착하였다. 이렇게 제작된 기판 위에 직경 4"의 Ta(순도 99.99 %) 타겟을 사용하여 RF-magnetron reactive sputtering법에 의해 MIM(metal - insulator-metal) 캐패시터용 Ta₂O₅ 박막을 제조하였다. 스퍼터링 전 초기 진공도는 1.0×10⁻⁵ torr였으며, 증착중 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 온도 영역으로 알려진 700℃[7,8], 진공(20~30×10⁻³ torr)분위기에서 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 캐패시터 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-V 특성과 C-F 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 사용하였다.

표 1. MIM 캐패시터의 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

3. 결과 및 고찰

방전전력과 산소 분압비를 고정하여 제조된 Ta-O 박막 및 Ti-O/Ta-O 박막의 두께는 각각 대략 400 Å 및 500 Å으로 그 단면 구조를 그림 1에 나타내었다.

RF-magnetron reactive sputtering법에 의해 제작된 Ta₂O₅ 박막의 열처리 전후 결정화 거동을 보기 위해 X-ray 회절 패턴을 측정하고, 그 결과를 그림 2에 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.

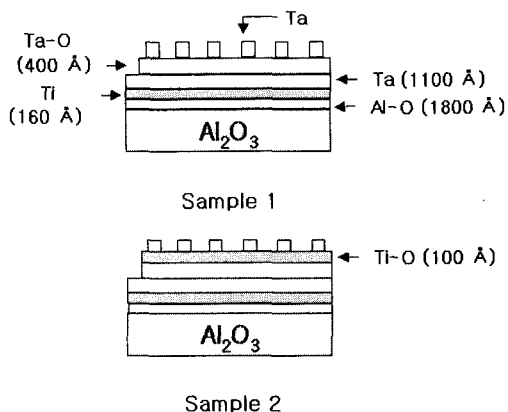


그림 1. Ta₂O₅ 및 Ti-O/Ta₂O₅ 박막의 단면도.
Fig. 1. Cross-section of Ta₂O₅ thin films and Ti-O/Ta₂O₅ thin films.

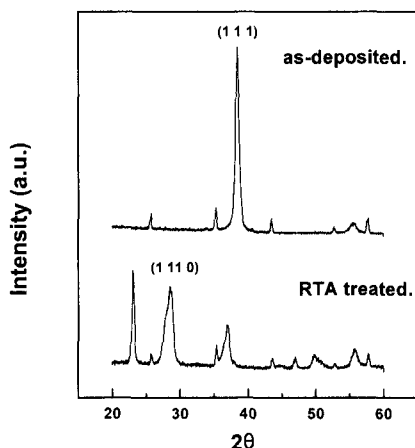
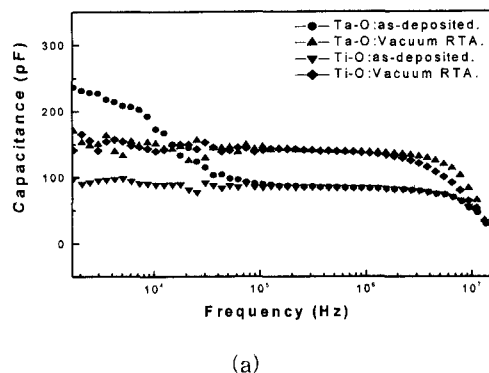
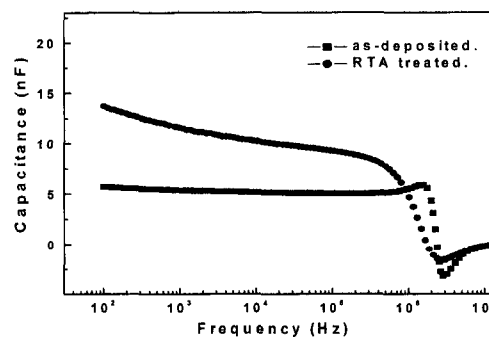


그림 2. Ta₂O₅ 박막의 XRD 패턴.
Fig. 2. XRD pattern of Ta₂O₅ thin film.

그림 3은 열처리 전후 p-type Si 기판 위의 Ta₂O₅와 Al₂O₃ 기판 위의 Ta₂O₅ 및 Ti-O/Ta₂O₅ 구조에 대한 정전용량의 주파수 의존성을 나타낸 것이다. 그림 (a)에서 Al₂O₃ 기판 위의 열처리 전후의 Ta₂O₅, Ti-O/Ta₂O₅ 박막을 비교해 볼 때, Ta₂O₅의 경우는 열처리 전에 비해 열처리 후 시편이 주파수에 따른 정전용량 값이 안정한 값을 보임을 뚜렷히 볼 수 있다. 이는 박막형성에 있어 결정 핵이 생성되고 결정화가 진행됨에 따라 정전용량의 주파수 의존성이 감소하는 일반적인 결과를 나타낸다. 이에 비해 Ta₂O₅ 위에 Ti-O층을 도입한



(a)



(b)

그림 3. 열처리 전후 (a) Ta₂O₅ 및 Ti-O/Ta₂O₅ /Al₂O₃와 (b) Ta₂O₅/Si-p 박막의 C-F 특성.
Fig. 3. C-F properties of (a) Ta₂O₅ and Ti-O/Ta₂O₅/Al₂O₃, (b) Ta₂O₅/Si-p thin films.

경우를 보면, 열처리 전후 시편 모두 주파수의 변화에 대해 정전용량 값이 크게 의존적이지 않으며 안정함을 볼 수 있었는데, 이것은 Ti-O층의 도입으로 Ta₂O₅박막과 표면 Ta전극간 누설전류가 크게 감소한 것에 기인하며, EDS표면분석결과도 Ta전극의 스파이크현상과 원자이동도도 현저히 감소한 것으로 나타났다.

또한, 유전손실은 완충층이 없을때 400~500×10⁻³에서, Ti-O완충층 도입으로 20~30×10⁻³으로 감소하였는데, 이 역시 완충층 도입으로 누설전류가 크게 감소하였기 때문으로 생각된다.

그림 (b)에서는 같은 조건에서 Al₂O₃ 기판을 가진 커패시터의 경우와 정전용량값의 비교를 위해

p-type Si 기판위에 증착된 Ta₂O₅의 주파수 특성을 나타내었다. 비교 결과 Al₂O₃ 기판을 가진 경우가 Si 기판을 가진 것에 비해 훨씬 낮은 커패시턴스 값을 보였다.

제작된 소자의 특성을 평가할 수 있는 방법 중의 하나로 정전용량의 전압 의존성이 있다. 이에, 각 샘플에 대한 정전용량의 전압 의존성을 측정된 결과를 그림 4에 나타내었다. 각 조건에 따른 박막은 -2.5 V ~ 2.5 V 범위에서 83~85 pF의 일정한 정전용량 값을 유지하여 전압 변화에 대해 안정함을 보였다.

위의 결과로 Ta₂O₅ 박막과 Ta 전극이외의 부분에서 박막에 악영향을 미치는 것을 알 수 있었는데 이러한 관점에서 그 소자에 대한 누설전류를 측정하였다. 그림 5 (a)는 열처리 전후 Ta₂O₅ 및 Ti-O/Ta₂O₅ 박막의 누설전류밀도를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 결과를 보면 열처리 전후에 따른 큰 차이는 찾아 볼 수가 없었으며, 일반적으로 알려진 누설전류밀도보다 다소 큰 값을 나타냄을 볼 수 있다.

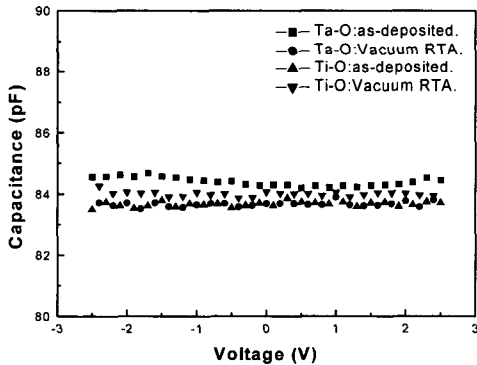
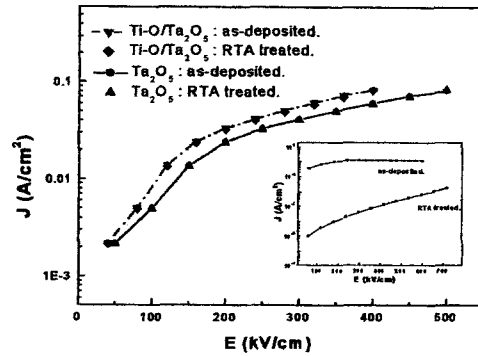
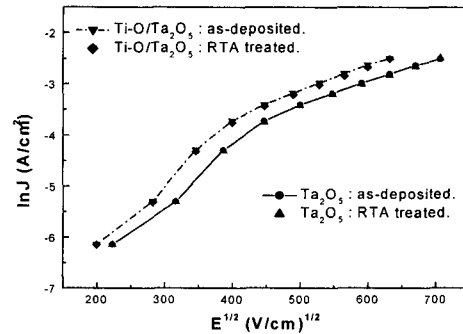


그림 4. 열처리 전후 Ta₂O₅ 및 Ti-O/Ta₂O₅ 박막의 C-V 특성.
Fig. 4. C-V properties of Ta₂O₅ thin films and Ti-O/Ta₂O₅ thin films.

그림 5 (b)는 Ta 위에 증착된 Ta₂O₅의 전도메카니즘을 알아보기 위해 인가 전계를 고려하여 전도과정을 Schottky emission type으로 가정하고, E^{1/2}에 따른 누설전류밀도의 변화를 나타낸 것이다. 여기서, Schottky emission type은 다음과 같이 정의된다.



(a)



(b)

그림 5. 열처리 전후 (a) Ta₂O₅ 및 Ti-O/Ta₂O₅ 박막의 J-E 특성 및 (b) 전도 메카니즘.
Fig. 5. (a) J-E properties and (b) conduction mechanism of Ta₂O₅ thin films and Ti-O/Ta₂O₅ thin films.

$$J_s \propto \exp\left[\frac{1}{kT} \left(\frac{q^3 E}{4\pi\epsilon_i}\right)^{1/2}\right]$$

이는 다시 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln J_s \propto AE^{1/2}$$

위 식에 의해 누설전류밀도와 가해진 전기장과의 관계에서 전류밀도가 인가된 전압의 제곱근 E^{1/2}에 따라 지수적으로 증가함을 알 수 있는데, 그림에서 보면 E^{1/2}에 대해 lnJ_s가 비례하여 나타나므로 표면 거칠기가 심각한 Al₂O₃ 기판의 경우 Ta₂O₅ 박막의 전도기구는 Schottky emission type에 적용되는 것으로 사료된다. 이러한 결과들을 그림 5 (a)에 삽입된 p-type Si 기판 위에 나타난 결과와 비교해 볼 때 누설전류가 더 크게 나타남을 볼 수

있었는데, Al_2O_3 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.

4. 결론

본 연구에서는 RF 반응성 마그네트론 스퍼터링법에 의해 Al_2O_3 기판위에 전극물질로 유전체와 동일 재료 Ta를 사용하고, 유전체로서 Ta_2O_5 와 $Ti-O/Ta_2O_5$ 를 가지는 MIM 커패시터를 제작하고 그 특성을 평가하였다.

정전용량의 주파수 의존성에서 Ta_2O_5 박막과 $Ti-O/Ta_2O_5$ 박막은 p-type Si기판의 결과와 비교해보았을 때 아주 낮은 커패시턴스 값을 보였으나 주파수 의존성에서 월등하게 나은 특성을 보여주었다.

I-V 특성 측정결과에서는 비교적 큰 누설전류를 보였으며, 이는 주파수 의존성 결과에서 보여주듯 재료 자체의 문제에서 나타나는 결과라기 보다 표면이 거친 기판 위에 박막이 균일하게 증착되지 않아 더 큰 누설전류가 발생하는 것으로 사료되어진다. 하지만 많은 누설전류에도 불구하고 전체에 지배적인 전도 메카니즘은 Schottky emission 메카니즘에 따른 것으로 나타났다.

이상의 결과들로 볼 때 Ta전극의 평가를 위해 버퍼층 Ti-O를 도입하였는데 최종 열처리후 똑같은 안정성을 보여주어 Ta전극에 의한 손상은 전혀 발견 할 수 가 없었다.

또한 p-type Si를 기판으로 사용한 경우의 특성과 비교해 볼 때 재료 자체의 문제라기보다는 p-type Si에 비해 훨씬 큰 표면 거칠기를 가진 Al_2O_3 기판 위에 박막이 균일하게 형성되지 못하여 발생한 결과로 사료되어진다. 따라서 Al_2O_3 기판 위에 고성능의 MIM 커패시터 구현에 있어 Al_2O_3 기판의 표면상태 개선의 측면에서 연구가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

crystalline Ta_2O_5 thin films”, J. Appl. Phys., Vol. 83, No. 9, p. 4797, 1998.

- [2] 유영각, 이준용, “졸-겔법에 의한 Ta_2O_5 박막의 전기적 특성”, 전기전자재료학회논문지, 10권, 1호, p. 61, 1997.
- [3] 김인성, 이동윤, 송재성, 윤문수, 박정후, “ Ta_2O_5 커패시터 박막의 유전특성과 열 안정성에 관한 연구”, Trans. KIEE. Vol. 51, No. 5, p. 185, 2002.
- [4] Fu-Chien Chiu, Jenn-Jyh Wang, Joseph Ya-min Lee, and Shich Chuan Wu, “Leakage current in amorphous Ta_2O_5 thin films”, J. Appl. Phys., Vol. 81, p. 6911, 1997.
- [5] S. Ezhilvalavan and Tseung-Yuen Tseng, “Electrical properties of Ta_2O_5 thin films deposited on Ta”, Applied Physics Letters, Vol. 74, No. 17, p. 2477, 1999.
- [6] S. Ezhilvalavan and Tseung-Yuen Tseng, “Properties and reliability of Ta_2O_5 thin films deposited on Ta”, 1999 Electronic Components and Technology Conference. IEEE, p. 1042, 1999.
- [7] 김인성, 정순중, 송재성, 윤문수, 박정후, “Au/ Ta_2O_5 /Pt MIM capacitor의 annealing 유전특성”, 전기전자재료학회논문지, 14권, 12호, p. 1016, 2001.
- [8] 유영각, “Sol-Gel 법에 의한 Ta_2O_5 박막의 전기전도와 광학적 특성”, 전기전자재료학회 논문지, 13권, 12호, p. 575, 2000.

참고 문헌

- [1] S. Ezhilvalavan and Tseung-Yuen Tseng, “Conduction mechanisms in amorphous and