

The Study on Dielectric Property and Thermal Stability of Ta₂O₅ Thin-films

金寅性* · 李東胤* · 宋在成** · 尹文洙** · 朴正后***

(In-Sung Kim · Dong-Yeun Lee · Jae-Sung Song · Mun-Soo Yun · Chung-Hoo Park)

Abstract - Capacitor material utilized in the downsizing passive devices and dynamic random access memory (DRAM) requires the physical and electrical properties at given area such as capacitor thickness reduction, relative dielectric constant increase, low leakage current and thermal stability.

Common capacitor materials, SiO₂, Si₃N₄, SiO₂/Si₃N₄, TaN and et al., used until recently have reached their physical limits in their application to several hundred angstrom scale capacitor. Ta₂O₅ is known to be a good alternative to the existing materials for the capacitor application because of its high dielectric constant (25~35), low leakage current and high breakdown strength. Despite the numerous investigations of Ta₂O₅ material, there have little been established the clear understanding of the annealing effect on capacitance characteristic and conduction mechanism, design and fabrication for Ta₂O₅ film capacitor.

This study presents the structure-property relationship of reactive-sputtered Ta₂O₅ MIM capacitor structure processed by annealing in a vacuum. X-ray diffraction patterns showed the existence of amorphous phase in as-deposited condition and the formation of preferentially oriented-Ta₂O₅ in 650, 700°C annealing. On 650, 700°C annealing under the vacuum, the leakage current decrease and the enhanced temperature-capacitance characteristic stability. and the leakage current behavior is stable irrespective of applied electric field. The results states that keeping Ta₂O₅ annealed at vacuum gives rise to improvement of electrical characteristics in the capacitor by reducing oxygen-vacancy and the broken bond between Ta and O.

Key Words : Ta₂O₅, Capacitor, thin films, thermal stability, dielectric property

1. 서 론

커패시터(capacitor)의 소형·박형화와 반도체 기억 소자 DRAM(dynamic random access memory)의 집적도 증가는 주어진 면적에서 유전체 두께 감소, 유전율 증대, 적은 누설 전류 그리고 높은 절연강도를 요구하고 있으며, 지금까지 주로 사용되어온 silicon oxide(SiO₂), silicon nitride(Si₃N₄), SiO₂/Si₃N₄와 TaN은 누설전류, 유전율, 두께 등의 문제로 인하여 커패시터의 응용이 물리적 한계에 도달하였다[1, 2].

커패시터의 면적을 늘리는 방법으로는 DRAM 소자 구조를 형성하는 transistor와 커패시터를 3차원 공간상에 배치하면 평면구조에 비해 소자의 면적과 간격을 넓게 확보할 수 있다. 그러므로 DRAM에서는 커패시터 구조가 trench 혹은 stacked 형태로 설계되는 추세에 있으며, 예전의 구조보다 더 복잡한 형태가 되어가고 있다. 그러나 새로운 구조를 갖는

cell의 생산은 실제 양산에서 엄청난 제조 시설의 투자와 함께 재현성, 신뢰성, 제조 단가 등의 상당히 복잡한 문제가 많이 산재해 있다. 또 하나의 방법으로는 고유전율 유전체 박막을 사용하는 것을 의미하며 소자 구조 및 공정을 최대한 단순화시키면서 성능을 증대시킬 수 있어 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히 최근에 논의되고 있는 Ta₂O₅(tantalum pentoxide)는 충분한 정전용량, 적은 누설전류, 높은 절연과 파괴 강도, 에러 및 오동작이 감소하는 유전체 물질로 알려져 고도의 소형화 집적화 필요에 따른 유전체 박막재료로서 관심이 모아지고 있다[3, 4].

Ta₂O₅ 유전체 박막을 제조하는 방법으로는 탄탈늄(tantalum)을 evaporation 혹은 스퍼터링(sputtering)으로 증착한 다음 열산화 시키는 방법[5], Ar, O₂의 분위기에서 반응성 스퍼터링으로 증착하는 방법[6], 그리고 화학적으로 기상 증착하는 방법[7] 등이 알려져 있다. 위와 같은 방법으로 제조된 Ta₂O₅ 유전체 박막의 물성은 그 제조 방법에 따라 다소 차이가 있는 것으로 보고되고 있는데 이런 차이는 커패시터를 구성하는 유전체 물질의 조성 및 격자구조, 전극의 재질과 계면 상태에 따라 영향을 받는 것으로 알려져 있으며, 그중에서도 박막의 제조 방법, 공정개선, 어닐링 분위기의 연구가 활발히 진행되고 있다. M. Matsui는 음극산화법으로 제조한 Ta₂O₅

* 正 會 員 : 韓國電氣研究院 電磁氣素子그룹 先任研究員
 ** 正 會 員 : 韓國電氣研究院 電磁氣素子그룹 責任研究員
 *** 正 會 員 : 釜山大 工大 電子電氣通信工學部 教授
 接受日字 : 2001년 10월 23일
 最終完了 : 2002년 3월 21일

를 산소 분위기에서 UV광에 의하여 어닐링함으로써 격자내의 산소 결핍을 보충하고 결정화도 높임으로써 분극율을 증가시키고 박막의 결함(defect)을 감소시켜, 유전 특성을 향상시켰다고 보고하고 있다[8].

본 연구에서는 RF 스퍼터링 방법으로 탄탈륨을 산소 반응성 가스와 함께 박막 형태로 산화물 유전체 증착시킨 후 결정화 온도 영역으로 알려진 600, 650, 700°C의 진공 분위기에서 어닐링(annealing) 함으로 Ta-O dangle bond와 비정질상의 Ta_xO_x가 감소하고 결정화에 근접한 분자 구조의 Ta₂O₅ 유전체 박막을 제조하여 이들의 물성 변화가 미치는 전기적 특성을 조사하고자 하였다. 어닐링에 따른 미세구조를 관찰하였으며, Ta₂O₅ 유전체 박막은 MIM 커패시터 형태로 제조하여 정전용량과 누설전류 밀도를 상온~200°C 범위에서 측정함으로써 Ta₂O₅ 유전체를 진공에서 어닐링할 경우 결정화가 유전체에 미치는 전기적 특성과 열 안정성에 관하여 고찰하였다.

2. 실험 방법

Ta₂O₅ 커패시터용 유전체 박막의 제조는 직경 4"의 탄탈륨(순도 99.99%) 타겟을 RF 마그네트론 산소 반응성 스퍼터링 방법으로 증착하였다. 기판은 p-type(100) Si 웨이퍼를 21×21mm로 절단한 후 아세톤과 메탄올을 초음파로 오염물질을 세척하였으며, 표면의 자연 산화층은 10%의 HF(hydrofluoric acid)용액으로 제거하였다. 스퍼터링 전 반응기의 초기 진공도는 1.0×10⁻⁶ torr 이하이며, 증착시 기판 온도는 자연 상태를 유지하였다. 증착중의 반응기내 진공도는 5×10⁻³ torr로 일정하게 유지하였고 방전전력은 모두 200 W로 고정시켰으며, 반응성 가스의 비율은 Ar, O₂ 각각 80:20%로 14.5 sccm으로 하였다. 그림 1은 박막 제조 및 실험의 전체적인

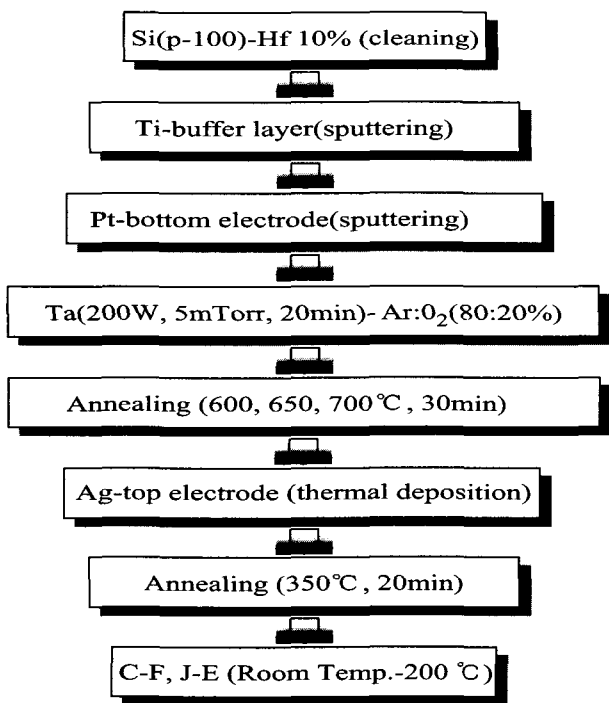


그림 1 박막 제조 공정
Fig. 1 Fabrication process of thin films

공정을 나타낸 것이다.

Ta₂O₅ 유전체 박막을 어닐링에 따른 특성 변화를 고찰하기 위하여 10°C/min의 승온 속도로 600, 650, 750°C의 진공 분위기에서 30분 동안 유지하였고, 어닐링 전·후 Ta₂O₅ 박막의 결정학적 분석은 X-선 회절분석기를 이용하여 2θ 20~60° 까지 분석하였으며, 표면과 단면의 형상은 AFM(atomic force microscopy)과 FE(field emission) SEM을 사용하여 관찰하였다. 이렇게 여러 가지 조건에서 증착된 Ta₂O₅ 박막의 유전 특성을 측정하기 위하여 MIM 구조의 커패시터를 실리콘웨이퍼 위에 증착하였다. 하부전극은 실리콘웨이퍼와의 접착력 향상과 확산층 방지를 위하여 티타늄(titanium)으로 500Å의 buffer layer를 만든 다음 물리적, 화학적으로 안정하고 금속간 계면 전위차가 "0"(zero)로 알려진 백금(platinum) 전극을 3000Å 두께로 스퍼터링하였으며, 상부전극은 직경 5mm 원형 마스크를 이용하여 은(silver)를 열증착(thermal evaporation)하였다. 그림 2에 MIM 커패시터 시료의 형태를 나타내었다.

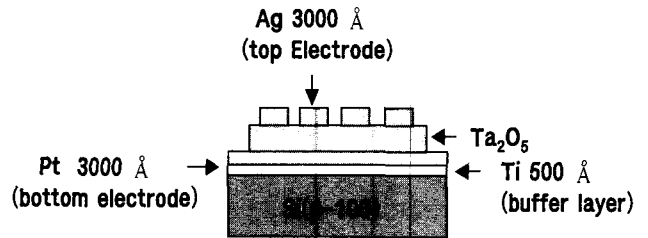


그림 2 MIM 커패시터
Fig. 2 MIM capacitor

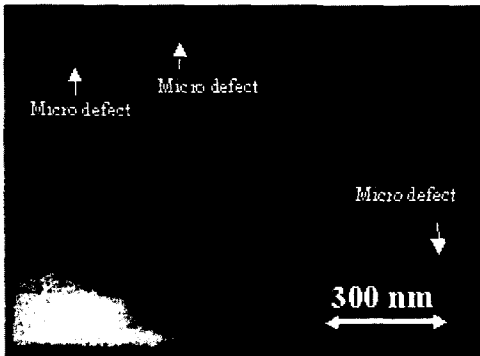
MIM 커패시터 Ta₂O₅ 유전체의 열 안정성을 조사하기 위하여 가변 온도챔버 내부에 시료를 설치한 후 상온에서 200°C까지 온도를 가변하면서 J-E, C-F를 측정하여 1 kHz 부근에서 TCC와 비유전율을 구하였으며, Ta₂O₅ 유전체 박막의 어닐링에 의한 결정화와 전기적 특성의 관계에 대하여 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

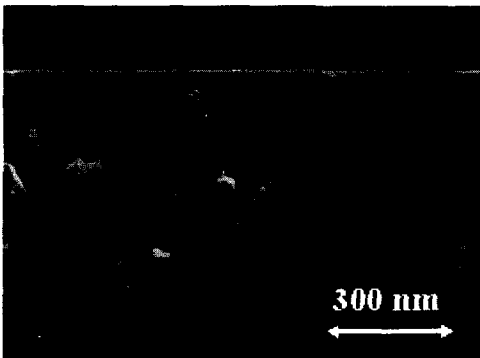
Ta₂O₅ 유전체 시료 제조 조건을 선정하기 위하여 방전 전력과 산소 분압비를 고정하고 p-type(100) Si 웨이퍼 위에 박막을 성장 시켰으며, 결과를 그림 3에 FE-SEM 이미지로 나타내었다. 두께는 3200Å 이었으며, α-step으로 측정된 값과 일치하였다.

Ta₂O₅ 박막의 결정화 양상을 알아보기 위하여 진공 분위기의 600, 650, 700°C에서 30분간 어닐링하여 분석한 XRD 회절패턴을 그림 4에 나타내었다. As-deposited Ta₂O₅와 600°C에서 어닐링한 박막은 비정질상이었으며 650, 700°C 어닐링에서는 (200), (330) 피크가 나타났다. 결정구조가 hexagonal 구조를 갖기 때문에 CVD, PVD 방법으로 제조된 Ta₂O₅는 650~700°C에서 결정화가 일어나는 이론과 부합됨을 알 수 있었다[9, 10]. β-Ta₂O₅는 as-deposited Ta₂O₅ 박막에서 비정질 피크만 보이다가 650°C 어닐링부터 (200) 우선 배향성(preferred orientation)이 강하게 나타났다. 반면에 (002) 피크는

결정화가 진행되어도 미약한 피크로 남아 있었으며 이것은 스퍼터링 방법으로 제조되어 oxygen network 상의 격자 내에 bond의 산소결핍으로 존재하는 Ta₂O₅ 박막의 비정질상이 어닐링에 의해 β-Ta₂O₅ 상으로 결정화되면서 나타나는 피크로 생각되며, 주 회절선인 (110) 회절면 2θ의 변화는 거의 없었다.



(a) Ta₂O₅ 박막의 표면



(b) Ta₂O₅ 박막의 단면

그림 3 Ta₂O₅ 박막의 FE SEM
Fig. 3 FE SEM image of Ta₂O₅ thin films

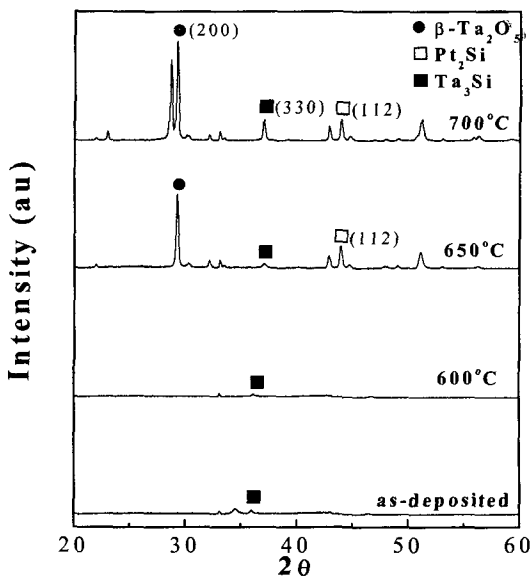


그림 4 Ta₂O₅ 박막의 XRD 회절패턴
Fig. 4 XRD patterns of Ta₂O₅ thin films

(at vacuum 600, 650, 700°C and as deposited)

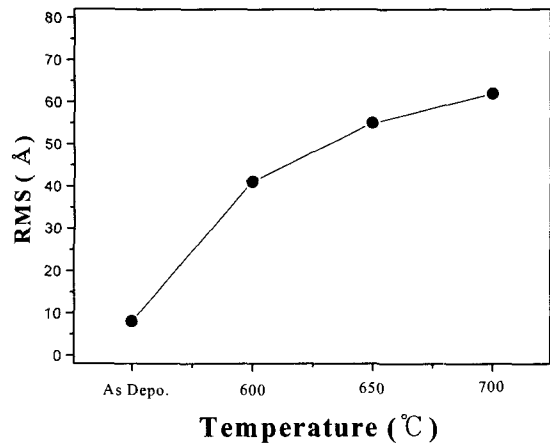


그림 5 Ta₂O₅ 박막의 표면 제곱평균 거칠기
Fig. 5 RMS of Ta₂O₅ thin films

(at 600, 650, 700°C and as deposited)

그림 6은 Ta₂O₅ 박막의 표면을 AFM 3차원 형상으로 나타낸 것이며, 그림 5는 이들 형상을 표면제곱평균거칠기 (RMS)로 표시한 것이다. 어닐링 온도가 증가할수록 거칠기는 비례하여 증가하였으며, 특히 As-deposited 상태에서 600°C로 어닐링할 때 거칠기는 급격히 증가하였다. 표면은 전체적으로 침상구조를 갖고 성장하였으며 as-deposited Ta₂O₅가 고온의 어닐링에 노출되면서 Ta-O dangle-bond와 같은 비정질 형태의 구조가 stoichiometry에 가까운 β-Ta₂O₅ 상의 침상 결정 구조로 성장하는 것으로 사료된다. 이런 침상 결정 구조는 뒤에 서술될 J-E 특성에서 어닐링에 의한 박막의 결정화는 내부적으로는 치밀화되어 누설전류를 줄이는 효과가 있지만 결정립이 성장하는 표면의 특성상 표면 저항이 떨어지는 서로 밀접한 관계가 있는 것으로 잘 알려져 있다.

수동소자로 사용되는 커패시터는 외부 사용환경 변화에 대한 오동작 및 에러를 줄이기 위하여 상온에서 200°C까지의

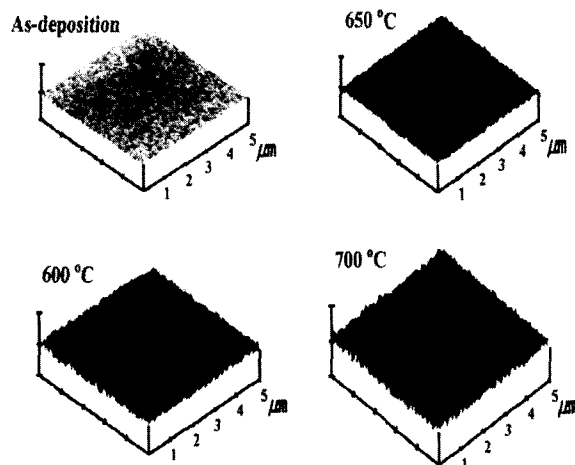


그림 6 Ta₂O₅ 박막의 AFM 3차원 형상

Fig. 6 AFM image of Ta₂O₅ thin films
(at 600, 650, 700°C and as deposited)

안정된 온도 의존성을 요구하고 있으며, 아래에 나타낸 TCC(temperature coefficient of capacitance) 식으로써 커패시터의 온도 계수를 표시할 수 있다. 여기서 ∂T 는 온도 변화를 ∂C 는 정전용량의 변화를 나타낸다.

$$TCC = \frac{1}{C} \frac{\partial C}{\partial T} (\text{ppm}/^\circ\text{C})$$

$$TCC = \frac{1}{C_1} \left(\frac{C_2 - C_1}{T_2 - T_1} \right) \times 10^6 (\text{ppm}/^\circ\text{C})$$

Ta₂O₅ 유전체 박막은 두께 3800Å으로 하부기판 Pt/Ti/p-Si 위에 제조한 후 결정화 온도 범위로 알려진 600, 650, 750°C의 진공분위기에서 30분간 어닐링하여 상부 전극으로 은을 열증착하고 정전용량-주파수 특성을 측정된 결과 그림 7과 같았으며, 그림 8의 (a)는 TCC를 (b)는 비유전율과 온도의존성의 관계를 나타내었다.

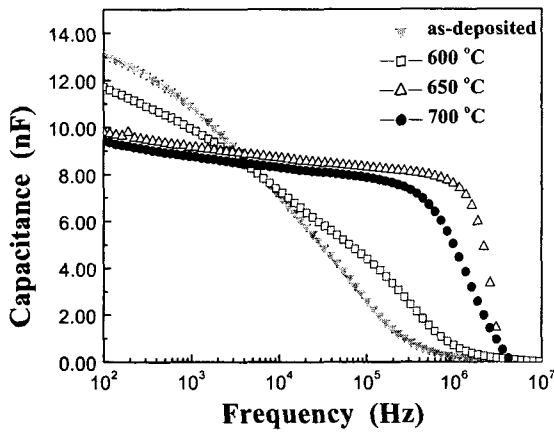
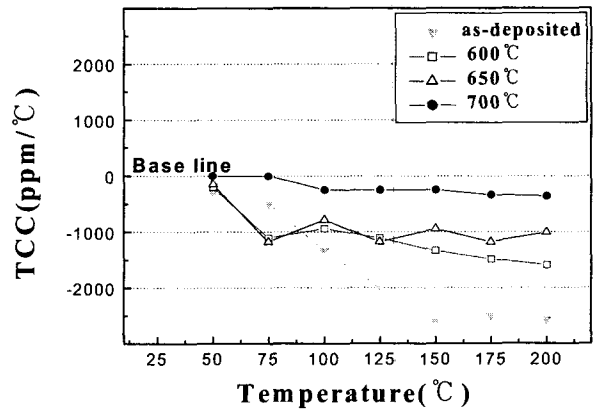


그림 7 Ta₂O₅ 박막의 정전용량-주파수 특성
Fig. 7 Capacitance-Frequency of the Ta₂O₅ thin films.(room Temperature)

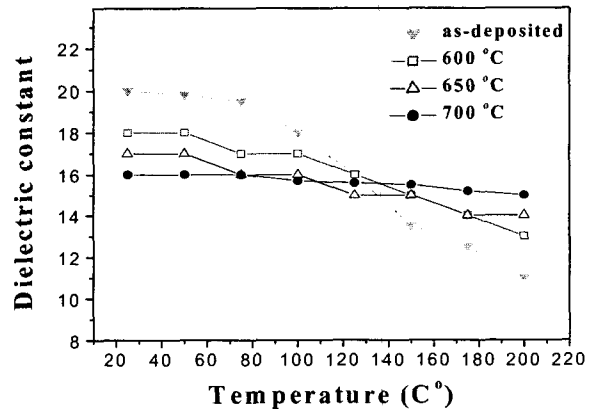
Ta₂O₅의 결정화 거동으로는 600°C 이후에서 결정 핵이 생성되어 650°C 부근에서 결정화되면서 물성이 바뀌는 것으로 알려져 있으며[9, 10], 그림 7의 as-deposited Ta₂O₅와 600°C에서 열처리한 Ta₂O₅ 유전체 박막은 주파수가 증가할수록 정전용량이 급격히 감소하였고 650°C와 700°C에서 어닐링한 경우는 주파수가 증가하여도 정전용량 값의 변화는 크지 않음을 알 수 있었다. 이것은 앞부분의 XRD 분석에서 나타난 결과에 비추어 고찰해 보면 어닐링에 의한 결정화 영향으로 사료되며 결정화가 진행됨에 따라 정전용량의 주파수 의존성이 감소하는 것으로 알려진 결과와도 일치한다[11, 12].

진공 분위기 어닐링은 산소의 공급이 없으므로 박막내의 탄탈륨과 산소의 조성은 변하지 않지만 전기적 특성에 영향을 미치는 short range order의 Ta-O bond가 탄탈륨 박막의 비정질 부분에서 증가한 것으로 생각할 수 있으며, 이로 인하여 broken bond나 non-bridging bond와 같은 결합이 감소한 것으로 보아진다. 또한 산소 분위기의 어닐링 보다 진공 분위기의 어닐링은 박막내에 산소성분 부족으로 grain boundary의 결합이 많이 관찰되는 것으로 보고되고 있다. 그림 8의 (a)와 같이 TCC는 음(-)의 온도 계수를 나타내었으며, 어닐링에 의해서 다소 base line(zero)에 근접하는 TCC

특성을 나타내는 것으로 조사되었다. 비유전율의 온도 의존성에서는 as-deposited Ta₂O₅는 상온에서 $\epsilon_r=19\sim 20$ 정도이고 600, 650, 700°C의 진공중에서 어닐링한 경우는 $\epsilon_r=16\sim 18$ 로 다소 감소하였다. Gerard Barbottin는 Ta₂O₅의 진공중 어닐링은 산소 분위기의 어닐링보다 비유전율이 감소하고 누설전류가 증가한다는 경향에 의한 것으로 사료된다[13]. 또한 결정화 온도 이상의 고온 어닐링에서는 이런 현상이 더욱 뚜렷이 나타나 전극과 유전체 사이에 중간 계면층이 생성되어 유전율이 감소한다는 이론이 소개되고 있으며, 이후 800, 900°C에서의 어닐링에 대한 유전율 증가와 감소에 대하여 많은 연구가 진행중에 있다[14, 15].



(a) TCC



(b) Dielectric constant

그림 8 Ta₂O₅ 박막의 온도에 따른 유전 특성

Fig. 8 Dielectric properties as a function of temperature for the Ta₂O₅ thin films.

Stoichiometry Ta₂O₅의 비유전율은 20~23 정도로 알려져 있지만 본 연구에서는 16~20 정도로 다소 낮게 나타났다. 그림 3(a)에서 볼 수 있는 grain boundary와 micro defects에 의한 것으로 생각되어지며, 이것은 Shinikie의 실험에 의하면 두께 350Å 이상의 Ta₂O₅에서는 crack과 같은 micro defects가 발견되었고, X-ray 분석 결과 Ta₂O₅의 박막두께가 두꺼울수록 grain size가 크며 grain growth가 빨리 일어나게 되어 큰 grain boundary grooving를 갖게 되므로 전기적인 물성에 영향을 주는 것으로 보고되고 있다[16].

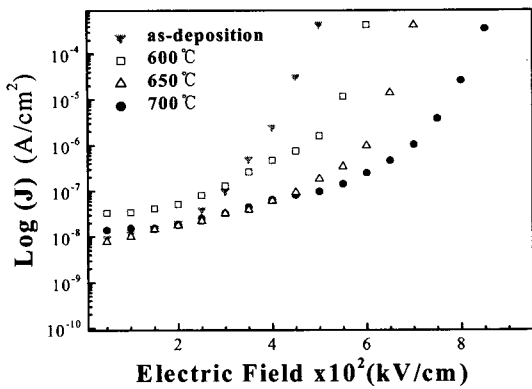


그림 9 Ta₂O₅ 박막의 전계강도에 따른 누설전류 밀도
 Fig. 9 Leakage current density as a function of electric Field for the Ta₂O₅ thin films

그림 9는 진공중 분위기 600, 650, 700°C에서 어닐링하여 전계강도 변화에 따른 누설전류 밀도를 측정한 결과이며, 그림 10은 온도 변화에 따른 누설전류밀도를 나타낸 결과이다. 어닐링한 Ta₂O₅ 박막은 3.5×10²(kV/cm) 이하의 전계강도 영역에서 비교적 안정한 누설전류 특성을 나타내었으나 as-deposited 박막은 3.5×10²(kV/cm) 이후 고전계 영역으로 갈수록 급격히 증가하였다. 어닐링한 Ta₂O₅ 박막은 as-deposited 박막 보다 누설전류가 다소 감소한 경향을 나타내었으며, 어닐링 온도가 증가함에 따라 누설전류는 다소 적게 흐르는 경향성을 보였다. 이것은 앞의 AFM, XRD 분석 고찰에서와 같이 박막의 결정화는 내부적으로 박막을 치밀화 시켜 누설전류를 줄이는 효과가 있고 아울러 열적으로도 안정한 것으로 사료되며, as-deposited 박막은 비정질상 short range order의 Ta-O bond가 Ta 박막 내부에 존재하여 결함으로 작용하고 누설전류밀도가 어닐링한 박막 보다 증가한 것으로 사료된다[13].

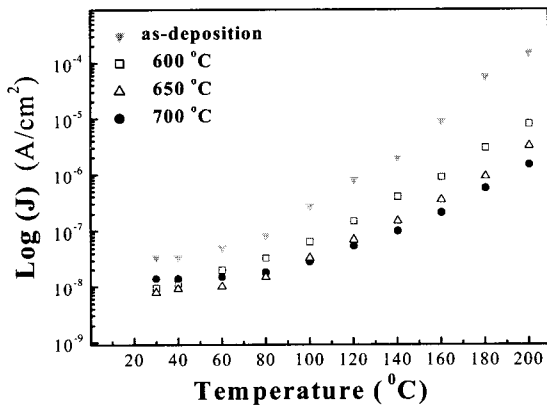


그림 10 Ta₂O₅ 박막의 누설전류 밀도와 온도 의존성
 Fig. 10 Leakage current density as a function of temperature for the Ta₂O₅ thin films

또한 비교적 재현성이 떨어지는 스퍼터 방법으로 제조할 경우 Ta₂O₅ 박막 내부에서 산소성분 부족에 따른 grain boundary의 결함에 의한 것으로도 보고되고 있으며, 특히 수백 Å 이상의 Ta₂O₅ 박막을 고온에서 어닐링할 경우 성장된 침상구조의 결정립 경계면에 micro defect가 존재하여 누설전류가 흐르게 되어 오히려 as-deposited 박막 보다 절연 특성이 떨어진다는

연구도 발표되었다[16]. 진공중 어닐링에 의한 누설전류의 감소는 hooping 전도기구를 따르며, Ta-O dangle-bond와 같은 분자구조 결합이 감소함에 따라 carrier density의 감소로 나타나는 현상으로 보아진다[7]. Shinikie에 의하면 미소결합 이론도 누설전류 특성을 고찰하는 방법으로 제시되기도 하며[16], S. Banerjee 등은 반응성 스퍼터링으로 형성한 Ta₂O₅의 누설전류 및 전도기구는 측정 전계와 온도에 따라 변하며, 어닐링 온도가 증가함에 따라 Ta₂O₅의 전도 메카니즘도 Schottky 방출과 Poole-Frenkel 전도 기구가 변한다고 보고하고 있어서 이에 대해선 더욱 많은 연구가 필요할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 전자기 수동소자에 사용하는 커패시터용 Ta₂O₅(tantalum pentoxide) 유전체를 RF 스퍼터링 방법으로 p-type(100) Si 위에 제조하여 어닐링한 후 물성 분석과 온도 의존에 따른 전기적 물성을 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. p-type(100) Si 위에 RF 스퍼터링 방법으로 제조한 Ta₂O₅는 비정질상이었으나 650°C에서 어닐링 함으로 결정화되기 시작하였으며, (200) β-Ta₂O₅의 우선 배향(preferred orientation)성이 강하게 나타났다.
2. AFM 분석 결과 제곱평균 거칠기(RMS)는 10~60 Å이었으며, 어닐링 온도가 증가할수록 거칠기는 비례하여 증가하였고 표면 형상은 침상구조를 갖고 성장하였다.
3. 어닐링하여 결정화된 β-Ta₂O₅ 박막은 as-deposited 박막 보다 온도 의존성과 정전용량 주파수 의존성이 작아지면서 비교적 안정한 유전 특성을 나타내는 것으로 조사되었다.
4. As-deposited 박막의 누설전류 밀도는 고전계 영역으로 갈수록 급격히 증가하였으나 어닐링하여 결정화된 이후는 다소 감소하는 경향을 나타내었으며, 결정화의 영향은 전기적, 열적 안정성을 향상시키는 것으로 조사되었다.

참 고 문 헌

- [1] H. S. Yang, Y. S. Choi and S. M. Cho, "Preparation and Properties of Ta₂O₅ Film Capacitors Using TiSi₂ Bottom Electrode" Journal of Electronic Materials, Vol. 28, no 12, 1999.
- [2] M. Kee, U. Mackens, R. Kiewitt, G. Greuel and C. Metzmacher, Ferroelectrical "Thin Films for Integrated Passive Component", Phillips Journal of Research Vol. 51 no. 3, 1998.
- [3] V. Mikhelashvili, G. Eisenstein, "Charactrisistics of MIS Capacitors based on Multilayer TiO₂/Ta₂O₅ structures", Microelectronics Reliability Vol. 40, pp.657-668, 2000.
- [4] S. Zaima, T. Furuka, Y. Yasuda and M. Iida, "Preparation and Properties of Ta₂O₅ films by LPCVD for ULSI Application", J. Electrochem. Soc. Vol. 137, pp.1297-1309, 1990.
- [5] E. Atanassova, D. Spassov, "Electrical properties of thin Ta₂O₅ films obtained by thermal oxidation of Ta on Si", Microelectronics Reliability Vol. 38, pp.827-832, 1998.

[6] Susumu Shibata, "Dielectric constant of Ta₂O₅ thin film deposited by RF sputtering", Elsevier Thin Solid Films, Vol. 277, pp.1-4, 1996.

[7] S. Zaima, T. Furuta, Y. Yasuda and M. Iidda, "Conduction Mechanism of Leakage Current in Ta₂O₅ films on Si Prepared by LPCVD", J. Electrochem. Soc., Vol. 137, no. 9, pp.2876, 1990.

[8] R. M. Fleming, D. V. Lang C. D. W. Jones, "Defect domonate charge transport in amorphous Ta₂O₅ thin films" J. of Appl. Phys., Vol. 88, no. 2, pp.850-862, 2000

[9] Shin-Ichiro Kimura, Yasuhiro Nishioka, Akira Shintani and Kiichiro Mukai, "Leakage-current increase in amorphous Ta₂O₃ films due to pin-hole growth during annealing below 600°C", J. Electrochem. Soc. Vol. 130, no. 129, pp.2414, 1983.

[10] Nishioka Y., Kimura, S. Shinriki, "Dielectric Characteristics of Double layer Structure of Extremely Thin Ta₂O₅/SiO₂ Films on Si", J. of Electrochem. Soc., Vol. 34, pp.410-422, 1987.

[11] A. G. revesz, J. H. Reynolds, and J. F. Allison, "Optical Properties of Tantalum Oxide Films on Silicon", J. Electrochem. Soc., Vol. 123. no. 6, pp.889-894, 1976.

[12] Lewis E. Hollander, and Patricia L. Castro, "Dielectric Properties of Single-Crystal Nonstoichiometric Rutile (TiO₂)", J. Appl. Phys., Vol. 33, no. 12, pp.3421-4326, 1962.

[13] Gerard Barbottin, abd Andre Vapaille, "Instabilities in Silicon Devices", Elsevier press, 1986.

[14] S. Ezhilvalavan, Tseung-Yuen Tseng, "Thin Solid Films", 360, Elsevier press, 2000.

[15] Koichi Kishiro, Nobuhiko Inoue, Shih-Chang Chen and Masaki Yoshimaru, "Structure and Electrical properties of Thin Ta₂O₅ deposited on metal electrodes", J, Appl. Phys. Vol. 37, 1998.

[16] H. Shinriki, M. Nakata, A. Nakao and S. Tachi, Extended Abstract of the 1991 International Conf. on Solid State Devices and Materials, pp.198-204, 1991



이 동 윤 (李 東 胤)
 1961년 3월 6일생
 1983년 부산대 재료공학과
 1985년 부산대 대학원 금속광학(석사)
 1999년 러시아 결정학연구소(박사)
 현재 한국전기연구원 선임연구원
 Tel : 055-280-1635
 Fax : 055-280-1590
 E-mail : dylee@keri.re.kr



송 재 성 (宋 在 成)
 1956년 8월 31일생
 1980년 서울대 금속공학과
 1982년 KAIST 전자재료(석사)
 1991년 KAIST 전자재료(박사)
 현재 한국전기연구원 책임연구원
 Tel : 055-280-1640
 Fax : 055-280-1590
 E-mail : jssong@keri.re.kr



윤 문 수 (尹 文 洙)
 1950년 6월 24일
 1973년 경북대 물리학과
 1975년 경북대 물리학(석사)
 1985년 일본 오사카대 전기공학(박사)
 현재 한국전기연구원 전문위원
 Tel : 055-280-1015
 Fax : 055-280-1590
 E-mail : msyun@keri.re.kr



박 정 후 (朴 正 后)
 1945년 4월 8일생
 1968년 부산대 전기공학과
 1970년 부산대 대학원 전기공학(석사)
 1980~1984년 일본 구주대(박사)
 현재 부산대 공대 전기전자통신공학부 교수
 Tel : 051-510-2369
 Fax : 051-513-0212
 E-mail : parkch@hyowon.cc.pusan.ac.kr

저 자 소 개



김 인 성 (金 寅 性)
 1964년 10월 5일생
 1987년 한남대 물리학과
 1991년 경남대 대학원 전기공학(석사)
 현재 한국전기연구원 선임연구원
 Tel : 055-280-1675
 Fax : 055-280-1590
 E-mail : kimis@keri.re.kr