

Sol-Gel법에 의한 Ta_2O_5 박막의 전기전도와 광학적 특성

The Electrical Conduction and Optical Properties of Ta_2O_5 Thin Films by Sol-Gel Method

유 영 각

(Young-kag Yoo)

Abstract

The Electrical conduction and optical properties of Ta_2O_5 thin films as the insulators in DRAM capacitors were studied. Liquid Ta_2O_5 were prepared by a sol-gel processing and multiple layers were applied by spin-coating up to thickness of 800Å. At annealing temperature of 300~600°C, the electrical conduction and specific dielectric constant were discussed, the behavior of carrier were observed by the Thermally Stimulated Current(TSC) at the temperature range of 30~230°C.

At annealing temperature of 300~600°C, the samples were found to be amorphous below 600°C and crystalline over it. The electrical strength was about 2.2 MV/cm at 400°C. In spite of noncrystallization over 500°C, the increasing of leakage current due to pinholes and increasing creak. The refractive index was obtained maximum(2.2) at 400°C. The dielectric constant was obtained maximum(18.6) at 400°C.

TSC was observed one peak at the temperature range of 30~230°C from sample at 400°C. In the case of collecting voltage, the peak size is decreased in proportion to collecting voltage, and then the peak may be thought carrier to be a ionic space charge.

Key words : Ta_2O_5 , TSC(열자력전류), noncrystallization(비정질) Orthorhobmic(사방정계)

1. 서 론

유전박막은 현재 박막콘덴서, 고집적회로(LSI) 및 루미네센스와 같은 전자소자에 다양하게 사용되고 있다¹⁾. 성능이 우수하고 초집적화 할 수 있는 전자

소자는 고유전율과 절연파괴 특성이 우수한 박막이어야 한다. 최근 MOS DRAM의 집적도의 증가에 따라 DRAM을 구성하고 있는 capacitor의 면적 감소가 요구되고 있으나, 패키징 재료에 존재하는 α 입자의 방사성물질에 의해서 IC chip 내에 electron-hole쌍을 생성시킴으로써 기억소자내 capacitor에 저장된 정보를 변하게 하는 softerror를 유발시킨다. Softerror를 방지하고 기존의 DRAM구조에서 안정된 동작을 유지하기 위해서는 최소한 단위 cell당 충전 용량이 30fF 이상이 필요한 것으로 알려져 있다.

* 충청대학 전자공학과

(충북 청원군 강내면 월곡리 충청대학,

Fax : 0431-230-2279

E-mail : yyk13@chch.ac.kr)

1999년 9월 10일접수, 2000년 6월 5일 심사완료

DRAM capacitor의 유전박막으로 사용되기 위해서는 우선 소자 구동에 필요한 충분한 유전량을 가져야하고, 소자의 구동 전압 하에서 누설 전류(leakage current)가 적으며, 높은 절연 파괴 전계(breakdown field)를 가져야 한다. 따라서 SiO₂ 또는 Si₃N₄를 대체할 유전체로 Ta₂O₅에 대한 연구가 진행되고 있다.

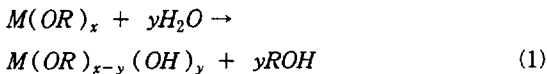
근래 hybrid IC, MIS용 절연막 및 optical wave guide²⁾로 사용하기 위하여 유전특성이 silicon 야 oxide보다 우수한 Ta₂O₅ 박막³⁾⁻⁸⁾의 연구가 활발히 진행되고 있다. 즉 Ta₂O₅의 비유전율은 SiO₂와 비교하여 6배정도 커서 유전체의 두께 감소 없이 capacitance density를 증가시킬 수 있기 때문에 16Mbit DRAM의 storage capacitor로써 사용이 가능하다고 보고된 바 있다⁹⁾.

sol-gel법은 유기 금속을 출발 원료로 제조된 용액으로부터 코팅-건조-축합(gel화)-열처리의 과정을 통해 고상의 무기 재료를 제작하는 방법으로 상온에서 액상으로 시료를 다루기 때문에 공정이 간편하고 성분비를 정확하게 조절할 수 있다는 장점을 가지고 있기 때문에¹⁰⁾ 최근, 산화물계 초전도 박막이나, 강유전성 박막, 압전 박막 등의 제작에 폭넓게 이용되고 있다¹¹⁾⁻¹³⁾.

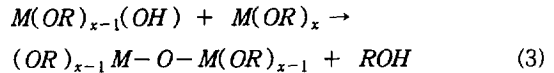
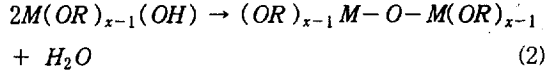
본 논문에서는 sol-gel법을 이용하여 시편을 제작하여 열처리 온도변화에 따른 전기 전도 및 유전율, 굴절률, 열자격전류(Thermally Stimulated Current, TSC) 스펙트라를 측정하여 시료내의 캐리어의 거동을 연구 검토하였다.

II. 실험 방법

sol-gel 공정은 원료 물질로 무기물이나 유기화합물을 사용하며 유기 용매에서 가수분해(hydrolysis)와 축합(condensation)을 일으켜 M-O-M 결합의 무기 폴리머 형태를 만든다. 무기화합물에 있어 가수분해는 aquo이온 (MO_nH_{2n})^{z+}으로부터 양자(proton)를 제거하여 hydroxo 또는 oxo (M=O) ligand를 형성한다¹⁰⁾.

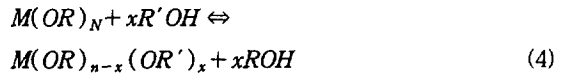


여기서 R : alcohol group

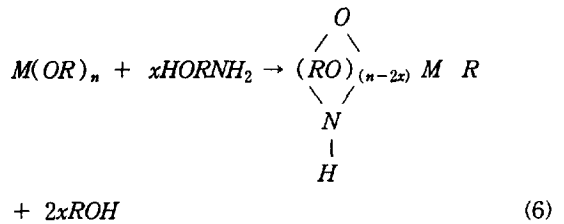
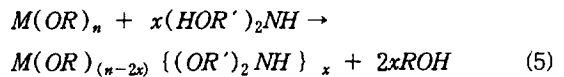


본 실험에서는 가수분해에 의한 H₂O를 제거하기 위해 비등점이 128℃인 iso-methoxy-ethanol [IME, (CH₃OCH₂CH₂OH)]을 용매로 사용하였다.

알콕사이드의 알코올 치환 반응은 다음과 같다.



코팅 용액의 개질제로 DEA를 사용하였다. DEA는 용점 28℃, 비등점 217℃, 비중 d²⁰ = 1.097인 액상의 물질이다. DEA와 금속 알콕사이드의 반응식은 다음과 같다.



최종 용액을 IME에 대한 물비를 맞추기 위해 질소 분위기로 분류하여 칭량한 결과 IME에 대한 Ta 용액의 물비는 0.1 물비였다.

Ta 용액은 건조-축합 과정을 거쳐 gel화하는데, 폴리머 gel의 형성은 코팅 용액에 H₂O를 전체 Ta에 대해 2 물비로 첨가한 후 코팅 용액으로 스펀 코팅 하였다.

하부전극은 Tantalum 기판(Aldrich Chemical, 99.9% 0.5mm)을 Polishing 한 후 기판으로 사용하였다.

본 실험에서는 TGA analyzer를 사용하여 코팅 용액의 열 중량 변화를 이용하여 잔류유기물을 조사하였다. 열 중량 분석 결과를 바탕으로 열처리 조건을 선정하였다. 열처리 조건은 sol-gel법으로 제작된 Ta₂O₅를 예비 열처리 온도인 300℃와 본 열처리 온도인 400 ~ 700℃을 질소 분위기에서 30분간 열처리하였다.

Ta_2O_5 막의 두께를 두껍게 하고 막의 치밀성을 보다 좋게 하기 위해 코팅-건조-열처리 과정을 각 기판에 대해 4회 반복하였다. 열처리가 끝난 Ta_2O_5 박막의 표면 위에 전기적 특성을 측정하기 위해 알루미늄 전극을 직경 1.0mm ϕ 의 dot patterning한 마스크를 사용하여 증착하였다.

전압-전류 특성 측정은 Source Measure Unit (Keithley 236)을 사용하여 $10^{-12} \sim 10^{-5}A$ 의 전류 범위에서 전압-전류 특성과 온도의존성을 측정하였다.

열처리 온도에 따른 정전용량을 측정하기 위하여 LF Impedance Analyzer (HP 4192A)를 사용하여 정전용량 및 손실계수를 측정하였다.

TSC 측정은 열처리 온도 400 $^{\circ}C$ 인 시료에서 행하였다. TSC 측정은 Thermocontroller 와 Electrometer (Keithley 617), X-Y 기록계 (Graphtec, MC1000) 및 직류전원공급장치 (Keithley 236)로 구성하였다.

III. 실험결과 및 고찰

본 실험에서 Ta_2O_5 의 박막의 건조 조건 및 열처리 조건을 선정하기 위하여 코팅용액의 온도 변화에 따른 중량 변화를 분석한 것이 그림 1이다. TGA 곡선 4부분에서 중량감소가 일어나고 있는데 50~80 $^{\circ}C$ 사이에서 급격한 중량변화가 나타나며, 이는 알코올 성분의 휘발에 의한 것으로 100~150 $^{\circ}C$ 부근에서는 용매제인 IME(비등점 128 $^{\circ}C$)에 의해, 150~350 $^{\circ}C$ 부근에서는 안정화제인 DEA의 분해, 330~350 $^{\circ}C$ 부근에서는 잔류 유기물의 분해로 생각된다.

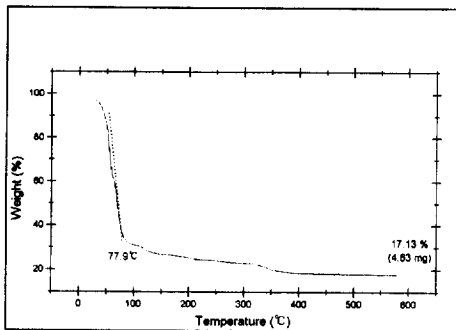


그림 1. Ta 용액의 열 중량 분석
Fig. 1. TGA analysis of Ta solution

그림 2는 500, 600, 및 700 $^{\circ}C$ 온도로 열처리하여 관측한 XRD 스펙트럼인데 이들 스펙트럼으로부터 시편의 열처리 온도를 결정할 수 있다. 500 $^{\circ}C$ 에서 열처리된 Ta_2O_5 박막은 비정질이며 600 $^{\circ}C$ 이상의 온도에서 열처리한 시편은 결정 피크가 나타나기 시작하여 700 $^{\circ}C$ 에서 분명한 결정 피크가 나타나고 있음을 볼 수 있는데, 700 $^{\circ}C$ 피이크에서 격자상수가 (001), (1110), (200), (1111), (002), (0220), (2151)인 피이크는 Orthorhombic의 전형적인 형태로써, 본 실험에서 제조하여 사용한 용액이 결정화가 잘 이루어지고 있음을 보여주고 있다. 결정화 온도도 스퍼터링법이나 CVD 법에서도 대략 600 $^{\circ}C$ ~700 $^{\circ}C$ 사이에서 결정이 이루어진다고 보고되고 있는데 이 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.^{14),15)}

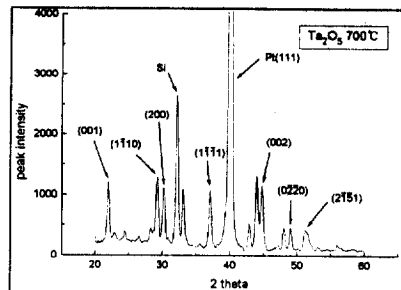
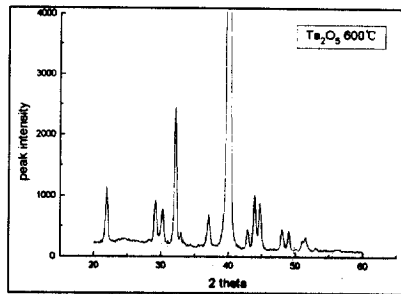
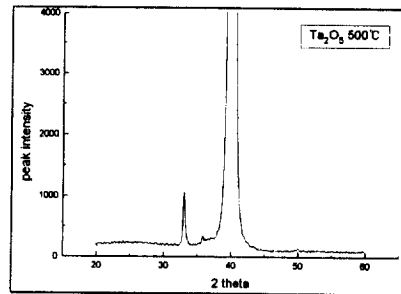


그림 2. 열처리 온도 변화에 따른 Ta_2O_5 박막의 XRD
Fig. 2. XRD spectra of Ta_2O_5 thin films annealed at various temperatures

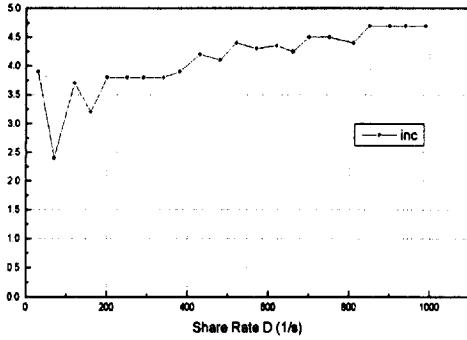


그림 3. Ta sol 용액의 점도
Fig. 3. Viscosity of Ta sol solution

그림 3은 HAAKE VT-500장치로 측정한 코팅용액의 점도곡선을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 share rate가 작을 때에는 점도의 값이 심하게 변화하고있음을 보여주고 있으나 share rate가 증가할수록 점도값이 점차 커짐을 알 수 있다. share rate가 700이상일 때 Ta 용액의 점도는 4.7 cp 정도였다.

그림 4는 Si 기판상에 Ta₂O₅ 박막을 형성하여 단면을 촬영한 SEM 으로 600℃에서 4회 반복 코팅한 것으로 Ta₂O₅ / SiO₂ / Si 로 구성하였는데 Ta₂O₅의 두께는 1회 코팅시 약 200Å 정도로 박막이 형성 되었으며, Ellipsometer (GAERTNER, L116C)로 측정한 결과와도 일치하였다.

그림 4. Ta₂O₅ 박막의 SEM (단면)
Fig. 4. SEM micrograph of Ta₂O₅ thin film

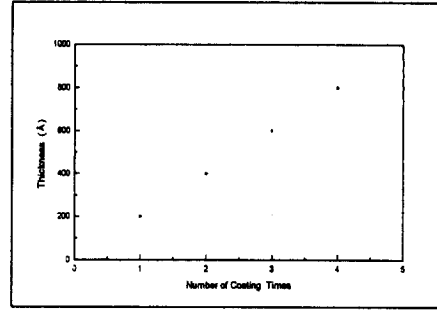


그림 5. 코팅회수에 따른 Ta₂O₅ 박막의 두께변화
Fig. 5. Thickness variation of Ta₂O₅ thin films versus coating times

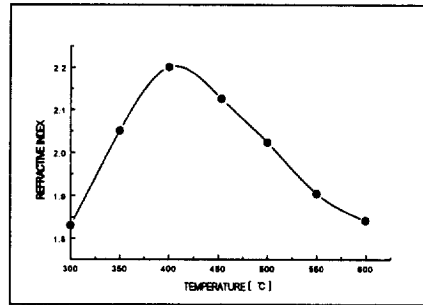


그림 6. 열처리 온도에 따른 굴절률
Fig. 6. Refractive index with annealing temperature

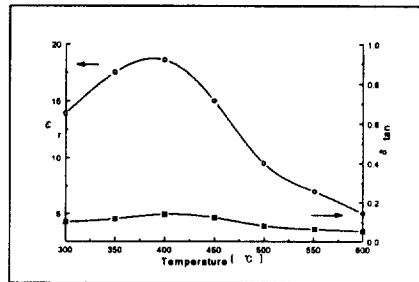


그림 7. 열처리 온도변화에 따른 비유전율
Fig. 7. Dielectric constant with annealing temperature

그림6은 열처리온도에 따른 굴절률로 400℃ 부근에서 2.20으로 최대로 나타나고 있으며 그 이상의 온도에서는 감소하고 있음을 보여주고 있다. 이는 그림7의 열처리온도에 따른 유전율의 변화와 잘 일치하고있다.

열처리온도 300℃에서 비유전율값은 약 13.9에서 400℃에서는 최대치인 18.6으로 나타나고 500℃에서는 9.5정도로 급격히 감소함을 알 수 있다. 결정화가 증가할수록 유전율도 증가하는 것이 일반적이나 본 실험에서는 500℃에서 급격히 감소 하고있는데 이는 핀홀과 크랙에 의해 감소하는 것으로 생각된다.

그림8은 상온에서 열처리온도 변화에 따른 J-V 특성인데 측정전류가 10^{-5} A일 때 절연파괴가 발생하는 것으로 가정했을 경우 300℃에서 열처리된 시편에서는 약 0.8 MV/cm이고 400℃에서는 약 2.2 MV/cm로 증가하다가 500℃에서는 약 1.5 MV/cm로 감소하고 600℃에서는 0.5 MV/cm로 급격히 감소하고 있음을 보여주고 있다. 500℃ 이상에서는 시편이 결정화가 되지 않았음에도 불구하고, 절연파괴강도가 급격하게 감소하는 것은 핀홀이 필름의 가장 취약한 부분에서 형성되어 누설전류가 흐르고, 크랙이 발생하기 시작하여 누설전류가 열처리 온도 증가에 따라 증가하기 때문인 것으로 생각된다.³⁾ 그림 8은 A, B, C 3영역으로 분리할 수 있는데 A영역은 전류와 전압이 비례하는 Ohmic영역으로 불순물 이동에 의한 것으로 생각되며, B 영역은 시료내의 전류가 헤테로로 존재하고 있을 때 주입전류와 시료내의 전류가 합해지는 경우로 열처리 온도가 400과 500℃에서 열처리된 시편에서는 V^2 에 비례하여 증가하는 Child법칙에 따르며, 300과 600℃에서는 V^3 에 비례하여 증가하는데 이는 불순물 및 핀홀에 의한 영향으로 생각되며, C 영역에서 열처리 온도가 400과 500℃에서는 V^3 에 비례하는데 이는 고전계 영역에서는 V^3 에 비례한다는 보고된 바도³⁻⁵⁾ 있으며, 300과 600℃에서는 전형적인 Child법칙에 따르다가 파괴가 일어난다.

그림 9는 열처리온도 400℃인 시료를 30, 50, 80℃로 측정온도를 변화하여 측정한 I-V곡선으로 측정온도를 상승시킬수록 누설전류가 직선적으로 증가하고 있는데, 이는 $eEa \gg kT$ 경우로 이온성 공간전하로 사료된다.

열처리 온도 400℃인 Ta_2O_5 박막을 중심으로 30~230℃ 범위에서 TSC를 측정한 결과 약 210℃ 부근에서 1개의 피이크를 얻었다.

그림 10은 형성전압 $V_b=4V$, 형성시간 $t_b=5$ 분으로 하고 승온속도 $\beta=5^\circ C/min$ 으로하여 형성온도 T_b 를 변화시키면서 측정한 TSC 곡선들이다.

TSC 피이크는 형성온도 증가에 따라 TSC 진폭이 점차 증가하여 포화하는 현상으로 보이며 피이크 온

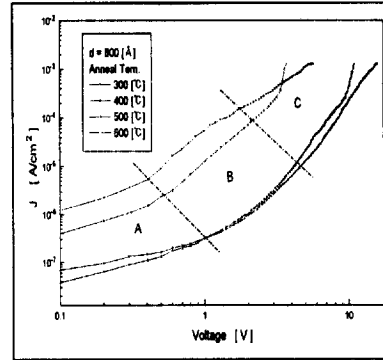


그림 8. 열처리 온도에 따른 J-V 특성
Fig. 8. J-V characteristics of Ta_2O_5 annealed at various temperatures

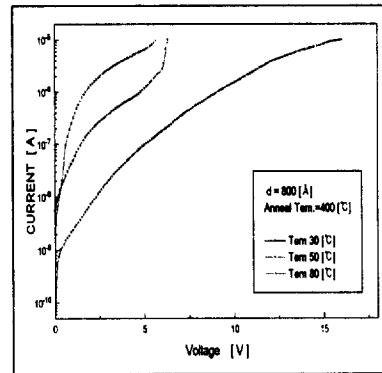


그림 9. 측정온도 변화에 따른 I-V 특성
Fig. 9. I-V characteristics of Ta_2O_5 at various measuring temperature.

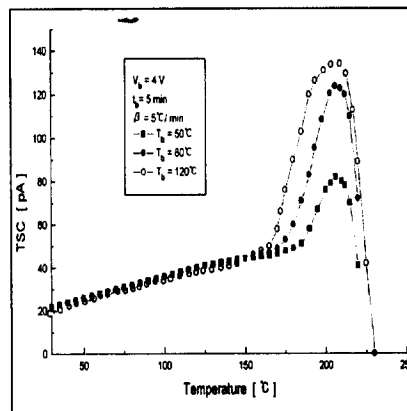


그림 10. TSC 피이크의 형성온도 의존성
Fig. 10. Forming temperature dependence of TSC peak

도 T_m 도 고온측으로 약간씩 이동하고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 보고된바에의하면 온도 변화에 따른 피크 온도가 일정할 경우 쌍극자에 의한 것으로, 고온측으로 이동할 경우 이온성 공간전하 특성으로 추정하고 있다^{16),17)}.

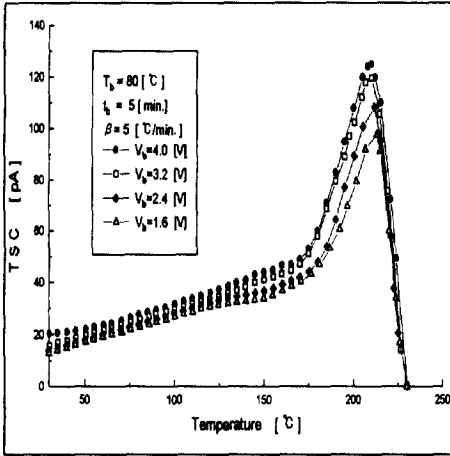


그림 11. TSC 피크의 형성전압 의존성
Fig. 11. Forming voltage dependence of TSC peak

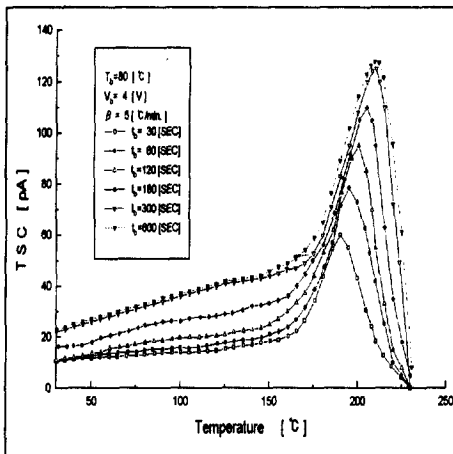


그림 12. TSC 피크의 형성시간 의존성
Fig. 12. Forming time dependence of TSC peak

그림 11은 형성온도 $T_b = 80^\circ\text{C}$, 형성시간 $t_b = 5\text{Min}$ 으로 하여 형성전압 V_b 를 변화시키면서 측정 한 TSC 증가폭이 증가하면서 포화되는 경향으로 나타나고 있다. 이 피크가 쌍극자에 의한 것이라

면 최대 전류 값은 직선적으로 비례하여야 하지만 최대 피크 온도는 일정하여야 한다. 본 연구에서 측정된 이 피크는 비직선적으로 나타나고 있으며, 피크 온도도 저온측으로 약간씩 이동하고 있음을 알 수 있다. 따라서 형성전압 의존성은 이온성 공간 전하인 것으로 생각된다.

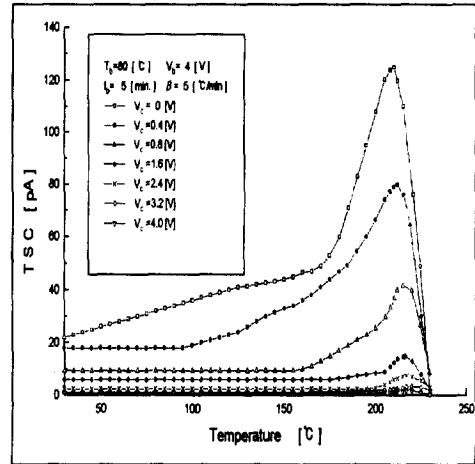


그림 13. TSC 피크의 콜렉팅 전압 의존성
Fig. 13. Collecting voltage dependence of TSC peak

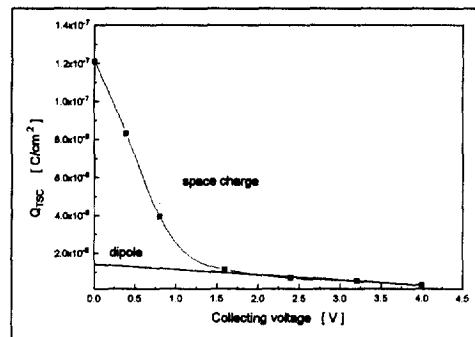


그림 14. Q_{TSC} 의 콜렉팅 전압 의존성
Fig. 14. Collecting voltage dependence of TSC peak

그림 12는 $V_b = 4\text{V}$, $T_b = 80^\circ\text{C}$ 에서 형성시간 t_b 를 변화시키면서 관측한 TSC 곡선들이다. 그림에서 보면 형성시간이 크게 됨에 따라 점차로 증가되어 가다가 포화하는 경향이 보이고 있고, 피크 온도

도 점차 고온측으로 이동해 가고 있음을 알 수 있다.

시료내의 캐리어의 거동기구를 명확히 구별해낼 수 있는 측정방법중의 하나로 콜렉팅 전압 측정법이 보고되고 있다.

그림 13은 $T_b = 80^\circ\text{C}$, $V_b = 4\text{V}$ 에서 5분 동안 분극시킨 후, 콜렉팅 전압 V_c 를 4V 까지 변화시켜 관측한 TSC 곡선들이다. V_c 가 증가함에 따라 점차 감소해 감을 알 수가 있다. 또한 피이크 온도는 콜렉팅 전압이 변화에 따라 이동되고 있다. Q_{TSC} 와 V_c 관계로 그린 것이 그림 14이다. V_c 에 따라 직선적이 아닌 오목한 특성을 갖고 있다. 이를 쌍극자 분극에 의한 V_c 특성이라면, 이미 보고된 다음 식에 일치되어야 한다.

$$Q_{TSC} \approx I(T) = N\mu^2 V_b / 3kT \cdot d(1 - V_c / V_b) \exp(-H/kT) \cdot \exp\left(-\frac{1}{\beta \tau_0} \int_{T_0}^T \exp(-H/kT') dT'\right) \quad (7)$$

즉, TSC $I(T)$ 나 Q_{TSC} 는 피이크의 콜렉팅 전압특성과 같이 V_c 에 직선 비례하여야 한다. 그러나 실험결과와는 (7)식과는 다른 것임을 알 수 있다. 한편 외부 주입전하에 의한 것이라면 $V_c/V_b = 1$ 보다 훨씬 낮은 전압에서 포화되어야 하나, 실험결과와는 다르게 나타나고 있다. 따라서 이 피이크에 기여하는 캐리어는 쌍극자 혹은 주입전하에 의한 것이 아닌 이온성 공간전하에 의한 것이라고 생각된다.

IV. 결 론

sol-gel법을 사용하여 유전박막의 두께가 800 Å인 시료를 제작하여 열처리온도를 300~600°C까지 변화하여 전기전도와 비유전율, 굴절률을 검토하였으며, 캐리어의 거동을 조사하기 위하여 온도범위 30~230°C에서 열자격전류 스펙트라를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) sol-gel법을 이용하여 제작한 Ta_2O_5 의 열처리온도는 열중량분석(TGA)과 전압-전류측정 결과 400°C가 가장 이상적이 었다.

2) X선회절분석 결과 열처리온도 600°C 이하에서는 비정질이고 그 이상에서는 결정질임을 확인하였으며, 결정구조는 사방정계(Orthorhombic) 구조였다.

3) 비유전율은 열처리 온도가 400°C 일 때 최대 값인 18.6을 얻었다.

4) 굴절률은 열처리온도 400°C 부근에서 최대 값인 2.2를 얻었다.

5) 열처리온도에 따른 절연파괴 강도는 400°C까지는 증가하다가 500°C 이상에서는 감소하고 있음을 보여주고 있다. 500°C 이상에서는 시편이 결정화가 되지 않았음에도 불구하고 절연파괴강도가 급격하게 감소하는 것은 편홀이 필름의 가장 취약한 부분에서 형성되어 누설전류가 흐르고, 크랙이 발생하기 시작하여 누설전류가 열처리 온도 증가에 따라 증가하기 때문인 것으로 생각된다.

6) 열처리온도에 따른 인가전압에 대한 전류밀도로 도시(plot)하여 분석한 결과 3개의 영역으로 나눌 수 있으며 A영역은 전류와 전압이 비례하는 Ohmic 영역으로 불순물 이동에 의한 것으로 생각되며, B영역은 시료내의 전류가 헤테로로 존재하고 있을 때 주입전류와 시료내의 전류가 합해지는 경우로 사료되며, C영역에서 전형적인 Child법칙에 따르다가 파괴가 일어난다.

7) 열처리 온도 400°C인 Ta_2O_5 박막을 중심으로 30~230°C 범위에서 TSC를 측정하고 결과 1개의 피이크를 얻었다. 콜렉팅 전압 V_c 를 4V 까지 변화시켜 관측한 결과 V_c 가 증가함에 따라 점차 감소해 감을 알 수가 있다. 또한 피이크 온도는 콜렉팅 전압이 변화에 따라 이동되고 있다. Q_{TSC} 와 V_c 관계에서 V_c 에 따라 직선적이 아닌 오목한 특성을 갖고 있다. 따라서 이 피이크에 기여하는 캐리어는 이온성 공간전하에 의한 것이라고 생각된다.

감사의 글

이 논문은 1997년 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구 되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Tiku, S. K., "Choice of dielectric for TFEL displays". IEEE Trans. Electron Devices, 31, 105, 1984
- [2] A. I. Anikin, A. N. Polovinkin, V. E. Sotin, "Fabrication of plane Ta_2O_5 optical waveguides by reactive cathode sputtering", Sov., Phys., Tech. Phys. Vol.22, No.10 pp.1256-1259, 1977.

- [3] G. S. Oehrlein, A. Reisman "Electrical properties of amorphous tantalum pentoxide thin films on silicon" J. Appl. Phys., Vol.54, No.11, pp.6502-6508, 1983.
- [4] Mustafa A. Mohammed, D. Vernon Morgan, "Tantalum Oxide Films for Monolithic capacitor Application", Thin Solid Films, 176, pp. 45-53, 1989.
- [5] Peter L. Young, "dc electrical conduction in thin Ta₂O₅ films. 1.Bulk-limited conduction", J. Appl. Phys. Vol. 47, No.1 pp.235-241, 1976.
- [6] G. S. Oehrlein "Oxidation temperature dependence of the dc electrical conduction characteristics and dielectric strength of thin Ta₂O₅ films on silicon", J. Appl. Phys. Vol.59, No.5 pp.1587-1595, 1986.
- [7] 土橋 剛, 佐 木克孝, "Al-Ta二層陽極酸化膜 キバツタの誘電特性に及ぼす 熱処理効果", 電子情報通信學會 論文誌C, Vol.J 70-C, No.4, pp. 533-540, 1987.
- [8] Shunji Seki, Takashi Unagami, Bunjiro Tsujiyama, "Electrical Characteristics of the R F Magnetron-Sputtered Tantalum Pentoxide Silicon Interface", J. Electrochem. Soc., Vol.131, No.11, pp.2621-2625, 1984.
- [9] Ohta, K., Yamada, K. Shimizu,K., and Tarui, Y., "Quadruply selfaligned stacked high capacitance RAM using Ta₂O₅ high density dynamic memory", IEEE Trans. Electron Devices, Vol.29, pp.368, 1982.
- [10] C. J .Brinter, "SOL-GEL Science-Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing", Academic Press, INC., 1990
- [11] John Carrano, Chandrasekhara Sudhama, Jack Lee, "Electrical and Reli-ability Characteristics of Lead-Zirconate-Titanate(PZT) Ferroelectric Thin Films for DRAM Applications", IEEE IEDM, pp.255-270, 1989
- [12] Gopouskouleli "Metallorganic Compounds as Pre ceramic Materials-II. Oxide Ceramics, Ceramics", Ceramics International 15, pp.255-270, 1989.
- [13] S.L Swarz, P.J. Melling, and C.S. Grant, "Ferroelectric Thin Films by Sol-Gel Processing", Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 152, pp.227-232, 1989.
- [14] 岡田 勝, "CVD及ヒスパッタリング法による酸化タンタル 薄膜の性質", 전기화학, 53, pp.109, 1985.
- [15] Nishioka Y., Kimura, S. Shinnriki, "Dielectric Characteristics of Double Layer Structure of Extremely Thin Ta₂O₅/SiO₂ Film on Si", J. Electrochem. Soc., Vol.34, p.410, 1987.
- [16] 日野太郎, 王 力衡, "TSC による Ta₂O₅ 薄膜のキャリアと導電特性 の検討", 電気學會 論文誌A, 102卷 8号, pp. 43-50, 1977.
- [17] 岩本光正, 山下 建, 日野太郎, "イオン空間電荷分極 TSCの数値解析", 日本電気學會 論文誌A, 101卷 8号, pp. 445-451, 1981.