

Pt/YMnO₃/Y₂O₃/Si(MFIS) 구조의 특성에 미치는 Y₂O₃층의 영향

양정환 · 신용철 · 최규정 · 최영심 · 윤순길
충남대학교 공과대학 재료공학과

Effect of Y₂O₃ Buffer Layer on the Characteristics of Pt/YMnO₃/Y₂O₃/Si(MFIS) Structure

Jung-Hwan Yang, Woong-Chul Shin, Kyu-Jeong Choi, Young-Sim Choi and Soon-Gil Yoon

Department of Materials Engineering, Chungnam National University, Daeduk Science Town, Taejeon, 305-764, Korea

(2000년 1월 19일 받음, 2000년 3월 3일 최종수정본 받음)

초 록 Metal/ferroelectric/insulator/semiconductor(MFIS)-Field Effect Transistor을 위한 Pt/YMnO₃/Y₂O₃/Si구조를 제조하여 MFIS구조의 특성에 미치는 Y₂O₃ 박막의 영향을 고찰하였다. PLD법을 이용하여 *p*-type Si(111) 기판 위에 증착시킨 Y₂O₃ 박막은 증착온도와 관계없이 (111) 방향으로의 우선배향성을 갖고 결정화 되었다. 실리콘 위에 바로 MOCVD법에 의해 강유전체 YMnO₃박막을 증착시킨 경우 실리콘과의 계면에서 Mn이 부족한 층이 형성되지만 Y₂O₃가 실리콘과 YMnO₃사이 에 삽입된 경우는 Y₂O₃ 바로 위에서부터 화학양론비에 일치하는 양질의 YMnO₃박막을 얻을 수 있었다. 850°C, 100mtorr의 진공분위기에서 열처리한 YMnO₃박막은 Y₂O₃가 삽입된 경우 memory window값이 Y₂O₃가 삽입되지 않은 경우 보다 더 큰 값을 보였으며 5V에서 1.3V의 값을 보였다.

Abstract The Pt/YMnO₃/Y₂O₃/Si structure for metal/ferroelectric/insulator/semiconductor(MFIS)-FET was fabricated and effect of Y₂O₃ layer on the properties of MFIS structure was investigated.

The Y₂O₃ thin films on *p*-type Si(111) substrate deposited by Pulsed Laser Deposition were crystallized along (111) orientation irrespective of the deposition temperatures. Ferroelectric YMnO₃ thin films deposited directly on *p*-type Si(111) by MOCVD resulted in Mn deficient layer between Si and YMnO₃. However, YMnO₃ thin films having good quality and stoichiometric composition can be obtained by adopting Y₂O₃ buffer layer. The memory window of the YMnO₃ thin films with Y₂O₃ film is greater than that of the YMnO₃ thin films without Y₂O₃ film after the annealing at 850°C in vacuum ambient(100mtorr). The memory window is 1.3V at an applied voltage of 5V.

Key words : MFIS-FET(Metal/Ferroelectric/Insulator/Semiconductor-Field Effect Transistor), Ferroelectric, PLD (pulsed laser deposition), MOCVD(metalorganic chemical vapor deposition)

1. 서 론

최근 강유전체 박막은 비휘발성 기억소자에서의 적용에 대한 많은 주목을 끌고 있다. 이들 재료를 이용한 비휘발성 기억소자(FRAM)은 강유전체 박막의 분극 반전과 그 히스테리시스 특성을 이용한 고속, 저소비전력, Data의 비휘발성 등의 장점을 가지고 있어 국내외 많은 연구가 진행되고 있다.^{1~4)} 특히 현재 DRAM의 1T/1C구조 또는 2T/2C구조에서 capacitor부분을 강유전체 박막으로 대체 시킨 FRAM들이 실용화되고 있는데 이러한 구조는 cell 면적의 증가, 공정상의 복잡성 등의 문제점들이 해결되지 않고 있다. 이러한 문제점을 해결하고 나아가 Cell 한 개로 이러한 기능들을 가능하게 할 수 있는 구조가 바로 Metal/Ferroelectric/Semiconductor Field Effect Transistor (MFSFET)이다. 이 구조는 실리콘 기판 위에 직접 강유전체 박막을 증착시키는 것으로 전기적으로 우수한 특성을 얻기 위해서는 강유전체와 반도체의 계면이 안정되어야 하며 계면 준위 밀도가 낮아야만 한다. 하지만 실제 실리콘 위에 강유전체

물질을 증착시키게 되면 계면에서 SiO₂의 형성, 상호 확산에 의한 반응과 캐리어의 주입으로 인하여 우수한 계면특성을 얻기는 매우 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 제안된 구조가 바로 Si와 강유전체 사이에 절연물질을 형성시키는 MFIS-FET 구조이다. 이러한 절연물질은 실리콘과 반응하지 않고 우수한 계면특성과 높은 유전 상수를 갖고 있어야 하며 또한 우수한 확산 방지 특성을 갖는 물질이어야 한다. 또한 고온의 공정에서도 안정하여 그 위에 증착되는 강유전체의 특성을 유지할 수 있어야 한다. 현재 많이 연구되는 물질로는 Y₂O₃, CeO₂, ZrO₂, MgO 또는 SrTiO₃ 등이 있다.^{5~7)} 이러한 물질들 중에서 Y₂O₃는 Si(111)과 Si(100) 위에 증착할 경우 정합성장이 가능하며⁸⁾, 실리콘과의 계면특성이 매우 우수한 것으로 보고 되고 있다.⁹⁾ Bulk Y₂O₃인 경우 유전상수값은 약 14에서 17 정도의 값을 갖는다.¹⁰⁾ 또한 Yttrium의 높은 산화력은 실리콘이 산화되어 생기는 SiO₂층의 두께가 증가하는 것을 억제할 수 있을 것으로 기대된다. 이러한 이유에서 Y₂O₃박막은 강유전체를 이용한 MFIS-FET구조에서 절연층으로 사용될 경우 우수

한 특성을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

또한 YMnO₃는 강유전특성을 갖는 물질로써 유전상수는 상온에서 약 20정도의 값을 갖고 무겁고 쉽게 산화되는 물질로 구성되어 있으며 특히 고온에서 열적으로 안정한 것으로 보고되고 있다.^{11,12)} 특히 YMnO₃ 박막은 Si 위의 native oxide에 대한 환원제로 기대된다. 왜냐하면 희토류 원소(rare-earth elements)는 강한 환원능력을 가지고 있기 때문이다. 이러한 이유에서 YMnO₃ 박막을 MFS(metal-ferroelectric-semiconductor) 소자에 이용하려는 연구가 몇몇 연구자에 의하여 진행되고 있다.^{13,14)} 하지만 아직까지 YMnO₃ 박막을 이용한 MFS 구조에서 우수한 특성이 보고되고 있지는 않다.

본 연구에서는 절연물질로서 우수한 특성을 보이는 Y₂O₃ 박막을 *p*-Si기판위에 pulsed laser deposition법으로 증착시키고 그 위에 YMnO₃박막을 metalorganic chemical vapor deposition법으로 증착시켜 MFIS 구조를 제조하였다. 이렇게 구성된 Pt/YMnO₃/Y₂O₃/Si(MFIS) 구조의 특성에 미치는 Y₂O₃박막의 영향을 연구하였다.

2. 실험 방법

Y₂O₃박막은 pulsed laser deposition (PLD)을 사용하여 *p*-type Si(111) wafer 위에 증착하였다. 그리고 그 위에 강유전체 YMnO₃박막을 metalorganic chemical vapor deposition(MOCVD)법으로 증착하였다. Y₂O₃박막의 증착에 사용된 Laser는 KrF excimer (248nm)이고 1mtorr의 압력에서 증착하였으며 증착온도는 600°C, laser energy density는 2.0J/cm²이었다. 이렇게 증착된 Y₂O₃박막은 800°C, 산소분위기에서 30분간 열처리되었다. 사용된 Target은 고순도의 Y₂O₃ 단일 Target이다. 사용된 기판은 3×3(cm²) 크기의 *p*-type Si(111) wafer로서 먼저 표면의 불순물 및 유기물을 제거하기 위하여 acetone으로 약 3분간 초음파세척을 한 후 methyl alcohol을 사용하여 2차 세척하였다. 그런 다음 자연산화막을 제거하기 위하여 2.5%의 HF용액에 20초간 에칭한 후 DI water에 담가 5분간 초음파 세척기에서 세척한 후 99.999%의 질소가스로 불어내어 PLD 반응기에 장입하였다. MOCVD에 의한 YMnO₃ 박막 성장에 있어서, Y(C₁₁H₁₉O₂)₃와 (CH₃C₃H₄)Mn(CO)₃은 각각 Y와 Mn의 출발물질로 사용하였다. Y₂O₃

박막과 YMnO₃ 박막의 상세한 증착조건은 표 1에서 제시하였다. 이렇게 증착된 박막은 850°C, 진공분위기(100mTorr)에서 60분간 열처리공정을 거친 후 0.15mm 직경의 shadow mask를 이용하여 상온에서 dc sputtering으로 Pt를 증착하여 Metal/Ferroelectric/Insulator/Semiconductor(MFIS)구조를 형성하였다.

Cu K α radiation과 Ni filter를 사용한 X-ray diffraction(XRD, Rigaku)은 박막의 결정성을 결정하는데 사용하였다. 박막의 두께와 조성은 Rutherford backscattering spectroscopy(RBS, NEC 3SDH)를 이용하였으며 증착된 박막의 거칠기는 Atomic Force Microscopy(AFM)로 관찰하였다. MFIS 구조에 있어서 각각의 구성 원소의 확산은 Secondary ion mass spectrometry(SIMS)(Cameca-ims4f)에 의해 분석하였다. Capacitance-Voltage(C-V)특성은 Hewlett-Packard(4194A) impedance-grain phase analyzer로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 *p*-type Si(111) 기판 위에 증착시킨 Y₂O₃ 박막의 증착온도에 따른 XRD 패턴을 보여주고 있다. 550°C 이상에서 증착온도에 관계없이 강한 (111)방향으로의 우선 배향성을 보였다. Y₂O₃의 격자상수는 10.60 Å이며 Si의 격자상수의 두배는 10.86 Å 이므로¹⁵⁾ Si과 Y₂O₃과의 격자 불일치도가 2.45% 이내의 값을 갖는다. 이러한 격자상수의 차는 Si(111)과의 정합성장을 가능하게 하며 본 연구의 결과에서 보인 배향성을 설명할 수 있다.

그림 2는 *p*-type Si(111) 기판 위에 증착시킨 Y₂O₃ 박막의 AFM(Atomic Force Microscopy) 이미지를 보여준다. 본 연구에서 다루고자하는 구조는 Metal/Ferroelectric/Insulator/Semiconductor(MFIS)로써 절연층으로 사용되는 Y₂O₃ 박막위에 강유전체 물질이 적층되게 된다. MFIS구조에 있어서 Y₂O₃와 강유전체박막 사이의 계면은 Y₂O₃의 표면거칠기에 크게 의존하게되며, Y₂O₃ 박막의 표면거칠기에 따라서 그위에 올라가는 강유전체박막의 특성에 영향을 주게 된다. 그러므로 Y₂O₃ 박막의 우수한 표면상태의 확보는 매우 중요하다. 그림 2(a)는 600°C에서 증착된 Y₂O₃ 박막의 표면 AFM 이미지를 보여준다. 표면거칠기

Table 1. Deposition condition of Y₂O₃ and YMnO₃ thin films.

Deposition Parameter	Y ₂ O ₃	YMnO ₃
Deposition method	PLD	MOCVD
Deposition temperature	600°C	450°C
Deposition Pressure	1mTorr	2torr
Energy density of laser	2J/cm ²	-
Repetition rate	5Hz	-
Substrate	<i>P</i> -type Si(111)	Si, Y ₂ O ₃ /Si
O ₂ gas flow rate	-	200sccm
Bubbling temperature of Y(C ₁₁ H ₁₉ O ₂) ₃	-	165°C
Bubbling temperature of (CH ₃ C ₃ H ₄)Mn(CO) ₃	-	20°C
Annealing condition	800°C, O ₂ , 30min	850°C, Vacuum, 60min

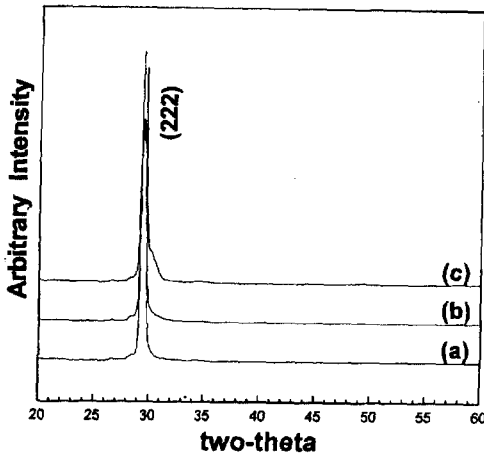


Fig. 1. XRD patterns of Y_2O_3 thin films on p -type Si(111) deposited at (a) 550°C, (b) 600°C, and (c) 650°C.

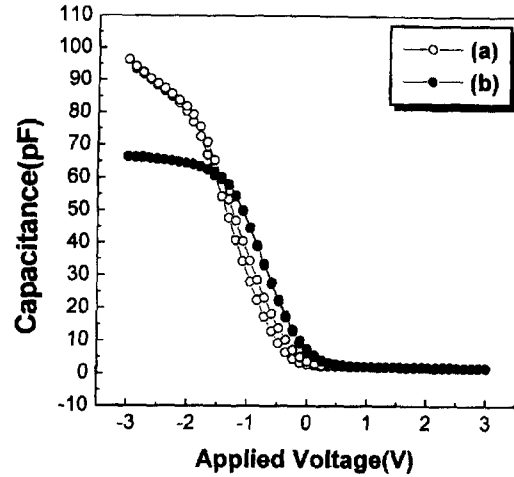


Fig. 3. Capacitance-Voltage characteristics of Y_2O_3 thin films on p -type Si(111) (a) deposited at 600°C and (b) annealed at 800°C in oxygen ambient.

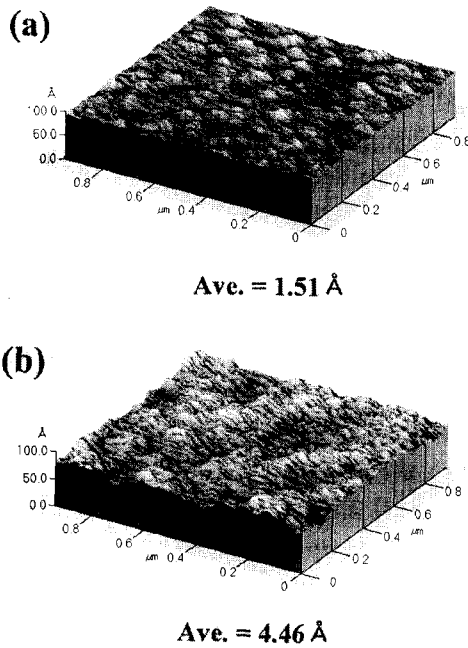


Fig. 2. AFM(Atomic Force Microscopy) images of Y_2O_3 thin films on p -type Si(111) (a) deposited at 600°C and (b) annealed at 800°C in oxygen ambient.

정도는 수 Å 정도로 아주 우수한 상태를 보여준다. 그림 2 (b)에서 보듯이 이 시편을 800°C의 산소 분위기에서 열처리를 수행하여도 표면거칠기는 크게 변화하지 않으며 이러한 결과를 보아 그 위에 증착되는 강유전체물질과 우수한 계면상태를 유지할 것으로 기대된다.

그림 3은 Si(111) 기판위에 600°C에서 증착된 Y_2O_3 박막의 Capacitance-Voltage 특성을 보여준다. 본 연구에서는 Si의 산화를 억제하기 위하여 증착시 1mtorr의 낮은 증착압력 하에서 Y_2O_3 박막을 제조하였다. 이렇게 제조된 Y_2O_3 박막은 증착중 Y_2O_3 박막생성에 충분한 양의 산소가 공급되지 않을 것으로 여겨지며 결과적으로 박막내에는 산소가 결핍된 상태일 것이다. 그림 3(a)에서 보듯이 C-V 곡선의 축적부분에서 capacitance가 증가하는 것을 관찰할

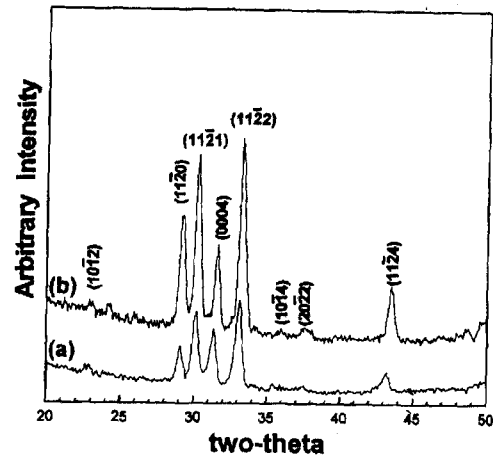


Fig. 4. XRD patterns of $YMnO_3$ thin films deposited on (a) Si(111) and (b) $Y_2O_3/Si(111)$. $YMnO_3$ thin films were deposited at 450°C by MOCVD, and annealed at 850°C in vacuum ambient (100mtorr).

수 있으며 이는 산소 결핍에 따른 영향으로 여겨진다. 하지만 그림 3(b)에서 보듯이 800°C, 산소분위기에서 열처리된 Y_2O_3 박막의 경우는 전형적인 C-V 곡선을 보여준다. 또한 반전부분에서 안정된 상태를 유지하고 있는 것으로 보아 Si와의 상호 확산은 거의 없으며 우수한 계면상태를 유지하고 있는 것으로 보여진다.

본 연구에서 MFIS구조를 위하여 강유전체 $YMnO_3$ 박막을 사용하였으며 Y_2O_3 층의 영향을 관찰하기 위하여 Si위에 직접 $YMnO_3$ 박막을 증착한 시편과 Y_2O_3 위에 $YMnO_3$ 박막을 증착한 시편을 제조하였다. $YMnO_3$ 박막은 MOCVD 법에 의해 450°C에서 제조되었다. 그림 4는 p -Si(111)와 Y_2O_3/p -Si(111) 위에 증착된 $YMnO_3$ 박막을 850°C, 진공 분위기(100mtorr)에서 60분간 열처리한 시편의 XRD 회절상을 보여준다. 그림에서 보듯이 Y_2O_3 를 삽입한 경우와 삽입하지 않은 경우 모두 다결정의 $YMnO_3$ 상이 형성된 것을 볼수 있다. 결국 본 실험에서 증착된 $YMnO_3$ 박막의 결

정성에 있어서 절연막인 Y₂O₃는 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

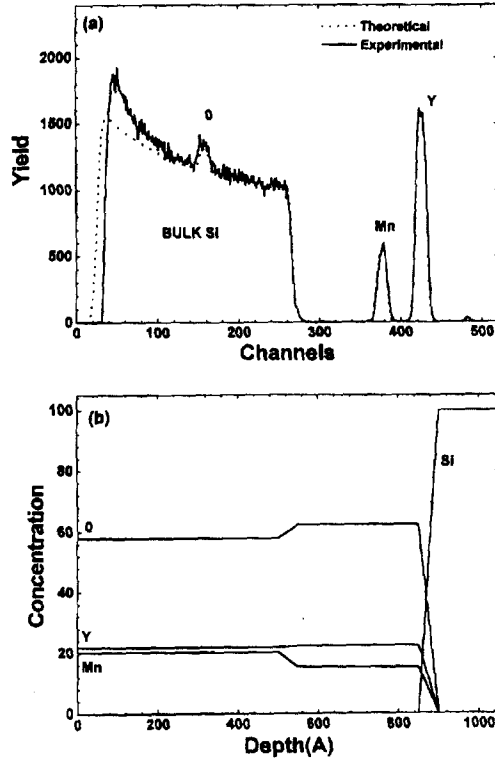


Fig. 5. (a) RBS spectrum and (b) depth profile of YMnO₃ thin films deposited on Si(111).

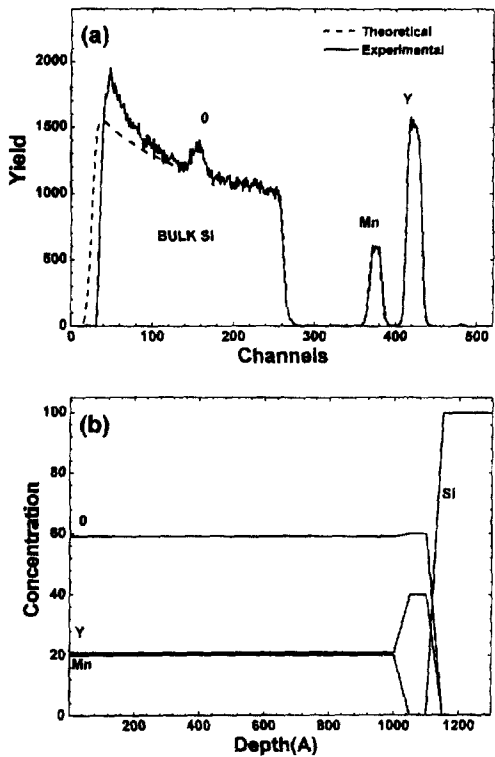


Fig. 6. (a) RBS spectrum and (b) depth profile of YMnO₃ thin films deposited on Y₂O₃/Si(111).

실리콘 위에 강유전체 물질을 바로 증착시키게 되면 계면에서 SiO₂의 형성, 상호 확산에 의한 반응과 캐리어의 주입으로 인하여 우수한 계면특성을 얻기는 매우 어렵다. 또한 실리콘과의 계면에서 강유전물질의 조성불균일이 생기게 되어 원하지 않는 층이 생기게 되므로 얻고자하는 전기적인 특성을 악화시키는 요인으로 작용하게 된다. 그림 5는 실리콘기판위에 YMnO₃박막을 바로 증착시킨 YMnO₃/Si구조의 RBS 분석 결과이다. Random spectrum에서 Y과 Mn의 조성비는 대략 1 : 1인 화학양론적인 조성비를 나타내고 있다. 하지만 이 데이터를 이용하여 깊이에 따른 조성비를 알아보면 그림 5(b)에서 보여 지듯이 실리콘계면에서부터 약 500Å 되는 지점까지의 조성은 Mn이 부족한 상태를 갖고 있는 것으로 나타났다. 이러한 조성의 불균일층은 실제 소자의 특성에 있어서 전체 capacitance의 감소를 초래하게 되며 defect의 농도를 증가시키게 되고 이러한 defect는 캐리어주입등의 문제점으로 우수한 계면특성을 얻을 수 없게 된다. 이와 비교하여 실리콘기판위에 Y₂O₃를 100Å 정도 증착한 후 YMnO₃을 증착시킨 YMnO₃/Y₂O₃/Si구조에서는 그림 6에서 보여주듯이 Y₂O₃층 바로 위에서부터 Y/Mn비가 거의 1에 가까운 조성비를 갖는 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 Y₂O₃층이 삽입된 경우는 Y과 Mn의 조성불균일층이 없이 YMnO₃박막이 화학양론비를 가지고 성장하는 것을 알 수 있다. 또한 Si과 Y₂O₃, 그리고 Y₂O₃와 YMnO₃ 사이의 우수한 계면을 확보하게 됨으로써 우수한 전기적인 특성을 보일 것으로 기대된다.

그림 7은 p-Si기판위에 바로 YMnO₃박막을 증착시킨후 850°C, 100mtorr의 진공분위기에서 열처리한 박막의 C-V특성을 나타내었다. 절연층으로 Y₂O₃박막을 삽입하지 않은 경우 5V에서 memory window폭이 0.3V 정도의 작은 값을 보이고 있으며 또한 분극반전의 영역에서 capacitance값이 포화되지 않는 것으로 나타났다. 이는 그림 5에서 보여준 것처럼 실리콘과의 계면에서 존재하는 Mn이 부족한 층의 원인으로 여겨진다. 하지만 그림 8(a)에서 보여

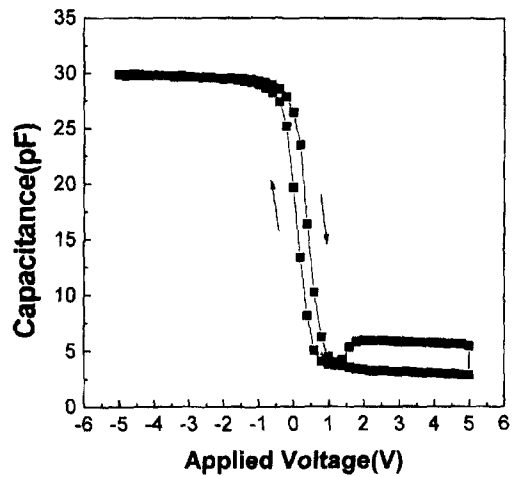


Fig. 7. Capacitance-Voltage characteristic of YMnO₃ thin films deposited on p-Si(111). YMnO₃ thin films were deposited at 450°C by MOCVD, and annealed at 850°C in vacuum ambient (100mtorr).

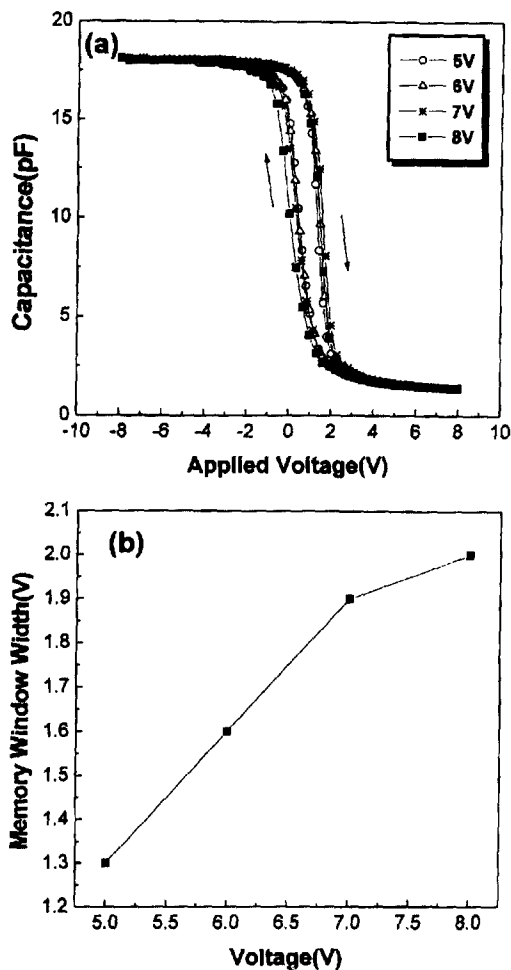


Fig. 8. (a) Capacitance-Voltage characteristics and (b) memory window width of Y_2O_3 thin films on Y_2O_3/p -Si(111) with various applied voltage. Y_2O_3 thin films were deposited at $450^\circ C$ by MOCVD, and annealed at $850^\circ C$ in vacuum ambient (100mtorr).

주는 것처럼 Y_2O_3 절연막이 있는 경우의 C-V 특성은 축적 부분에서 반전부분까지 시계방향으로 진행되는 전형적인 강유전체의 C-V 이력곡선을 나타내고 있다. 그림 8(b)는 측정된 인가전압에 따른 memory window 폭의 변화를 보여주고 있다. 인가전압 5V에서 1.3V의 값을 보였으며 인가전압이 증가함에 따라 memory window 폭이 대칭적으로 일정하게 증가하는 것을 볼 수 있다.

memory window는 강유전체물질의 coercive voltage가 포화되기 충분한 인가전압의 크기에 강하게 의존한다. 인가된 게이트 전압은 각층의 두께와 유전상수의 비에 따라서 series로 구성된 Y_2O_3 , SiO_2 , 그리고 Y-Mn-O층들에 의해서 나누어진다. MFS구조인 경우는 Y-Mn-O층에 가해진 전압이 Y_2O_3 에 가해진 전압보다 훨씬 크게 된다. Y-Mn-O층에 가해진 전압이 더 우선되면 표면 charge는 Y-Mn-O층에 주입되고 memory window는 charge 주입에 의해 감소하게 될 것이다. 또한 불완전한 조성의 Y-Mn-O층의 형성은 많은 결함들을 함유하고 있으므로 계면에서의 charge의 주입은 더욱 증가될 것이다. 그

러나 MFIS구조에서는 Y_2O_3 층이 Y-Mn-O층의 형성을 억제하여 Y_2O_3 위에 화학양론비가 맞는 $YMnO_3$ 층이 형성됨으로써 원하지 않는 Y-Mn-O층에 가해진 전압에 의한 감소는 없고 Y_2O_3 에 걸리는 전압에 의한 영향은 MFS구조에서의 영향보다 훨씬 작게 된다. 또한 Y_2O_3 의 삽입으로 안정한 계면상태를 유지하므로 계면에서의 charge효과도 훨씬 감소하게 된다. 그러므로 Y_2O_3 층을 갖는 $YMnO_3$ 박막의 memory window는 charge 주입에 의한 memory window의 감소를 억제하기 때문에 Y_2O_3 층이 없는 $YMnO_3$ 박막의 memory window보다 더 크게 된다. 결과적으로 Y_2O_3 는 charge 주입에 대한 좋은 특성을 보이므로 자연산화막인 SiO_2 의 존재에도 불구하고 Y_2O_3 를 갖는 강유전체 게이트 캐패시터의 memory window는 감소하지 않으며 10V 이상의 인가전압에서도 증가하게 된다. 그러므로 본 연구에서 사용된 Y_2O_3 절연막은 화학양론비를 갖는 $YMnO_3$ 박막의 성장에 있어서 매우 중요하며 또한 안정된 계면을 확보하게 되므로 MFIS구조의 전기적인 특성 향상에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

절연물질로 사용된 Y_2O_3 박막과 강유전체 $YMnO_3$ 박막은 PLD와 MOCVD에 의해 제조하여 Pt/ $YMnO_3$ /Si 구조와 Pt/ $YMnO_3$ / Y_2O_3 /Si 구조의 캐패시터를 제작하여 MFIS구조에 미치는 절연막 Y_2O_3 의 영향을 연구하였다. PLD법을 이용하여 p-type Si(111) 기판 위에 증착시킨 Y_2O_3 박막은 증착온도에 관계없이 강한 (111) 방향으로의 우선배향성을 보였다. $600^\circ C$, 1mtorr에서 p-type Si(111) 기판 위에 증착시킨 Y_2O_3 박막을 $800^\circ C$, 산소분위기에서 열처리하여 전형적인 C-V 곡선을 얻을 수 있었다. 실리콘 위에 바로 $YMnO_3$ 박막을 증착시킨 경우 실리콘과의 계면에서 Mn이 부족한 층이 형성되지만 Y_2O_3 가 실리콘과 $YMnO_3$ 사이에 삽입된 경우는 Y_2O_3 바로 위에서부터 화학양론비에 거의 일치하는 양질의 $YMnO_3$ 박막을 얻을 수 있었으며, MFIS구조에 있어서 우수한 계면을 확보할 수 있었다. $450^\circ C$ 에서 MOCVD법으로 $YMnO_3$ 박막을 증착시킨 후 $850^\circ C$, 100mtorr의 진공분위기에서 열처리한 박막은 Y_2O_3 가 삽입되지 않은 경우 Mn이 부족한 Y-Mn-O층의 형성으로 인한 charge 주입으로 memory window 폭이 작은 값을 보이지만 Y_2O_3 가 삽입된 구조에서는 상대적으로 우수한 계면을 얻을 수 있었으며 5V에서 1.3V의 높은 값을 보였다. 이러한 결과로 보아 $YMnO_3$ / Y_2O_3 /Si 구조에서 절연층으로 사용된 Y_2O_3 박막은 MFISFET의 비휘발성 메모리에서의 적용 가능성이 확인되었다.

감사의 글

본 연구는 IITA (Institute of Information Technology Assessment)의 99년도 대학기초 연구지원사업의 연구비 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다. 그리고 RBS분석에 도움을 주신 KMAC의 이중환박사님께 감사드립니다.

참고 문헌

1. S. S. Eaton, D. B. Butler, M. Parris, D. Wilson, and H. McNeillie, *IEEE Solid State Circuits Conference*, **329**, 130 (1988).
2. S. Sinharoy, H. Buhay, D. R. Lampe, and M. H. Francombe, *J. Vac. Sci. Technol. A*, **10**, 1554 (1992).
3. Y. Chen, Y.K. Fang, M. J. Sun, J. R. Chen, *Appl. Phys. Lett.* **69**, 812 (1996).
4. Eisuke Tokumitsu, Ryo-ichi Nakamura and Hiroshi Ishiwara, *IEEE Electron Device Letters*, **18**(4), 160 (1997).
5. S. Kim, S. Hishita, Y. Kang, and S. Baik, *J. Appl. Phys.* **78**, 2801 (1995).
6. M. H. Lim, and T. S. Kalkur, *Integ. Ferroelect.* **17**, 433 (1997).
7. Y. M. Wu, and J. T. Lo, *Jpn. J. Appl. Phys.* **37**(9A), 4943 (1998).
8. H. Fukumoto, T. Imura, and Y. Osaka, *Appl. Phys. Lett.* **51**, 919 (1989).
9. B. E. Park, S. Shouriki, E. Tokumitsu, and H. Ishiwara, *Jpn. J. Appl. Phys.* **37**, 5145 (1993).
10. M. Gurvitch, L. Mancanda, and J. M. Gibson, *Appl. Phys. Lett.* **51**, 919 (1987).
11. E. F. Bertaut, F. Forrat, and P. H. Fang, *C. Rend.* **256**, 1958 (1963).
12. H. L. Yakel, W. C. Koehler, E. F. Bertaut, and F. Forrat, *Acta Crystallogr.* **16**, 957 (1963).
13. Woo-Chul Yi, Joon-Seon, Chang-Rok Moon, and Sook-Il Kwun, Jong-Gul Yoon, *Appl. Phys. Lett.* **73**(7), 903 (1998).
14. Norifumi Fujimura, Tadashi Ishida, Takeshi Yoshimura, and Taichiro Ito, *Appl. Phys. Lett.* **69**(7), 1011 (1996).