

Pt/LiNbO₃/AlN/Si(100) 구조의 전기적 특성

Electrical properties of Pt/LiNbO₃/AlN/Si(100) structures

정순원*, 정상현*, 인용일**, 김광호**

Soon-Won Jung*, Sang-Hyun Jeong*, Yong-Il In**, Kwang-Ho Kim**

Abstract

Metal-insulator-semiconductor (MIS) C-V properties with high dielectric AlN thin films showed no hysteresis and good interface properties. The dielectric constant of the AlN film calculated from the capacitance at the accumulation region in the capacitance-voltage(C-V) characteristics was about 8. The C-V characteristics of MFIS capacitor showed a hysteresis loop due to the ferroelectric nature of the LiNbO₃ thin films. Typical dielectric constant value of LiNbO₃ film of MFIS device was about 23. The memory window width was about 1.2V at the gate voltage of ± 5 V ranges. Typical gate leakage current density of the MFIS structure was the order of 10^{-9} A/cm² at the range of within ± 500 kV/cm. The ferroelectric capacitors showed no polarization degradation up to about 10^{11} switching cycles when subjected to symmetric bipolar voltage pulse(peak-to-peak 8V, 50% duty cycle) in the 500kHz.

Key Words : MFIS device, rapid thermal annealing, LiNbO₃/AlN/Si(100) structures, hysteresis loop polarization degradation, high dielectric buffer layer

1. 서론

강유전체를 메모리 소자에 적용하고자 하는 연구는 1970년대 초부터 시작되어 현재 전세계적으로 활발히 진행되고 있다.^[1-2] 강유전체를 사용한 비휘발성 기억 소자는 강유전체 박막의 분극반전과 그 히스테리시스 특성을 이용하기 때문에 빠른 스위칭 속도에 의한 고속구동, 데이터의 비휘발성으로 인한 저소비전력화를 실현할 수 있는 장점을 갖는다. 본 연구실에서는 최근까지 산화물계 강유전체인 LiNbO₃ 와 비산화물인 불화물 강유전체 BaMgF₄ 박막을 실리콘 위에 초고진공 상태에서 형성시켜 고온 급속 열처리를 수행한 후, 이것을 이용한 MFS 디바이스를 제작

한 결과와 비휘발성 메모리로서의 동작 가능성을 확인한 결과를 보고한 바 있다.^[3-6] 그러나 MFS 구조에서 전기적으로 우수한 특성을 얻기 위해서는 강유전체와 반도체의 계면이 안정하여야 하며 계면 준위 밀도(D_{it})가 낮아야 한다. 그러나 실제 실리콘 기판 상에 강유전체 박막을 증착시키게 되면 실리콘 기판과 강유전체 물질 사이의 계면에서 반응이 일어나기 때문에 우수한 강유전성을 얻기가 어렵다.[7-8] 이러한 문제점을 해결하기 위해서 제안된 구조가 강유전체 박막과 실리콘 기판 사이에 절연층을 삽입한 MFISFET(Metal/ferroelectric/insulator/semiconductor field-effect-transistor)구조이다. 삽입되는 절연물질은 우수한 계면 특성과 높은 유전율을 가져야 하며, 우수한 확산방지 특성을 갖는 물질이어야 한다. 현재 일반적으로 사용되고 있는 MFIS 구조에서는 고유전율 강유전체 재료와 저유전율 절연체 재료를 이용하고 있다. 예를 들어 실리콘 계면에 형성시킨 비유전율이 약 4정도인 얇은 SiO₂ 위에 비유전율이

* 청주대학교 전자공학과
(충북 청주시 상당구 내덕동 청주대학교,
Fax: 043-229-8432
E-mail : swjung@chongju.ac.kr)
** 청주대학교 전자·정보통신·반도체공학부

수백인 PZT나 SBT와 같은 강유전체 막을 제작할 경우에 이 두 막이 직렬 커패시터 회로를 형성하게 된다. 이때, 산화막과 강유전체 막의 이중막에 전압이 인가되면, 그 전압분배는 유전율이 낮고 막이 얇은 쪽에 주로 걸리게 되어(즉, 계면에 형성된 얇은 산화막인 SiO₂에 걸림) 강유전체의 특성을 이용할 수 없게 된다. 강유전특성을 유용하게 이용하기 위해서는 낮은 유전율의 강유전체 재료와 높은 유전율의 buffer 막을 사용할 필요가 있다. 본 논문에서는 이러한 MFIS 구조에서 사용된 적이 없는 고유전율($\epsilon=8.5$) 절연 물질인 AlN 박막을 buffer로 사용하고, 그 위에 저유전율 강유전체 물질인 LiNbO₃를 증착시킨 MFIS 구조의 특성에 관하여 보고하기로 한다. buffer층으로 사용된 AlN 박막은 넓은 에너지 밴드 갭(6.2eV)을 가지며, Si과 열팽창 계수가 거의 일치하여 열적 부정합이 작고,^[9-10] 결정구조도 LiNbO₃와 같은 hexagonal이기 때문에 그 위에 형성되는 강유전체 박막은 우수한 결정성이 얻어질 것으로 예상되므로 buffer층으로 선택하였다.

2. 실험 및 결과

2.1 Pt/AlN/Si(100) 구조(MIS)의 제작 및 특성

본 실험에서는 RF 마그네트론 스퍼터링 시스템을 이용하여 AlN 박막을 증착하였다. 실험에는 저항율이 21~25 $\Omega \cdot \text{cm}$ 인 boron이 도핑된 p-type Si(100)과 세계 도핑된(0.001~0.0025 $\Omega \cdot \text{cm}$) p-type Si(100) 웨이퍼를 사용하였다. 먼저 유기 세정법과 RCA법으로 Si 웨이퍼 표면을 세척한 후, 희석된 HF 용액에 담구어 실리콘 자연 산화막을 제거하였다. 이렇게 처리한 웨이퍼를 챔버 내부에 장착하여 초기 진공을 1×10^{-6} Torr 이하로 유지시켰다. AlN 박막 증착에는 순도가 99.99%, 크기가 3인치인 Al 타겟을 사용하였으며, 0.01~0.02nm/s의 증착 속도로 20 nm의 AlN을 증착하였다. 자세한 실험 조건을 표 1에 보인다. 이렇게 준비된 AlN/Si(100) 구조를 가지고 구조적 특성을 평가하기 위해 XRD(X-ray diffraction)를 사용하였으며, E-beam evaporator를 사용하여 Pt 금속을 증착시켜 MIS 구조로 제작하여 제작된 소자의 전기적 특성평가를 병행하였다. 전기적 특성 평가에는 Semiconductor Parameter Analyzer(HP4145B)와 LF Impedance Analyzer(HP4192A), pA meter(HP4140B)를 사용하였다.

그림 1은 표 1에 나타난 조건에 의해 제작된 AlN/Si(100) 구조의 XRD 패턴이다. 그림에서 보는 바와 같이 XRD 피크치가 2θ 가 약 36° 부근에서 AlN(002) 피크가 나타나는 것을 확인할 수 있는데,

이것은 AlN이 결정화되었음을 의미하는 것이다. 이 결과로 미루어 볼 때 AlN 절연층 위에 형성될 LiNbO₃ 박막이 c축 배향성이 강한 hexagonal 구조라는 점을 감안하면, 보다 우수한 LiNbO₃ 결정성이 얻어지리라 생각된다.

표 1. 스퍼터링 조건

Table 1. Sputtering condition

Deposition parameter	AlN	LiNbO ₃
RF input power	25W	150W
Deposition pressures	8mTorr	10mTorr
Sputtering gas ratio	Ar+N ₂ = 50+100	Ar+O ₂ = 80+20
Substrate temperature	400°C	R.T.
Target to substrate distance	55mm	55mm
RTA	1000°C	850°C

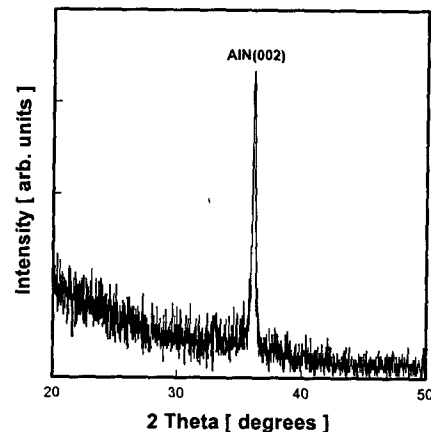


그림 1. AlN/Si(100) 구조의 XRD 패턴

Fig. 1. XRD pattern of AlN/Si(100) structure

그림 2는 Pt/AlN/Si(100) 구조를 갖는 MIS 커패시터의 1MHz C-V 특성 곡선을 보인 것이다. 히스테리시스가 전혀 없는 양호한 계면 특성을 얻을 수 있었으며, 그래프의 축적영역에서 산출한 AlN 박막의 유전상수 값은 약 8이었으며, 이 값은 벌크의 유전상수 값(8.5)과 거의 일치한다는 것을 알 수 있다. 삽입된 그림은 MIS 커패시터의 게이트 누설전류밀도를 나타낸 것이다. 양 및 음의 방향으로 인가시킨 전계범위 내에서는 누설전류가 10^{-8} A/cm² 이하로

매우 우수함을 알 수 있다. 인가 전계가 500 kV/cm 일 때의 저항율을 계산하면 $5.6 \times 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ 이다.

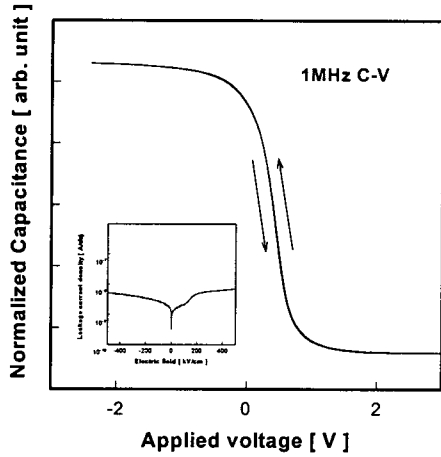


그림 2. Pt/AlN/Si(100) 구조를 갖는 MIS 커패시터의 1MHz C-V 특성과 게이트 누설전류밀도
 Fig. 2. 1MHz C-V characteristic and gate leakage current density of MIS capacitor with Pt/AlN/Si(100) structure

2-2. Pt/LiNbO₃/AlN/Si(100) 구조(MFIS)의 제작 및 특성

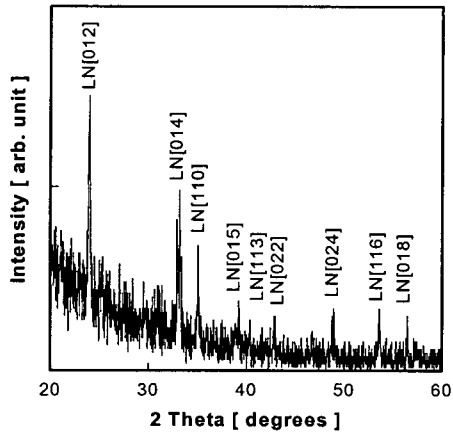


그림 3. LiNbO₃/AlN/Si(100) 구조의 XRD 패턴
 Fig. 3. XRD pattern of LiNbO₃/AlN/Si(100) structures

그림 3은 표1에 나타난 조건에 의해 제작한 LiNbO₃/AlN/Si(100) 구조에 대한 XRD 패턴이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 single phase를 갖는 다결

정 LiNbO₃ 피크들이 관측되었다. AlN buffer층이 삽입된 구조에서도 고온에서의 짧은 시간동안 행한 열처리로 쉽게 다결정으로 변한다는 것을 알 수 있다. LiNbO₃ 박막을 입히기 전의 시료인 AlN/Si(100) 구조 중에서 일부를 별도로 준비하여 XRD 평가를 행하였는 바, 그림 1에서 보인 바와 같은 AlN 피크를 관측하였지만, 그림 3의 LiNbO₃/AlN/Si(100) 구조에서는 LiNbO₃ 막이 AlN 막에 비해 상대적으로 두껍기 때문에 AlN 피크가 약하여 관측이 되지 않았다.

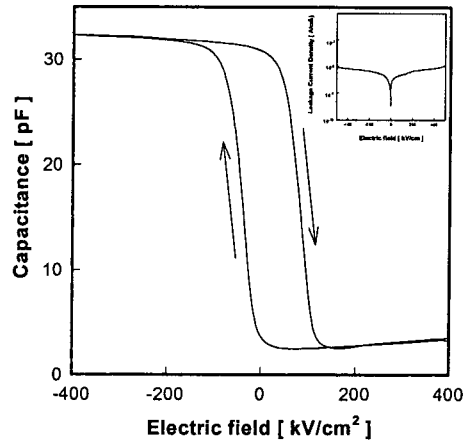


그림 4. Pt/LiNbO₃/AlN/Si(100) 구조를 갖는 MFIS 커패시터의 1MHz C-V 특성곡선과 게이트 누설전류밀도
 Fig. 4. 1MHz C-V characteristic curve and gate leakage current density of MFIS capacitor with Pt/LiNbO₃/AlN/Si(100) structure

그림 4는 Pt/LiNbO₃/AlN/Si(100) 구조를 갖는 MFIS 커패시터의 1MHz C-V 특성곡선을 보인 것이다. 그래프에서 보는 것과 같이 양호한 interface 특성을 보이고 있으며, LiNbO₃ 박막의 강유전성으로 인한 히스테리시스 특성이 관측됨을 확인할 수 있다. 측정된 memory window width는 약 1.2V였다. 1MHz C-V 특성 곡선의 축적상태로부터 계산한 유전상수는 약 23이었다. 삽입된 그림은 MFIS 커패시터의 게이트 누설전류밀도를 보인 것이다. 그래프에서 보는 바와 같이 가해진 전계가 $\pm 500 \text{ kV/cm}$ 일 때 10^{-8} A/cm^2 이하로 매우 우수하였다. buffer층으로 AlN을 사용함으로써 누설전류밀도 특성이 개선됨을 알 수 있다.

그림 5는 세계 도핑시킨 Si(100) 위에 형성시킨 MFIS 커패시터의 분극-전계에 대한 히스테리시스

특성을 RT-66A 강유전체 측정 시스템을 이용하여 측정한 것이다. 제작된 MFIS 커패시터로부터 측정된 잔류분극 값은 약 $0.5 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 로 나타났으며, 이때의 항전계는 $120\text{kV}/\text{cm}$ 이다.

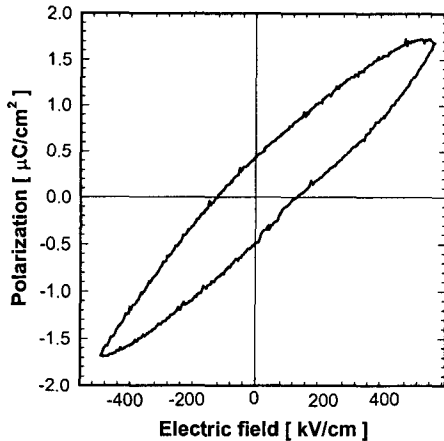


그림 5. RT-66A 강유전체 측정 시스템을 이용하여 측정한 세계 도핑시킨 Si(100) 위에 형성시킨 MFIS 커패시터의 분극-전계에 대한 히스테리시스 곡선.

Fig. 5. P-E hysteresis loop of a MFIS capacitor fabricated on high doped Si(100) substrate using a RT-66A standardized ferroelectric test system.

3. 결론

고유전율 buffer층이 삽입된 Pt/LiNbO₃/AlN/Si(100) 구조의 MFIS 커패시터를 구현하여, 비휘발성 메모리로서의 응용 가능성을 확인하였다. buffer층으로 사용한 AlN 박막을 Pt/AlN/Si(100) 구조를 갖는 MIS 커패시터를 제작하여 1MHz C-V 특성곡선을 평가한 결과, 측정상태로부터 계산한 비유전율 값은 약 8이었다. AlN/Si(100) 구조 위에 LiNbO₃ 박막을 제작한 MFIS 구조에서는 양호한 interface 특성과 LiNbO₃ 박막의 강유전성으로 인한 히스테리시스 특성을 관측됨을 확인하였으며, 이때의 memory window width은 약 1.2 V이었다. 세계 도핑시킨 Si(100) 위에 형성시킨 MFIS 커패시터의 분극-전계에 대한 히스테리시스 특성곡선으로부터 산출한 잔류분극 값은 약 $0.5 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, 항전계는 약 $120\text{kV}/\text{cm}$ 이었다. 이 MFIS 구조에서의 게이트 누설전류밀도는 $\pm 500\text{kV}/\text{cm}$ 의 전계 범위 내에서 $10^{-9}\text{A}/\text{cm}^2$ 범위를 유지하였다. 상기 결과들은 향후 비휘발성 메모리 응용을 위한 MFISFET로의 응용 가능

성이 충분하다고 판단하고 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(98-0300-0901-3)지원으로 수행되었음.

참고 문헌

- [1] J. L. Moll and Y. Tarui, "A new solid state memory resistor", IEEE Trans. Electron Devices, vol. 10, no. 9, pp. 338-339, 1963
- [2] S. Y. Wu, "A New Ferroelectric Memory Devices, Metal - Ferroelectric - semiconductor Transistor", IEEE Trans. Electron Devices, Vol. ED-21, No. 8, pp. 499-504, Aug. 1974.
- [3] K. H. Kim, J. D. Kim, and H. Ishiwara, "Improvement of the Electrical Properties of Metal-Ferroelectric BaMgF₄-Silicon Capacitor by Rapid Thermal Annealing", Appl. Phys. Lett., vol. 66, no. 23, pp. 3143-3145, 1995.
- [4] K. H. Kim, J. D. Kim, and H. Ishiwara, "Properties of Ferroelectric BaMgF₄ on Si (100), (110), and (111) Substrates by Post-Deposition Rapid Thermal Annealing", Jpn. J. Appl. Phys., vol. 35, no. 2B, pp. 1557-1559, 1996.
- [5] Kwang-Ho Kim, "Metal-Ferroelectric-Semiconductor(MFS)FET's Using LiNbO₃/Si (100) Structures For Nonvolatile Memory Operation", IEEE Electron Device Letters, vol. 19, no. 06, pp. 204-206, 1998.
- [6] 김광호, 정순원, 김채규, "LiNbO₃ 강유전체 박막을 이용한 저전압용 MFS 디바이스의 특성", 전자공학회논문지, 제 36권, D편, 제11호, pp. 925-930, 1999.
- [7] Y. Matsui, M. Okuyama, M. Noda and Y. Hamakawa, Appl. Phys., A28, p 161, 1982.
- [8] D. R. Lampe, D. A. Adams, M. Austin, M. Polinsky, J. Dzimianski, S. Sinhaloy, H. Buhay, P. Brabant and Y. M. Liu, Ferroelectrics, 133, p 61, 1992.
- [9] G. A. Slack, "Nonmetallic crystals with high thermal conductivity", J. Phys. Chem. Solids, vol. 34, p 321, 1973
- [10] M. G. Norton, B. C. H. Steele and C. A. Leach, "Characterization and metallization of AlN ceramics", Science of Ceramics, vol. 14, p 545 (1988)