

BaMgF₄/Si 구조를 이용한 비휘발성 메모리용 MFSFET의 제작 및 특성

논문
10-10-9

Fabrication and Properties of MFSFET's Using BaMgF₄/Si Structures for Non-volatile Memory

이상우*, 김광호*
(Sang-Woo Lee, Kwang-Ho Kim)

Abstract

A prototype MFSFET using ferroelectric fluoride BaMgF₄ as a gate insulator has been successfully fabricated with the help of 2 sheets of metal mask. The fluoride film was deposited in an ultra-high vacuum system at a substrate temperature of below 300 °C and an *in-situ* post-deposition annealing was conducted for 20 seconds at 650 °C in the same chamber. The interface state density of the BaMgF₄/Si(100) interface calculated by a MFS capacitor fabricated on the same wafer was about $8 \times 10^{10} / \text{cm}^2 \cdot \text{eV}$. The I_D - V_G characteristics of the MFSFET show a hysteresis loop due to the ferroelectric nature of the BaMgF₄ film. It is also demonstrated that the I_D can be controlled by the "write" pulse, which was applied before the measurements, even at the same "read" gate voltage.

Key Words(중요용어) : BaMgF₄/Si structure (BaMgF₄/Si 구조), Non-volatile memory (비휘발성 메모리), MFSFET (MFS 전계효과 트랜지스터), Ferroelectric film (강유전체 박막)

1. 서 론

현재 많이 사용되고 있는 MISFET (Metal-Insulator-Semiconductor Field-Effect-Transistor) 구조의 절연체를 강유전체 박막으로 대체시킨 트랜지스터(MFSFET)는 비휘발성 메모리(FRAM)¹⁻³⁾뿐만 아니라 기능성 뉴런디바이스⁴⁻⁶⁾의 응용에 기대가 되고 있다. 특히 FRAM은 강유전체 박막의 분극반전과 그 히스테리시스 특성을 이용한 고속, 저소비전력, Data의 비휘발성 등의 장점을 가지고 있어 국내외 많은 연구 개발이 이루어지고 있으며, 현재 DRAM의 Capacitor부분을 강유전체 박막으로 대체시킨 1T/1C구조 또는 2T/2C구조의 FRAM들이 실용화되어 있다. 이러한 구조는 Cell면적의 증가, 공정상의 복잡성 등의 문제점을 초래한다. 이러한 문제를 해결하고 나아가 Cell 한 개로서 이러한 기능

을 가능하게 할 수 있는 구조가 MFSFET이다. 이 구조는 재료적 측면에서 반도체위에 직접적으로 강유전체 박막을 실현하여야 하고, 전기적으로 정상적인 FET동작을 위해서는 강유전체/반도체 계면의 계면준위밀도가 적어야만 한다. 현재까지, Bi₄Ti₃O₁₂, BaTiO₃, PbTiO₃, PZT등 산화물 강유전체들의 연구가 주로 행하여져 왔으며, 이러한 강유전체들은 주로 백금과 같은 금속위에다 형성되어 비교적 양호한 강유전성을 얻고 있다. 그러나, 이들 산화물 강유전체들을 실리콘위에다 직접 형성시킨 상태에서는 강유전성을 얻기는 매우 곤란하기 때문에 구조적, 전기적 특성이 양호한 금속-강유전체-실리콘 구조의 보고는 매우 적다. 그 가장 큰 이유중의 하나는 이들 산화물 강유전체들은 실리콘위에서는 산화물과 반응하여 실리콘산화물을 형성하기 때문에 강유전성을 잃게되며, 따라서 계면에서도 원자적으로 안정되지 않기 때문이다.

최근, 비산화물인 불화물강유전체 BaMgF₄ 박막을 실리콘위에서 분자선 결정성장법(MBE)을 이용하여 성장시킨 연구⁷⁻¹⁰⁾가 행하여지고 있다. 이러한

* : 청주대학교 반도체공학과
접수일자 : 1997년 11월 12일
심사완료 : 1997년 11월 25일

구조에서는 초고진공 상태에서 막을 형성시키기 때문에 전기적으로 양호한 계면특성을 얻을 가능성이 있다. 그러나, 이 불화물 박막은 실리콘 위에서 강유전성은 얻어지고 있으나, 저항을 및 전계강도가 낮고 제특성의 시간에 따른 열화등으로 실제로 MFS 디바이스에 응용하기까지는 문제점도 내포하고 있다. 한편, 초고진공장치를 써서 이러한 불화물 강유전체를 실리콘 위에 형성시켜서 고온 단시간 열처리(RTA)를 행하면 계면준위밀도가 감소하며 전계강도도 증가하고 막의 저항율도 증가하는 연구결과들이 보고¹¹⁻¹²⁾되고 있다.

본 논문에서는 강유전성이 유지되면서 계면특성이 좋은 특성을 얻기 위하여 BaMgF₄를 실리콘 위에 직접적으로 저온에서 형성하여 고온 단시간 열처리를 수행한 후, 이것을 이용하여 MFSFET를 성공적으로 제작한 결과와 비휘발성 메모리로서의 동작 특성에 대하여 논의한다.

2. 실험 및 결과

2.1 MFSFET의 제작

그림 1에 강유전체를 이용한 MFSFET의 제작순서도를 보인다. 본 연구에서는 FET를 제작하는 데에 2장의 메탈마스크를 사용하였다. 저항율이 6~9 Ω·cm인 붕소 도핑된 p-Si 기판을 유기 세정 및 표준 RCA법¹³⁾으로 세정한 후, wet산화법으로 약 1 μm의 열산화막을 형성시켰다. 첫번째 마스크를 사용하여 소스 및 드레인의 n⁺ 영역을 형성시키기 위하여 산화막의 일부분을 에칭시킨 후, P₂O₅ 소스로 1시간 동안 확산시켰다. 이때의 접합깊이는 약 2 μm이다. 확산 후, 표면의 열산화막을 모두 제거시킨 다음에 시료준비실이 설치된 초고진공장치(UHV) 시스템에서 BaMgF₄막을 증착하였다. UHV의 도달진공도는 5×10⁻⁸ Torr 이하이다. BaMgF₄박막은 BaF₂(5N)와 MgF₂(5N)의 덩어리를 같은 조성으로 혼합하여 미리 용융시킨 것을 열적으로 가열하여 증발시켰다. 0.1-0.2 nm/s의 증착속도로 150 nm 두께의 BaMgF₄를 300 °C 이하에서 성장시킨 후, *in-situ*에서 650 °C, 20 초동안 단시간 고온 열처리를 행하였다. 두번째 마스크를 사용하여 소스, 게이트 및 드레인 영역에 Al금속을 증착시켜 트랜지스터를 완성하였다. FET의 전기적 특성 평가는 정밀 반도체 파라미터 분석기(HP4156A)를 사용하였고, 같은 웨이퍼에 동시에 제작한 MFS 커패시터에 대한 1 MHz의 용량-전압(C-V) 측정으로 계면특성을 분석하였다.

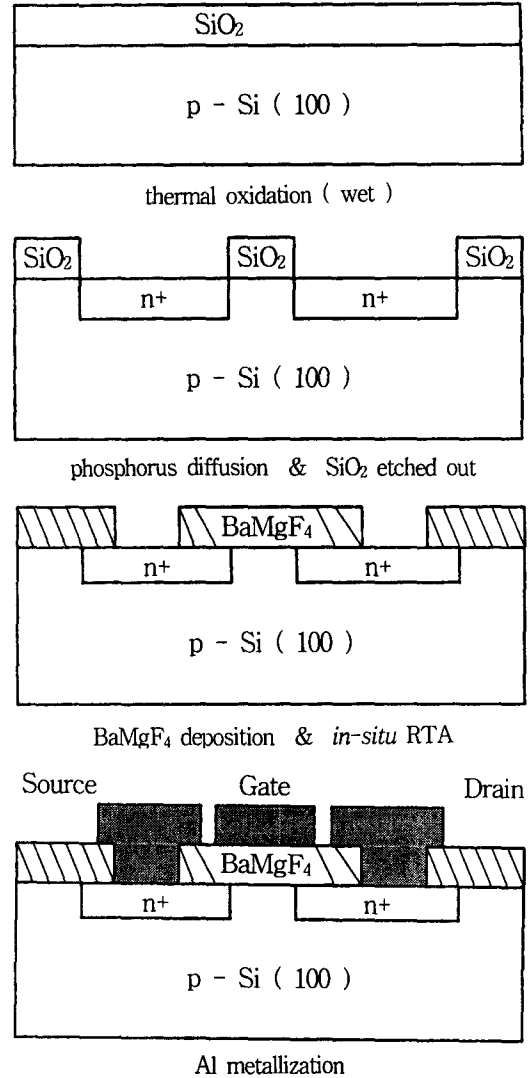


그림 1. 불화물강유전체 BaMgF₄를 이용한 MFSFET의 제작순서도.

Fig. 1. MFSFET fabrication flow chart using ferroelectric fluoride BaMgF₄.

2.2. MFS 커패시터의 특성

그림 2에 트랜지스터를 제작할 때에 동시에 제작한 MFS 커패시터의 1 MHz C-V특성을 보인다. 용량값은 축적에서 반전상태까지 변화하며, 히스테리시스의 방향은 전하 주입에 의한 현상이라기보다는 강유전성의 분극 반전에 의한 현상과 일치한다. 축적상태의 용량값으로부터 산출한 비유전율은 약 13이며, 이 값은 BaMgF₄의 b축방향의 보고된 bulk값⁷⁾(14.75)에 근접하는 값이다. 또한 이 그림에 보인

곡선처럼 대부분의 시료는 음의 방향으로 shift됨을 관측할 수 있는 바, 이는 박막내 및 계면에 존재하는 전하들에 기인하는 것으로 판단하고 있다. 이 C-V곡선으로부터 산출한 에너지 갭내의 계면준위밀도는 midgap 부근에서 약 $8 \times 10^{10} / \text{cm}^2 \cdot \text{eV}$ 이었다.

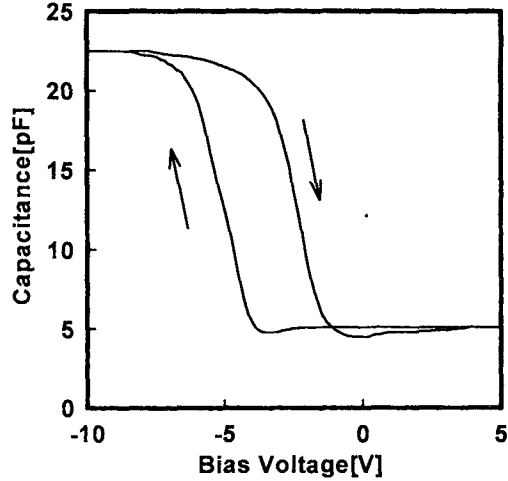


그림 2. FET를 제작할 때 동시에 같은 웨이퍼 위에 제작한 MFS 커패시터의 1 MHz C-V 특성.

Fig. 2. 1 MHz C-V characteristics of a MFS capacitor made on the same wafer.

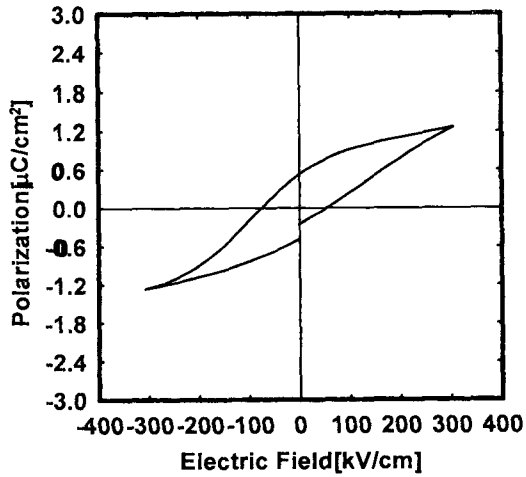
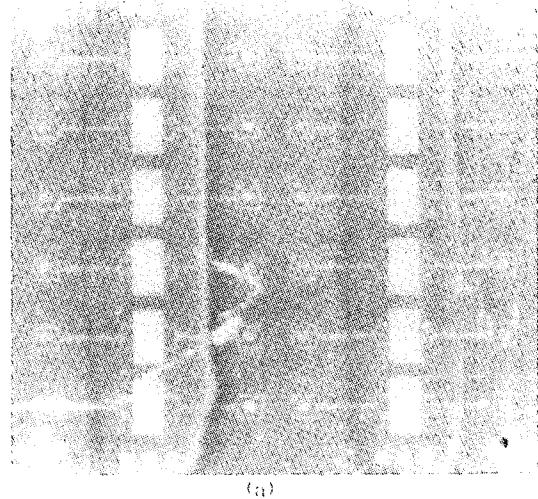


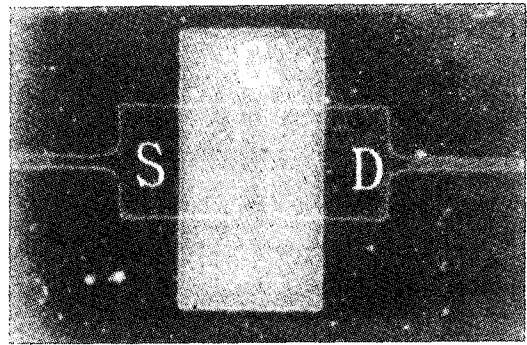
그림 3. Si(100)위에 형성시킨 MFS 커패시터의 분극-전계에 대한 히스테리시스 곡선.

Fig. 3. A hysteresis loop of a MFS capacitor fabricated on Si(100) substrate.

그림 3에 역시 트랜지스터를 제작할 때에 동시에 제작한 MFS 커패시터의 분극-전계에 대한 히스테리시스 곡선을 보인다. 측정된 막의 잔류분극 및 항전계는 각각, 약 $0.5 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 및 약 $80 \text{ kV}/\text{cm}$ 이었다. 이 측정값은 보고⁷⁾된 bulk의 잔류분극값(약 $7-9 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 정도임)보다는 더 작고, 항전계는 보고⁷⁾된 값 ($50 \text{ kV}/\text{cm}$)보다는 약간 크다. 이러한 차이는 현재로서는 확실하게 알 수는 없으나 아마도 결정구조나 결정립의 크기와 같은 결정성^{7,8)}에 원인이 있다고 판단하고 있다.



(a)



(b)

그림 4. 제작한 MFSFET의 전면 사진(a) 및 소스, 드레인, 게이트 부분을 확대한 사진(b).

Fig. 4. The photograph of a fabricated MFS-FET(a) and enlarged part of the FET(b).

2.3. MFSFET의 특성

그림 4에 제작한 트랜지스터의 전면 사진(a)과 트

랜지스터의 소스, 드레인 및 게이트 부분을 확대한 사진(b)을 함께 보인다. 칩 전체의 크기는 10 mm × 10 mm 이다. 이 시료에는 12개의 MFSFET와 계면특성 측정용 MFS 커패시터 12개가 포함되어 있다. FET에 있어서 게이트의 길이 L과 폭 W는 각각 100 μm, 500 μm이다.

그림 5에 MFSFET의 선형영역($V_D=0.1V$)에서의 드레인 전류-게이트 전압 (I_D-V_G) 특성을 보인다. BaMgF₄막의 강유전성으로 인하여 히스테리시스 특성이 관측됨을 알 수 있으며 이는 비휘발성 메모리 동작에 적용할 수 있는 가능성을 보인 것이다. 그래프로부터 산출한 상호컨덕턴스 g_m 은 약 40 μS이며, 전자의 전계효과 이동도는 약 500 cm²/V·s 이다.

그림 6에 MFSFET의 드레인 전류-드레인 전압 (I_D-V_D) 특성을 보인다. 실선과 점선은 각각 게이트에 +20 V 및 -20 V의 write 전압을 1 초동안 인가한 후 측정된 전류-전압 곡선이다. 게이트 전압은 2 V에서 5 V까지 1 V step이다. 특히, V_D 가 5 V에서 write, read 전압을 각각 +20 V, 2 V를 인가한 경우 드레인 포화전류 I_{DS} 는 2.5 mA(ON상태)이었고, 반면 -20 V, 2 V를 인가한 경우에는 I_{DS} 가 50 nA(OFF상태)이었다. 즉, Read 전압 2 V에서 ON상태(2.5 mA)의 드레인 전류는 OFF상태의 전류보다 약 4 order정도 증가했음을 알 수 있다. 이것은 같은 read 전압 2 V에 대해서 미리 인가한 write 전압의 극성을 바꿈으로써 강유전체 BaMgF₄ 박막의 분극이 반전되어 소스-드레인간의 채널이 ON에서 OFF로 변했음을 의미한다. 이것은 제작한 MFSFET가 메모

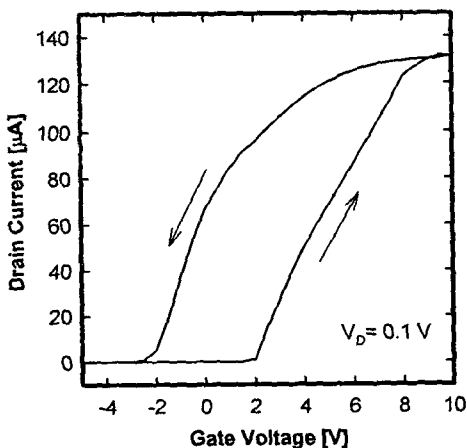


그림 5. MFSFET의 드레인 전류-게이트 전압 특성.

Fig. 5. The I_D-V_G characteristics of the MFSFET.

리로서 동작하는 것을 의미하는 것이다.

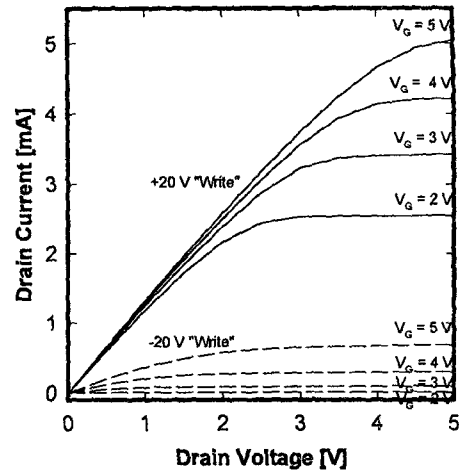


그림 6. MFSFET의 드레인 전류-드레인 전압 특성.
Fig. 6. I_D-V_D characteristics of MFSFET.

3. 결 론

강유전성이 유지되면서 양호한 계면특성을 얻기 위하여 BaMgF₄를 실리콘 위에 직접적으로 300 °C 이하의 저온에서 형성하여 고온 단시간 열처리를 수행하였다. 이 방법에 의해 얻어진 양호한 특성을 기초로 하여 2장의 메탈마스크를 사용하여 고온 단시간 열처리를 공정에 활용하여 MFSFET를 성공적으로 제작하였다. 같은 웨이퍼 위에 동시에 제작한 MFS 커패시터에 있어서, 전형적인 BaMgF₄막의 저항율은 열처리전의 1~2×10¹¹ Ω·cm에서 열처리후의 약 5×10¹³ Ω·cm까지 증가하였으며, 1 MHz의 C-V곡선으로부터 산출한 BaMgF₄/Si(100) 계면의 계면준위밀도는 midgap부근에서 약 8×10¹⁰ /cm²·eV까지 감소하였다. Si(100)위의 강유전체 BaMgF₄막의 잔류분극 및 항전계는 각각, 약 0.5 μC/cm² 및 약 80 kV/cm이었다. 제작한 MFSFET의 I_D-V_G 특성은 BaMgF₄막의 강유전성으로 인하여 히스테리시스 특성이 관측되었고, MFSFET의 드레인 전류는 미리 인가된 write 전압에 의해 제어됨을 알 수 있었다. BaMgF₄/Si 구조를 사용한 MFSFET의 비휘발성 메모리 동작과 적용 가능성이 확인되었다.

* 본 연구는 한국과학재단 핵심전문 연구비 (961-0918-087-1)지원으로 수행되었으며 지원에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. S.-Y. Wu, "A New Ferroelectric Memory Devics, Metal - Ferroelectric - Semiconductor Transistor", IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-21, no. 8, pp. 499-504, Aug. 1974.
2. H. Buhay, S. Sinharoy, W. H. Kasner, M. H. Francombe, D. R. Lampe, and E. Stepke, "Pulsed Laser Deposition and Ferroelectric Characterization of Bismuth Titanate Films", Appl. Phys. Lett., vol. 58, pp. 1470-1472, 1991.
3. T. A. Rost, H. Lin, and T. A. Rabson, "Ferroelectric switching of a field-effect transistor with alithium niobate gate insulator" Appl. Phys. Lett., vol. 59, no. 27, pp. 3654-3656, Dec. 1991.
4. J. L. Moll and Y. Tarui, "A new solid state memory resistor", IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-10, pp. 333-339, Sept. 1963.
5. H. Ishiwara, "Proposal of Adaptive-Learning Neuron Circuits with Ferroelectric Analog-Memory Weights", Jpn. J. Appl. Phys., vol. 32, no. 1B, pp.442-446, Jan. 1993.
6. K.-H. Kim and H. Ishiwara, "Adaptive-Learning Neuron Circuits using Ferroelectric Thin Films", Integrated Ferroelectrics, vol. 5, no. 2, pp.89-95, 1994.
7. S. Sinharoy, H. Buhay, M. G. Burke, D. R. Lampe, and T. M. Pollak, "Growth and the Microstructural and Ferroelectric Characterization of Oriented BaMgF₄ Thin Films", IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr., vol. 38, no. 6, pp. 663-671, Nov. 1991.
8. S. Sinharoy, H. Buhay, M. H. Francombe, W. J. Takei, N. J. Doyle, J. H. Reiger, D. R. Lampe, and E. Stepke, "Growth and characterization of ferroelectric BaMgF₄ films", J. Vac. Sci. Technol., vol. A9, no. 3, pp. 409-413, May/Jun. 1991.
9. S. Sinharoy, D. R. Lampe, H. Buhay, and M. H. Francombe, "UHV processing of ferroelectric barium magnesium fluoride films and devices", Integrated Ferroelectrics, vol. 2, pp. 377-386, 1992.
10. K. Aizawa, H. Ishiwara, and M. Kumagai, "Epitaxial growth of BaMgF₄ films on Si(100) and (111) substrates: An approach to ferroelectric/semiconductor heterostructures", Appl. Phys. Lett., vol. 63, no. 13, pp. 1765-1767, Sep. 1993.
11. 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.
12. 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.
13. K. Werner, and D. A. Puotinen, "Cleaning Solutions Based on Hydrogen Peroxide for use in Silicon Semiconductor Technology", RCA Review, vol. 31, pp. 187-206, June 1970.

저자소개



이상우

1970년 12월 23일생. 1996년 청주대학교 반도체공학과(학사). 1996년-현재 청주대학교 전자공학과 대학원 석사과정.



김광호

1983년 한양대학교 전자공학과(학사). 1984년-1990년 일본 문부성 초청 연구원. 1985년-1987년 일본 동경공업대학 전자시스템(석사). 1987년-1990년 일본 동경공업대학 전자시스템(박사). 1994년 일본 학술진흥재단 초청 동경공업대학 객원연구원. 1990년-현재 청주 대학교 반도체공학과 부교수.