

CF₄/Ar 플라즈마 내 Cl₂첨가에 의한 SrBi₂Ta₂O₉ 박막의 식각 특성

Etching Characteristics of SrBi₂Ta₂O₉ Thin Film with Adding Cl₂ into CF₄/Ar Plasma

김동표*, 김창일*, 이원재**, 유병곤**, 김태형***, 장의구*

(Dong-Pyo Kim*, Chang-Il Kim*, Won-Jae Lee**, Byung-Gon Yu**, Tae-Hyung Kim***, Eui-Goo Chang*)

Abstract

SrBi₂Ta₂O₉ thin films were etched in inductively coupled Cl₂/CF₄/Ar plasma. The maximum etch rate was 1060 Å/min at a Cl₂/(Cl₂+CF₄+Ar)=0.2. The 20% additive Cl₂ into CF₄/Ar plasma decreased carbon and fluorine radicals, but increased Cl radicals. Sr was effectively removed by reacting with Cl radical because the boiling point of SrCl₂ (1250°C) is lower than that of SrF₂ (2460°C). The chemical reactions on the etched surface were studied with x-ray photoelectron spectroscopy and secondary ion mass spectrometry. The etching profile was evaluated by using scanning electron microscopy.

Key Words : SBT, Cl₂/CF₄/Ar plasma, XPS, SIMS

1. 서론

최근 물질 자체의 분극상태를 이용하여 캐패시터에 외부에서 주기적으로 전계를 인가하지 않아도 입력된 데이터를 계속하여 보존할 수 있는 특성을 가진 비휘발성 강유전체 메모리 (ferroelectric random access memory: FRAM) 소자를 제작하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. FRAM 소자 제작을 위하여 PZT(PbZr_xTi_{1-x}O₃), SBT (SrBi_{2-x}Ta₂O₉)와 BLT (Bi_{1-x}La_x)₄Ti₃O₁₂ 등의 유전 상수가 큰 강유전체 박막들이 개발되었다 [1]. 이 중에서 가장 먼저 개발된 PZT는 높은 유전상수와 낮은 결정화 온도를 가지고 있지만, Pb의 유해성과 반복되는 읽기/쓰기

동작을 통하여 잔류 분극량이 감소하는 피로현상과 데이터를 오랜 시간 저장할 경우 히스테리시스 곡선이 한쪽 방향으로 이동하는 imprint 현상과 같은 문제점을 가지고 있다. 최근에는 전극 물질로 금속 산화막 계열의 물질을 사용하여 PZT 박막의 피로현상과 imprint 현상을 개선하였으나, 스위칭 속도는 금속 산화막의 높은 저항 때문에 Pt 전극을 사용하였을 때보다 나쁘고, pyrochlore 상 또는 원하지 않는 강유전체 상이 형성되어 PZT 캐패시터의 전기적 특성을 감소시키는 문제점을 가지고 있다 [2-4]. 이러한 단점을 극복하기 위하여 (BiO₂)²⁺ 층상 구조를 가지는 SBT 박막이 개발되었다. SBT 박막 내의 (BiO₂)²⁺ 층은 피로 특성의 원인인 산소 원소의 결핍을 보상하여 낮은 누설 전류밀도와 피로 특성이 없는 캐패시터를 형성할 수 있다. SBT 박막은 sol-gel법, MOD (metalorganic depositon)법, sputter 법과 MOCVD (metalorganic chemical vapor deposition)법 등과 같은 다양한 방법을 사용하여 우수한 특성의 SBT 박막 형성할 수 있다 [5-10]. 많은 연구의 결과로 SBT 박막 형성은 안정적으로 확보할 수 있는 단계에 이르렀으나, 그러나 고집적화

* : 중앙대학교 전기전자공학부
(서울시 동작구 흑석동 221,
Fax : 02-812-9651
E-mail : dpkim@ms.cau.ac.kr)

** : 한국전자통신연구소

*** : 여주대학 전기과

2001년 5월 3일 접수, 2001년 6월 1일 1차심사완료

2001년 7월 25일 2차심사완료

된 FRAM 소자를 제작하기 위하여서는 SBT 박막을 패터닝 할 수 있어야 하는데 이에 대한 연구는 미미한 실정이다. FRAM 소자의 고집적화를 위하여 빠른 식각 속도, 70° 이상의 식각 형상과 ±0.02 μm의 CD 조절이 가능한 식각 공정이 필요하다 [11]. Desu 등은 CHCl₃, SF₆ 가스와 RIE (reactive ion etching) 공정을 사용하여 경우 낮은 식각 속도와 높은 공정 압력 때문에 식각 부산물이 SBT 표면에 잔류하게 되어 박막의 특성을 저하시키는 문제점을 가지고 있음을 발표하였다 [12]. 이를 개선하기 위하여 본 연구팀은 MEICP (식각 가스: CHF₃/Ar, CF₄/Ar)와 ICP (식각 가스: CF₄/Ar, Cl₂/Ar) 식각장비를 이용하여 SBT 박막을 식각한 이전의 실험에서 RIE 식각장비 보다 빠른 식각 속도를 얻었으나, 70° 이상의 식각 형상을 확보하지 못하였다. 이전 실험의 결과에서 Cl₂/Ar 가스 보다 CF₄/Ar 가스에서 보다 빠른 식각 속도를 얻었다 [13-15].

따라서, 본 연구에서는 Sr의 효율적인 제거와 수직한 식각 형상을 확보하기 위하여 SBT 박막을 Cl₂를 첨가한 CF₄/Ar 혼합가스와 ICP 식각 장비를 이용하여 식각하였다. 식각 형상의 변화는 SEM (scanning electron microscopy)을 이용하여 관찰하였고, 식각된 시료 표면에서의 화학적인 결합 상태를 관찰하기 위하여 XPS (x-ray photoelectron spectroscopy) 분석과 SIMS (secondary ion mass spectrometry) 분석을 수행하였다.

2. 실험 방법

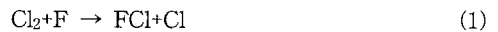
SBT 박막 증착을 위하여 비저항 0.85~1.15 Ω·cm의 (100) p형 실리콘 웨이퍼를 사용하였고, 그 위에 6000 Å의 SiO₂층을 열산화법을 이용하여 성장하였다. 전극과 SiO₂층의 접착력을 강화하기 위하여 1000 Å의 Ti층이 증착되었으며, 1000 Å의 Pt가 스퍼터링 방법으로 증착된다. SBT 박막은 MOD 방법을 이용하여 Pt 위에 증착하였다. 0.8:0.4:2.0 몰 비율의 Sr:Bi:Ta 혼합 용액은 Pt 위에 spin-coating 된 후, hot plate 위에서 400°C에서 10분 동안 pre-baking 하였다. Pre-baking 된 SBT 박막은 perovskite 상 형성을 위하여 O₂ 분위기 아래에서 10분 동안 800°C에서 열처리하였다. 최종 SBT 박막의 두께는 약 2000 Å이었다.

본 실험에 이용된 ICP 식각 장비는 플라즈마의 발생과 dc self-bias를 위하여 13.56 MHz의 rf 전력이 각각 상·하부의 전극에 인가하였다. Cl₂ 첨가에 의한 식각속도와 식각 형상의 변화를 고찰하였다.

Cl₂/(Cl₂+CF₄+Ar) 혼합가스에서 Cl₂ 가스 첨가량은 0~30%이었다. 다른 식각 변수인 rf 전력은 600 W, 직류전압은 200 V로 고정하였다. 반응로의 압력은 throttle 밸브를 이용하여 15 mTorr로 고정하였다. 식각 속도는 Tencor α-step surface profiler를 이용하여 측정하였고, 식각 형상은 SEM을 이용하여 관찰하였다. SBT 박막 표면에서의 화학결합 상태의 변화는 VG Scientific 사의 ESCALAB 220-IXL를 이용하여 XPS 분석을 수행하였다. 에너지원으로는 250 W Al Kα (1486.6 eV) 방사(radiation)를 사용하였으며, 검출된 원소의 화학적 결합상태 분석을 위한 narrow scan 분석은 Ep=20 eV로 수행하였다. XPS 분석 결과를 비교하기 위하여 CAMECA IMS6F SIMS로 질량 분석을 수행하였다. SIMS의 광원으로는 1.11 kV와 10.68~10.92 nA의 Cs⁺ 이온이 이용되었다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 Cl₂/(Cl₂+CF₄+Ar)에서 Cl₂ 혼합비에 대한 SBT 박막의 식각 속도와 SBT 박막에 대한 PR의 식각 선택비를 나타내고 있다. Cl₂ 가스가 0%에서 20%까지 증가하였을 때, SBT의 식각 속도는 980 Å/min에서 1060 Å/min 증가하였고, Cl₂ 가스가 20% 이상 증가하면서, SBT의 식각 속도는 960 Å/min로 감소하였다. PR에 대한 SBT의 식각 선택비는 Cl₂ 가스가 증가함에 따라 계속 감소하였다. 이는 Cl₂ 가스가 20%까지 증가함에 따라서, 다음의 반응에 의하여



Cl 라디칼이 Cl₂/Ar 플라즈마에서 보다 증가하였고 이 증가된 Cl 라디칼에 의하여 SrCl₂이 같은 결합이 증가하였고, SrF₂의 결합이 감소하여 식각 속도가 증가하였다고 생각된다. 왜냐하면 SrCl₂의 boiling point (1250°C)와 결합력(406 ± 13 D°/kJmol⁻¹)이 SrF₂의 boiling point (2460°C)와 결합력(504 ± 6 D°/kJmol⁻¹)보다 낮기 때문으로 판단된다. 그리고 30% 이상의 Cl₂ 첨가시의 식각 속도의 감소는 위의 식 (2)의 반응 메커니즘에 따른 Cl의 감소에 의한 영향으로 판단된다. 그러므로, 20%의 Cl₂ 가스가 CF₄/Ar 가스에 첨가되어 SBT 박막의 chemically assisted reactive ion etching이 증가시켜 식각 속도가 향상되었음을 알게 되었다.

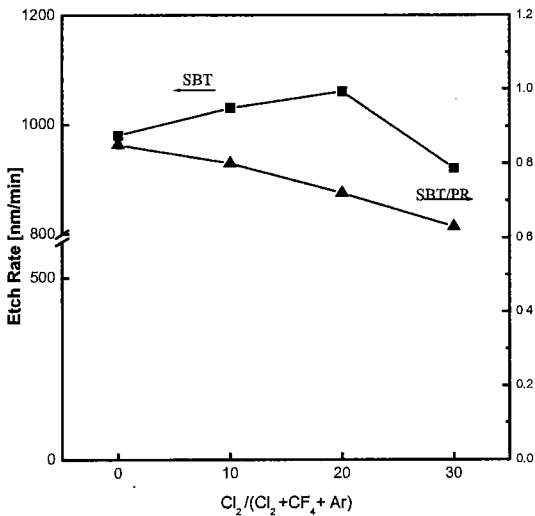


그림 1. Cl₂/(Cl₂+CF₄+Ar) 가스 혼합비에 대한 SBT의 식각 속도 변화와 PR에 대한 SBT 박막 식각 선택비의 변화. (RF power 600 W, dc-bias 전압 -200 V, 반응로의 압력 15 mTorr)

Fig. 1. The etch rate of SBT and the selectivity of SBT to photoresist as a function of Cl₂/(Cl₂+CF₄+Ar) gas mixing ratio. (RF power of 600 W, dc-bias voltage of -200 V, and chamber pressure of 15 mtorr)

ICP 식각 과정에서 SBT 박막과 Cl₂/CF₄ 식각 가스의 화학 반응을 연구하기 위하여, Cl₂ 첨가 전후 SBT 표면의 XPS narrow scan 스펙트럼을 분석하였다.

그림 2는 (a) Cl₂/(Cl₂+CF₄+Ar)=0 (b) Cl₂/(Cl₂+CF₄+Ar)=0.2 가스 혼합비에서 식각된 SBT 박막의 표면에서 추출한 표면에서 추출한 Sr 3d narrow 스펙트럼이다. 그림 2에 나타난 바와 같이 Sr 3d는 doublet의 형태를 가지고 있으며, Sr 3d_{5/2}-O 결합과 Sr 3d_{3/2}-O결합이 각각 135.2 eV와 137.3 eV의 결합에너지에서 나타나고 있다. 순수한 Sr 결합은 그 양이 적기 때문에 나타나지 않고 있다고 판단된다. 그림 2 (a)에서 F 라디칼과 반응한 Sr-F 결합이 Sr-O 결합보다 약 0.5 eV 낮은 결합에너지에서 나타나고 있다. 이는 Sr이 F 라디칼과 반응을 하여 SBT 박막 표면에 잔류하고 있음을 알 수 있다. 그림 2(b)에서 Sr과 Cl이 반응한 Sr-Cl 결합이 Sr-O

결합보다 약 0.7eV 낮은 결합에너지에서 존재하리라 예상되지만 Sr-F 결합과의 결합에너지가 거의 차이가 나지 않으므로 혼재하고 있으리라 판단된다.

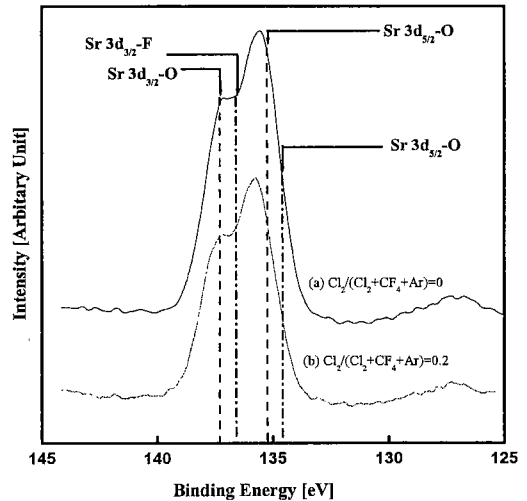


그림 2. Cl₂ 가스 혼합비에 따라 식각된 SBT 박막 표면에서 추출한 Sr 3d XPS narrow scan 스펙트럼. (a) Cl₂/(Cl₂+CF₄+Ar)=0 (b) Cl₂/(Cl₂+CF₄+Ar)=0.2

Fig. 2. The Sr 3d XPS narrow scan spectra of SBT surface etched as a function of Cl₂ gas mixing ratio. (a) Cl₂/(Cl₂+CF₄+Ar)=0 (b) Cl₂/(Cl₂+CF₄+Ar)=0.2

그림 3은 (a) Cl₂/(Cl₂+CF₄+Ar)=0 (b) Cl₂/(Cl₂+CF₄+Ar)=0.2 가스 혼합비에서 식각된 SBT 박막의 표면에서 추출한 표면에서 추출한 Bi 4f narrow scan 스펙트럼이다. 그림 3에 나타난 바와 같이 Bi 4f도 doublet의 형태를 가지고 있으며, Bi 4f_{7/2}-O 결합과 Bi 4f_{5/2}-O결합이 각각 166.7 eV와 171.9 eV의 결합에너지에서 나타나고 있다. 그림 3 (a)에서 순수한 Bi 결합이 169.8 eV와 164.6 eV 결합에너지에서 나타나고 있으며, F 라디칼과 반응한 Bi-F 결합은 보이지 않고 있다. 이는 BiF₅의 용점이 270 °C 낮고, Bi의 스퍼터링 효율이 높아서 쉽게 SBT 박막 표면에 분리되기 때문이라 사료된다. 그림 3 (b)에서 Bi과 Cl이 반응한 결합과 순수한 금속 Bi 결합이 나타나지 않고 있다. 이는 BiCl₃ 결합 역시 용점이 440 °C로 낮기 때문에 쉽게 SBT 박막 표면에 분리되었다고 판단된다. 소량의 Cl₂ 첨가에 의하여 금속 Bi 결합의 생성을 줄일 수 있었다.

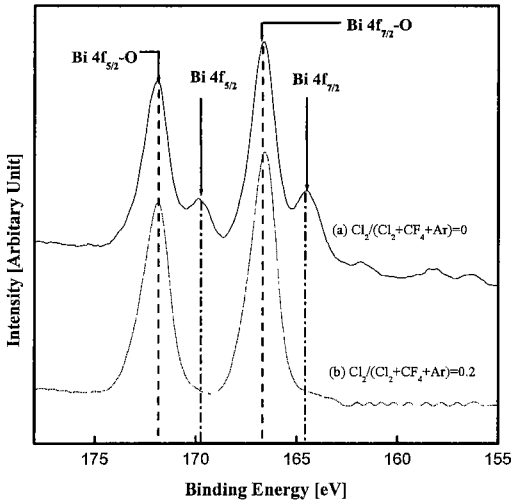


그림 3. Cl₂ 가스 혼합비에 따라 식각 된 SBT 박막 표면에서 추출한 Bi 4f XPS narrow scan 스펙트럼. (a) Cl₂/(Cl₂+CF₄+Ar)=0 (b) Cl₂/(Cl₂+CF₄+Ar)=0.2

Fig. 3. The Bi 4f XPS narrow scan spectra of SBT surface etched as a function of Cl₂ gas mixing ratio. (a) Cl₂/(Cl₂+CF₄+Ar)=0 (b) Cl₂/(Cl₂+CF₄+Ar)=0.2

그림 4는 (a) Cl₂/(Cl₂+CF₄+Ar)=0 (b) Cl₂/(Cl₂+CF₄+Ar)=0.2 가스 혼합비에서 식각된 SBT 박막의 표면에서 추출한 Ta 4f narrow scan 스펙트럼이다. 그림 4에서 Ta 4f_{7/2}-O 결합이 Ta 4f_{5/2}-O 결합이 각각 26.5 eV와 28.6 eV에서 나타나고 있다. 그림 4 (a)에서 Ta과 F 라디칼과 반응한 Ta-F 결합이 각각 27.0 eV와 29.4 eV에서 나타나고 있다. 그림 4 (b)에서 Ta이 Cl 라디칼과 반응한 Ta-Cl 결합이 Ta-F 결합과 혼재되어 있어서 잘 구분이 되지 않고 있다.

그림 5는 (a) Cl₂/(Cl₂+CF₄+Ar)=0 (b) Cl₂/(Cl₂+CF₄+Ar)=0.2 가스 혼합비에서 식각된 SBT 박막의 표면에서 추출한 F 1s narrow scan 스펙트럼이다. 그림 5에서 F-C 결합과 F-M(Sr,Ta) 결합이 각각 685.6 eV와 677.3 eV에서 나타나고 있다. 그림 5 (b)에서 F-C 결합이 스펙트럼 (a)보다 작게 나타나고 있다. 이는 CF₄가 식 (1)과 (2)와 같은 반응에 의하여 Cl₂와 반응을 하여 Cl 라디칼의 증가에 반응에 기여하였기 때문으로 판단된다.

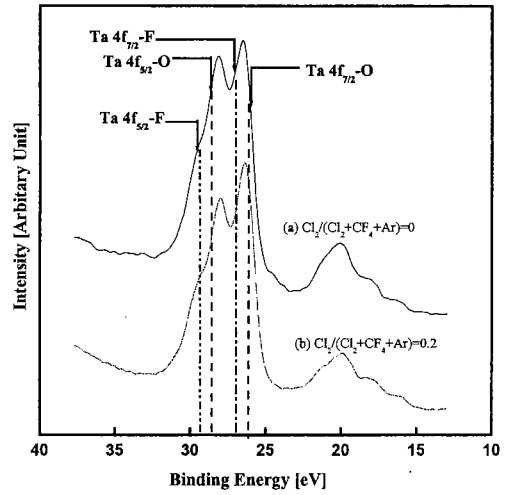


그림 4. Cl₂ 가스 혼합비에 따라 식각 된 SBT 박막 표면에서 추출한 Ta 4f XPS narrow scan 스펙트럼. (a) Cl₂/(Cl₂+CF₄+Ar)=0 (b) Cl₂/(Cl₂+CF₄+Ar)=0.2

Fig. 4. The Ta 4f XPS narrow scan spectra of SBT surface etched as a function of Cl₂ gas mixing ratio. (a) Cl₂/(Cl₂+CF₄+Ar)=0 (b) Cl₂/(Cl₂+CF₄+Ar)=0.2

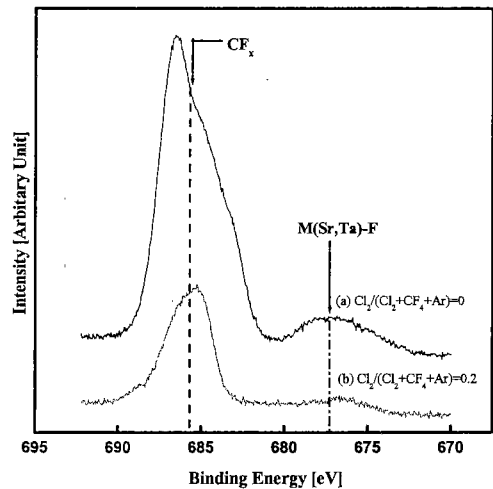


그림 5. Cl₂ 가스 혼합비에 따라 식각 된 SBT 박막 표면에서 추출한 F 1s XPS narrow scan 스펙트럼. (a) Cl₂/(Cl₂+CF₄+Ar)=0 (b) Cl₂/(Cl₂+CF₄+Ar)=0.2

Fig. 5. The F 1s XPS narrow scan spectra of SBT surface etched as a function of Cl₂ gas mixing ratio. (a) Cl₂/(Cl₂+CF₄+Ar)=0 (b) Cl₂/(Cl₂+CF₄+Ar)=0.2

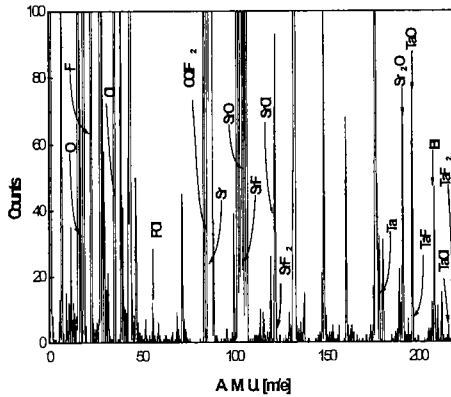


그림 6. $Cl_2/(Cl_2+CF_4+Ar)=0.2$ 가스 혼합비에서 식각된 SBT 박막 표면에서 추출한 SIMS 결과.

Fig. 6. The result of SIMS analysis on the SBT surface etched in $Cl_2/(Cl_2+CF_4+Ar)=0.2$ gas mixing ratio.

그림 6은 $Cl_2/(Cl_2+CF_4+Ar)=0.2$ 가스 혼합비에서 식각된 SBT 박막 표면에서 추출한 질량 분석 결과를 나타내고 있다. 그림 6에서 SBT 박막을 구성하고 있는 Sr, Bi, Ta, O와 식각 부산물인 Sr-Cl, TaCl, Sr-F 및 Ta-F이 검출되었다. XPS 분석에서 나타난 결과를 SIMS를 이용하여 검증하였다.

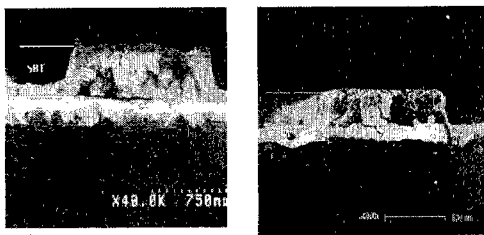
그림 7은 (a) $Cl_2/(Cl_2+CF_4+Ar)=0$ (b) $Cl_2/(Cl_2+CF_4+Ar)=0.2$ 가스 혼합비에서 식각된 SBT 박막의 식각 단면을 나타내고 있다. 그림 7(a) 와 (b)에 나타난 바와 같이 각각 시료의 식각 단면은 깨끗하였고, Cl_2 가 첨가 된 경우 SBT 박막 패턴의 양 모서리에서 ear 형상이 없는 80° 의 식각 형상을 얻었다.

4. 결론

0%에서 20% 까지 Cl_2 가 첨가되었을 때, SBT 박막의 최대 식각 속도는 증가하였고, Cl_2 가스양이 20%이상 증가하였을 때, SBT의 식각 속도가 감소하였다. XPS와 SIMS 분석 결과로부터 금속 (Sr, Ta)-할로젠 (F과 Cl) 결합의 존재를 확인하였고, SBT 박막 표면에서의 F-C 결합과 F-M 결합이 Cl_2 가스를 첨가 한 경우에 감소함을 확인하였다. 그리고, 소량의 Cl_2 를 첨가한 경우 80° 의 식각 형상과 SBT 박막 패턴의 양 모서리에 ear가 없는 깨끗한 식각 단면을 얻을 수 있었다. 이들 결과로부터 SBT 박막은 Ar 이온에 의해 Sr-O, Bi-O Ta-O의 형태로 분리되고, 금속-산소 결합보다 금속-불소 또는 염소의 결합 존재 할 때 Ar 이온에 의한 스퍼터링 효과가 증대되어 SBT의 식각 속도가 증가되었다고 판단된다. 그리고, Cl의 첨가에 의하여 Sr이 효율적으로 제거되기 때문에 식각 형상이 개선되었다고 판단된다.

참고 문헌

- [1] 강남수, "FRAM소자의 제조 기술 현황", 전자전기재료, 13권 4호, pp. 715-722, 1998.
- [2] T. Y. Kim, D. S Kim, and C. W. Chung, "Effects of oxide electrode on $PbZr_xTi_{1-x}O_3$ thin films prepared by metalorganic chemical vapor deposition", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 36(10), pp. 6494-6499, 1997.
- [3] K. Amanuma, T. Hase, and Y. Miyasaka, "Fatigue characteristics of Sol-Gel derived $Pb(Zr, Ti)O_3$ thin films", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 33(9B), pp. 5211-5214, 1994.
- [4] H. S. Lee, K. H. Auh, M. S. Jeon, W. S. Um, I. S. Lee, G. P. Choi, and H. G. Kim, "Imprint of oriented $Pb(Zr, Ti)O_3$ thin films with oxygen atmosphere in cooling process",



(a) (b)

그림 7. 식각 후 SEM을 이용하여 촬영한 SBT 박막의 식각 단면 사진.(a) $Cl_2/(Cl_2+CF_4+Ar)=0$, (b) $Cl_2/(Cl_2+CF_4+Ar)=0.2$

그림 7. The cross-sectional SEM images of SBT etched in. (a) $Cl_2/(Cl_2+CF_4+Ar)=0$, (b) $Cl_2/(Cl_2+CF_4+Ar)=0.2$

- Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 37(10), pp. 5630-5633, 1998.
- [5] 정병석, 신동석, 윤희성, 김병호, "MOD법에 의한 강유전성 $Sr_xBi_yTa_2O_{9+z}$ (SBT) 박막의 제조 및 후열처리 효과에 관한 연구", 전기전자재료 학회논문지, 11권 3호, pp. 229-236, 1998.
- [6] K. Aizawa, E. Tokumitsu, K. Okamoto, and H. Ishiwara, "Impact of face-to-face annealing in preparation of sol-gel-derived $SrBi_2Ta_2O_9$ thin films", Appl. Phys. Lett., Vol. 76(18), pp. 2609-2611, 2000.
- [7] A. Lia, D. Wu, H. Ling, T. Yu, M. Wang, X. Yin, Z. Liu, and N. Ming, "Effect of excess bismuth on the microstructures and electrical properties of strontium bismuth tantalate SBT thin films", Thin Solid Films, Vol. 375, pp. 215-219, 2000.
- [8] M. Noda, H. Sugiyama, and M. Okuyama, "A Study on a metal-ferroelectric-oxide-semiconductor structure with thin silicon oxide film using $SrBi_2Ta_2O_9$ ferroelectric films prepared by pulsed laser deposition" Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 38(9), pp. 5432-5436, 1999.
- [9] T. Masuda, Y. Miyaguchi, K. Suu, and S. Sun, "Preparation of $SrBi_2Ta_{1.5}Nb_{0.5}O_9$ ferroelectric thin films by RF sputtering on large substrate", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 39(9), pp. 5460-5464, 2000.
- [10] J. F. Roeder, B. C. Hendrix, F. Hintermaier, D. A. Desrochers, T. H. Baum, G. Bhandari, M. Chappuis, P. C. Van Buskirk, C. Dehm, E. Fritsch, N. Nagel, H. Wendt, H. Cerva, W. Hönlein, and C. Mazuré "Ferroelectric Strontium Bismuth Tantalate thin films deposited by metalorganic chemical vapour deposition (MOCVD)" J. Eur. Ceram. Soc., Vol. 19, pp. 1463-1466, 1999.
- [11] S. P. DeOrnellas and A. Cofer, "Integrating ferroelectrics", Solid State Technol., Vol. 41, pp 53-, 1998.
- [12] S. B. Desu and W. Pan, "Reactive ion etching of ferroelectric $SrBi_2Ta_xNb_{2-x}O_9$ thin films", Appl. Phys. Lett., Vol. 68(4), pp. 566-568, 1996.
- [13] J. W. Seo, D. H. Lee, W. J. Lee, B. G. Yu, K. H. Kwon, G. Y. Yeom, E. G. Chang, and C. I. Kim, "Etching characteristics of $SrBi_2Ta_2O_9$ film with Ar CHF_3 plasma", J. Vac. Sci. Technol. A, 18(4), pp. 1354-1358, 2000.
- [14] D. P. Kim and C. I. Kim, "The etching characteristics of $SrBi_2Ta_2O_9$ thin film in CF_4/Ar plasma using magnetically enhanced inductively coupled plasma", Thin Solid Films, Vol. 385, pp. 162-166, 2001.
- [15] 김동표, 김창일, 이원재, 유병근, 김태형, 장의구, "Ar/ Cl_2 식각 후 SBT 박막의 표면에 관한 연구", 한국전자전기재료학회 추계학술대회 논문집, 13권 1호, pp. 363-366, 2000.