

유도결합 플라즈마에 의한 (Ba,Sr)TiO₃ 박막의 식각 손상에 관한 연구

Damages of Etched (Ba,Sr)TiO₃ Thin Films by Inductively Coupled Plasmas

최성기, 김창일, 장의구

(Sung-Ki Choi, Chang-Il Kim, Eui-Goo Chang)

Abstract

High dielectric (Ba,Sr)TiO₃ thin films were etched in an inductively coupled plasma (ICP) as a function of Cl₂/Ar gas mixing ratio. Under Cl₂(20)/Ar(80), the maximum etch rate of the BST films was 400 Å/min and selectivities of BST to Pt and PR were obtained 0.4 and 0.2, respectively. Etching products were redeposited on the surface of BST and resulted in varying the nature of crystallinity. Therefore, we investigated the etched surface of BST by x-ray photoelectron spectroscopy (XPS), atomic force microscopy (AFM) and x-ray diffraction (XRD). From the result of XPS analysis, we found that residues of Ba-Cl and Ti-Cl bonds remained on the surface of the etched BST for high boiling point. The morphology of the etched surface was analyzed by AFM. A smooth surface (roughness ~2.8 nm) was observed under Cl₂(20)/Ar(80), rf power of 600 W, dc bias voltage of -250 V and pressure of 10 mTorr. This changed the nature of the crystallinity of BST. From the result of XRD analysis, the crystallinities of the etched BST film under Ar only and Cl₂(20)/Ar(80) were maintained as similar to as-deposited BST. However, intensity of BST(100) orientation under Cl₂ only plasma was abruptly decreased. This indicated that Cl compounds were redeposited on the etched BST surface and resulted in changes of the crystallinity of BST during the etch process.

Key Words : (Ba,Sr)TiO₃(BST), plasma etching, damage, ICP, XPS, AFM, XRD

1. 서론

Barium strontium titanate ((Ba,Sr)TiO₃; BST) 박막은 기가 비트(giga bit)급 DRAM (dynamic random access memory) 메모리 셀을 구성하는 전

하 축적 커패시터 (charge storage capacitor)의 새로운 유전체 물질로서 현재 많은 주목을 받고 있다. BST 박막은 높은 유전상수, 피로 (fatigue), 에이징 (aging)와 낮은 누설 전류의 특징을 가지고 있으며, 온도에 대하여 상대적으로 작은 전기적 특성의 변화를 가지고 있다. 또한 고유전율의 박막에서 나타나는 유전체 손실 (dielectric loss) 현상이 다른 고유전율의 물질보다 상대적으로 낮은 값을 가지고 있다.[1] 이러한 BST 박막은 박막의 형성에 중점을 두고 많은 연구가 진행되어 실제 소자에 적용 가능한

중앙대학교 전기전자공학부
(서울시 동작구 흑석동 221,
FAX : 02-812-9651
E-mail: cikim@cau.ac.kr)

2001년 1월 15일 접수, 2001년 2월 12일 1차심사완료
2001년 9월 3일 2차심사완료, 2001년 9월 19일 3차심사
완료

안정된 BST 박막을 형성하는 단계에 이르렀다. 그러나 기가 비트급의 DRAM을 실현하기 위해서는 높은 선택비와 우수한 공정 제어로 비등방성 패터닝이 가능한 플라즈마 식각 공정 기술의 개발이 필수적이다. Pt와 BST 박막의 패터닝(patterning)에 관한 연구는 현재까지 초기 단계에 있으며 [2-6], 식각 공정 시 플라즈마에 노출된 박막의 물리적/전기적 특성의 감소, 또는 소자의 특성을 변화시키는 단점이 존재한다. 소자 집적도가 증가함에 따라, LSI (large scale integration) 소자에서는 나타나지 않던 플라즈마에 의한 손상이 VLSI (very large scale integration) 소자의 특성에 영향을 주게 되었다. 플라즈마에 의한 손상은 다음과 같이 크게 4가지로 분류할 수 있다. (1) 잔류물에 의한 오염, (2) 플라즈마에 의한 입자의 침투, (3) 결합 왜형(bonding disruption)과 (4) 전류 흐름에 의한 손상(current flow damage)로 구분할 수 있다.[7] 전식 식각 이후의 표면 잔류물은 실리콘의 쇼트키 장벽(Schottky barrier)의 높이를 변화시켰으며, 콘택 홀(contact hole)을 위한 실리콘 기판 위의 SiO₂ 식각에서 콘택 홀의 접촉저항을 증가시켰다. 플라즈마에 노출된 SiO₂의 표면은 거칠기의 변화에 의하여 그 박막의 질이 감소하였다. 따라서 BST 박막의 식각 공정 후에 발생하는 잔류물에 의한 오염과 플라즈마에 의한 결정상의 변화에 관하여 본 논문에서 연구하였다.[8-10]

본 논문에서는 BST 박막을 Cl₂/Ar의 혼합된 가스를 사용한 ICP (inductively coupled plasma)를 이용하여 식각하였다. ICP 식각 장비는 수mTorr에서 10¹²/cm³의 이온과 전자의 밀도를 가지고 있다. Cl₂/Ar 가스의 혼합비에 따라 식각된 BST 박막 표면의 화학적 상태의 변화를 관찰하기 위하여 XPS (x-ray photoelectron spectroscopy) 분석을 수행하였다. 플라즈마에 의한 식각 손상을 조사하기 위하여 XRD(x-ray diffraction)와 AFM(atomic force microscopy)을 사용하여 박막의 결정성과 표면 거칠기를 관찰하였다.

2. 실험 방법

본 실험을 위하여 0.85~1.15 Ω.cm의 비저항을 갖는 p형, 5인치 실리콘 웨이퍼를 기판으로 사용하였고, 기판을 1 : 4의 H₂SO₄ : H₂O₂ 및 10 : 1의 H₂O : HF 용액과 탈 이온수(deionized water)로 세척한 후 420 °C에서 SiH₄ 및 O₂ 가스를 사용한 저압화학증착

법(LPCVD : low pressure chemical vapor deposition)으로 6000Å의 TEOS(tetraethyl orthosilicate)막을 증착하였다. TEOS막을 증착시킨 후 Pt 박막의 점착력을 개선하기 위하여 1000Å의 Ti막을 스퍼터 증착 하였다. Ti막 위에 Varian 3180 스퍼터링 시스템을 사용하여 상온, 6 mTorr 분위기 하에서 Pt 타겟을 사용하여 2000Å 두께의 Pt 박막을 스퍼터링 하여 증착 하였다. Pt 박막을 증착 후 BST 박막을 증착하였다. BST 박막은 5인치 (Ba_{0.5}Sr_{0.5})TiO₃ 세라믹 단일 타겟을 사용하여 rf Anelva SPF-201B 스퍼터 시스템에 의하여 증착 되었다. BST 박막의 증착은 80% Ar과 20% O₂가스 조성으로 80 W, 5 mTorr 압력에서 수행되었다. BST 박막의 유전상수는 1 [kHz]에서 1020 이었고, 유전손실은 0.02로 양호하게 나타났다. BST 박막의 두께는 약 3000 Å 이었다.

본 연구에서 ICP 식각장비를 이용하여 Cl₂/Ar 가스 혼합비를 변화하면서 BST 박막과 감광막의 식각률의 변화와 BST 박막의 감광막과 Pt 박막에 대한 식각 선택비의 변화를 고찰하였다. 다른 식각 공정 변수인 rf전력, dc 바이어스 전압, 기판온도와 반응로의 압력은 표 1과 같이 일정하게 유지하였다 [3].

표 1. (Ba,Sr)TiO₃ 박막의 식각 조건.

Table 1. Etching conditions of (Ba,Sr)TiO₃ thin films.

RF 전력	dc-바이어스 전압	기판온도	반응로의 압력
600 W	-250 V	25 °C	10 mTorr

식각된 BST 박막은 시료의 표면 조성 및 화학적 결합 상태의 분석을 위하여 VG Scientific 사의 ESCALAB 220-IXL XPS로 수행하였다. 에너지원으로는 250 W의 Al Kα (1486.6 eV) 방사(radiation)를 사용하였으며, 시료의 표면 조성 분석을 위한 wide scan 분석은 pass energy (E_p)를 100 eV로, 검출된 원소의 화학적 결합상태 분석을 위한 narrow scan 분석은 E_p=20 eV(혹은 40 eV)로 수행하였다. 시료의 morphology를 조사하기 위하여 PSI사의 Autoprobe CP AFM을 이용하여 1.0 μm×1.0 μm의 면적으로 스캔하여 관찰하였다. BST 박막의 식각후 결정성의 변화를 분석하기 위하여 Rigaku사의 RTP 300 RC XRD를 이용한 분석도 수행하였다. 에너지원은 Cu Kα (λ = 1.54 Å) 방사를 이용하였고 튜

브의 전압과 전류는 40 kV와 30 mA 이었다.

3. 결과 및 검토

BST 박막은 Cl₂/Ar 가스 혼합비를 변화시키면서 ICP를 이용하여 식각하였다. 그림 1은 BST, 감광막(photoresist)의 식각률과 BST 박막의 감광막과 Pt 박막에 대한 식각 선택비를 나타낸다. 그림 1에서 보는바와 같이 Cl₂/Ar 가스 혼합비가 20% 까지 증가함에 따라 BST 박막의 식각률도 증가하였다. 그러나 Cl₂/Ar 가스 혼합비가 20% 이상 Cl₂ 농도가 증가함에 따라 BST, 박막의 식각률은 점차 감소하였다. 이것은 BST 박막의 식각은 Cl 이온에 의한 화학적 식각 보다는 Ar 이온에 의한 스퍼터링이 더욱 효과적임을 나타낸다. 반면에 포토레지스트의 경우는 Cl₂/Ar 가스 혼합비가 증가함에 따라 그 식각률은 증가한다. 이것은 감광막의 식각은 화학적 반응에 의한 식각에 더욱 의존하고 있기 때문이다. 결과적으로 Cl₂/Ar 가스 혼합비가 증가함에 따라 BST 박막과 포토레지스트의 선택비는 감소하게 된다. Cl₂/Ar 가스 혼합비가 20%에서 BST 박막은 400 Å/min로 최대 식각률을 나타냈으며 이때 Pt와 포토레지스트와의 선택비는 0.4와 0.2를 나타내었다.

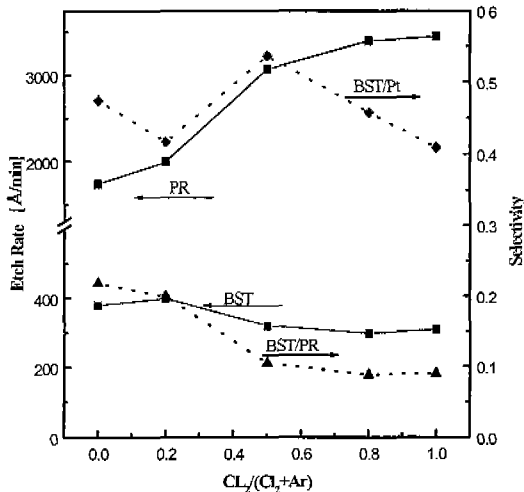


그림 1. Cl₂/Ar의 가스 혼합비에 따른 (Ba,Sr)TiO₃ 박막의 식각률 및 선택비.

Fig. 1. Etch rate and selectivity of (Ba,Sr)TiO₃ as a function of Cl₂/Ar gas mixing ratio.

BST의 식각에서 Cl₂와의 화학적 작용을 조사하기 위하여 XPS 분석을 수행하였다. 그림 2는 Cl₂/Ar의 가스 혼합비에 따른 XPS wide scan을 나타낸 것이다. Ba 피크(peak)는 약 780 eV에서 나타나고 있으며, Ti와 Sr 피크는 458 eV와 135 eV 근처에서 관찰할 수 있다. Cl₂의 혼합비가 증가함에 따라 Ba-Cl의 화합물의 생성으로 Ba 피크가 증가함을 알 수 있다. 또한 Cl과의 반응으로 인하여 Cl₂와 Ar의 혼합가스와 Cl₂의 조건에서는 Cl 2p의 피크를 200 eV에서 관찰할 수 있다.

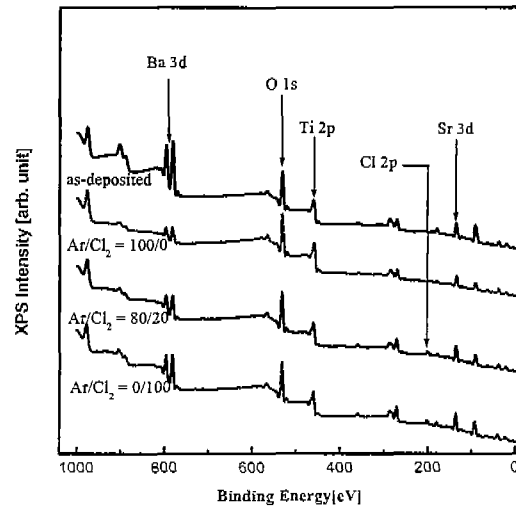


그림 2. Cl₂/Ar의 가스 혼합비에 따른 (Ba,Sr)TiO₃ 박막 표면의 XPS wide scan 스펙트럼.

Fig. 2. XPS wide scan spectra of the etched (Ba,Sr)TiO₃ films function of Cl₂/Ar gas mixing ratio.

표 2는 각각의 가스 혼합비에 따라 식각된 BST 박막 표면의 상대적인 원소 비율을 나타낸 것이다. BST 박막 표면에서 Ba와 Sr의 원소 비율은 Ar 가스의 식각에서 가장 작은 수치를 나타내고 있는데, 이것은 이 원소들의 식각은 Cl 라디칼에 의한 화학적 식각보다 Ar 이온에 의한 스퍼터링이 더욱 효과적임을 의미한다. 반면에 Ti 원소의 경우는 Cl₂/Ar의 가스 혼합비가 증가함에 따라 원소 비율은 감소하게 된다. Ti 원소는 식각중에 Cl 원소와 결합하여 TiCl_x 형태의 화합물을 형성하게 되고, 이것은 상대적으로 낮은 비등점(TiCl₄ : 136.45 °C)을 가지고 있어서 쉽게 제거된다. 식각 가스내의 Cl₂ 가스 혼합비가 증가함에 따라 O의 원소 비율은 감소하고, Cl

의 원소 비율은 증가한다. 이것은 Ba-O 또는 Ti-O 형태의 결합이 플라즈마 내에서 형성된 이온 충격에 의해 끊어지고 Ba과 Ti는 Cl과 결합하여 BST 박막의 표면에 남기 때문이다.

표 2. Cl₂/Ar의 가스 혼합비에 따른 (Ba,Sr)TiO₃ 박막 표면의 상대적인 원소 비율.

Table 2. The atomic percentage of (Ba,Sr)TiO₃ surface etched with Cl₂/Ar gas mixing ratio.

Atom Etch Gas	Ba	Sr	Ti	O	Cl
As-deposited	16.7	8.8	14.7	60.0	0
Ar only	6.2	6.7	19.3	67.8	0
Ar/Cl ₂ = 8/2	7.0	9.7	15.9	63.3	4.1
Cl ₂ only	8.4	9.9	14.2	60.0	4.8

더욱 정확한 Cl과 Ba, Sr, Ti의 화학적 결합을 분석하기 위하여 Cl₂/Ar의 가스 혼합비에 따라 XPS narrow scan 분석을 수행하였다. 그림 3은 Ba-O와 Ba-Cl의 피크로 분리된 Ba 3d 피크를 나타낸다. (1)과 (2) 피크에서 보는바와 같이 Ba-O (3d_{3/2})와 Ba-O (3d_{5/2}) 피크는 794.3 eV와 778.9 eV에 나타난다. Cl₂/Ar의 가스 혼합비가 증가함에 따라 Ba-Cl(3d_{3/2})와 Ba-Cl (3d_{5/2})에 의한 결합은 792.2 eV와 781.6 eV에서 나타난다. 식각된 BST 박막들 중에 스펙트럼 (4)의 Ba-O와 Ba-Cl 피크가 Ar 가스가 첨가된 조건들 보다 높게 나타났다. 이것은 Ba의 화합물의 식각은 Cl 라디칼에 의한 화학적인 반응보다는 Ar 이온의 충격에 의존한다는 것을 보이고 있다. Ba-Cl의 화합물은 높은 비등점(1560 °C)을 가지고 있어 표면에 잔류물로서 남게 된다. 그림 4는 Sr 3d의 XPS narrow scan 스펙트럼을 나타낸 것이다. Sr-O (3d_{3/2})와 Sr-O (3d_{5/2})의 결합 피크를 136.9 eV와 135.2 eV에서 각각 관찰할 수 있다. Sr과 Cl의 화학반응은 어렵기 때문에 피크들의 화학적

이동현상은 거의 나타나지 않는다. 이것으로 식각중에 Sr은 Cl 라디칼과 거의 반응하지 않고 거의 Ar의 충격효과에 의해서 식각됨을 알 수 있다. Ti 2p의 스펙트럼을 그림 5에 나타내었다. Ti-O의 피크는 Cl₂ 가스가 첨가함에 따라 Cl과의 화학적 반응에 의하여 0.6 eV 정도의 높은 결합 에너지(binding energy)로 이동하였다. [11] Cl₂의 가스 혼합비가 증가함에 따라 Ti 2p 피크가 감소하는 것은 BST 박막에서 Ti 원소는 화학적 반응에 의하여 식각됨을 알 수 있다. Cl 2p의 XPS narrow scan 스펙트럼을 그림 6에 나타내었다. 화학반응이 없는 Cl 2p 스펙트럼은 Cl (2p_{3/2})과 Cl (2p_{1/2})의 두 가지 피크로 나눌 수 있다. 그러나 식각된 BST박막에는 다른 원소의 결합에 의한 피크가 합성되어 있다. 그림 6의 (1)과 (2)의 스펙트럼은 Cl-Cl, Ti-Cl과 Ba-Cl의 3가지 화학적 구성요소로 나누어진다. Cl (2p_{3/2})과 Cl (2p_{1/2})의 피크는 198.7 eV와 200.4 eV에 각각 분포되어 있으며, Ba-Cl과 Ti-Cl의 결합으로 발생한 피크들은 202.5 eV와 199.85 eV에 분포되어 있다. 이것으로 Ba-Cl과 Ti-Cl의 결합을 다시 확인할 수 있었다.

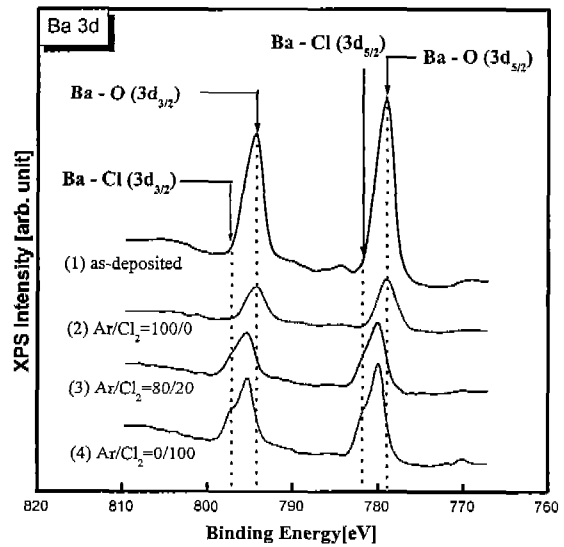


그림 3. Cl₂/Ar의 가스 혼합비에 따른 (Ba,Sr)TiO₃ 박막 표면의 Ba 3d XPS narrow scan 스펙트럼.

Fig. 3. Ba 3d XPS narrow scan spectra of (Ba,Sr)TiO₃ surface etched under Cl₂/Ar gas mixing ratio.

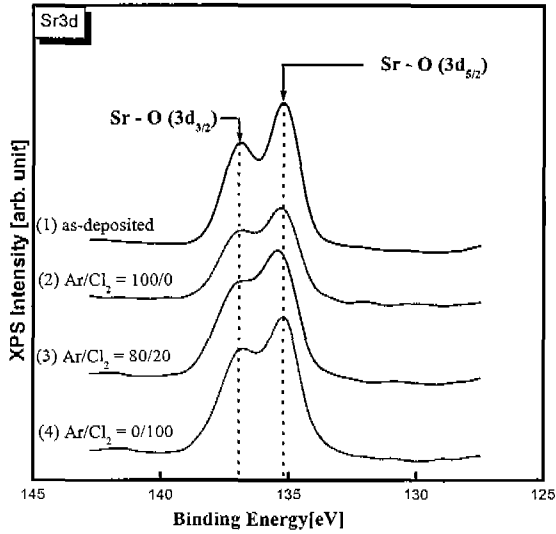


그림 4. Cl₂/Ar의 가스 혼합비에 따른 (Ba,Sr)TiO₃ 박막 표면의 Sr 3d XPS narrow scan 스펙트럼.

Fig. 4. Sr 3d XPS narrow scan spectra of (Ba,Sr)TiO₃ surface etched under Cl₂/Ar gas mixing ratio.

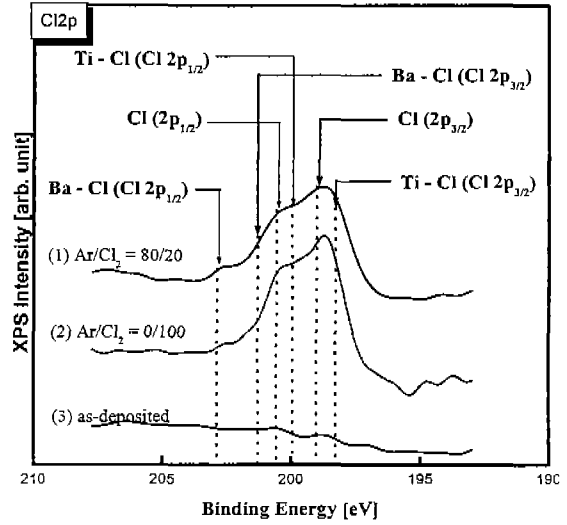


그림 6. Cl₂/Ar의 가스 혼합비에 따른 (Ba,Sr)TiO₃ 박막 표면의 Cl 2p XPS narrow scan 스펙트럼.

Fig. 6. Cl 2p XPS narrow scan spectra of (Ba,Sr)TiO₃ surface etched under Cl₂/Ar gas mixing ratio.

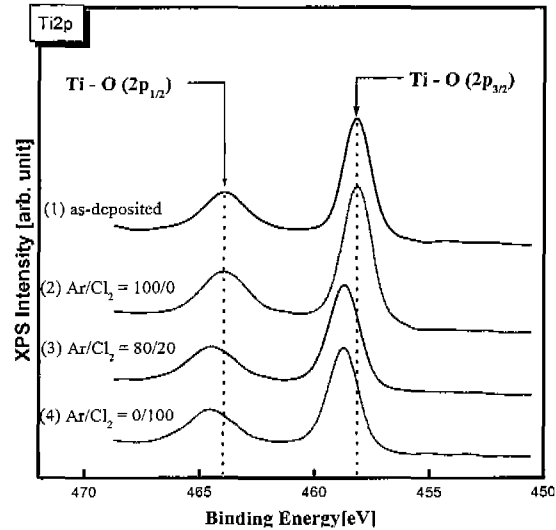


그림 5. Cl₂/Ar의 가스 혼합비에 따른 (Ba,Sr)TiO₃ 박막 표면의 Ti 2p XPS narrow scan 스펙트럼.

Fig. 5. Ti 2p XPS narrow scan spectra of (Ba,Sr)TiO₃ surface etched under Cl₂/Ar gas mixing ratio.

그림 7은 Cl₂/Ar의 가스 혼합비에 따른 BST 박막의 AFM 이미지를 보여준다. 각각 (a) as-deposited, (b) Cl₂/Ar = 0/100, (c) Cl₂/Ar = 20/80과 (d) Cl₂/Ar = 100/0의 조건을 나타낸다. 그림 7(a)에서 알 수 있는바와 같이 식각전 BST 박막의 표면에는 많은 그레인(grain)이 존재하고 있으며, rms(root mean square) 거칠기는 8.6 nm를 나타낸다. Cl₂/Ar의 가스 혼합비가 증가함에 따라 식각된 BST 박막 표면의 rms 거칠기는 3.6 nm에서 2.8 nm로 감소하였다. Ar 100%의 가스로 식각하였을 경우 가장 높은 rms 거칠기를 보여주는데, 이것은 Ar 이온에 의한 충격효과와 이것으로 발생하는 입자들의 재증착 때문이다. Cl₂의 가스 혼합비가 증가함에 따라 앞의 XPS 분석에서 보인바와 같이 Cl 라디칼과 결합한 Ba-Cl, Ti-Cl 형태의 잔유물이 발생하고 이것은 BST 박막의 그레인 사이에 재 증착하게 된다. 이것은 박막 표면의 거칠기를 감소시킨다.

플라즈마 식각시 BST 박막에 발생하는 결합을 분석하기 위하여 XRD를 이용하여 식각 전후의 결정성을 관찰하였다. 그림 8은 Cl₂/Ar의 가스 혼합비에 따른 BST 박막의 XRD 2θ 패턴을 나타낸다. 식각전의 BST 박막에서는 (100) 회절 피크가 강하게 나타나

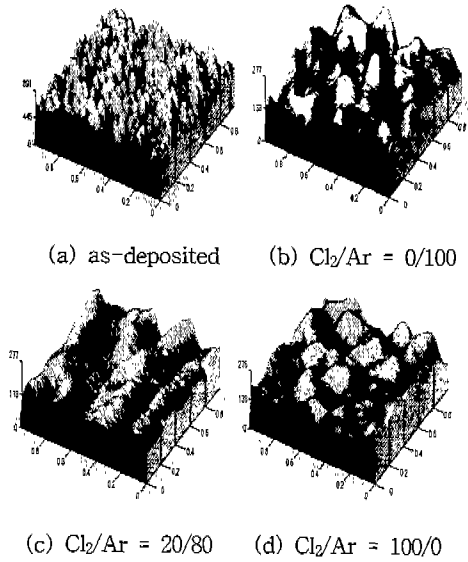


그림 7. Cl_2/Ar 의 가스 혼합비에 따른 $(Ba,Sr)TiO_3$ 박막의 AFM 이미지 (a) As-Deposited, (b) $Cl_2/Ar = 0/100$, (c) $Cl_2/Ar=20/80$, (d) $Cl_2/Ar = 100/0$.

Fig. 7. AFM images for the etched $(Ba,Sr)TiO_3$ film under Cl_2/Ar gas mixing ratio (a) As-Deposited, (b) $Ar/Cl_2 = 100/0$, (c) $Ar/Cl_2 = 80/20$, (d) $Ar/Cl_2 = 0/100$.

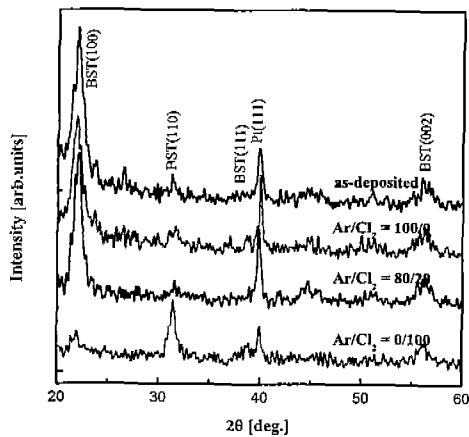


그림 8. Cl_2/Ar 의 가스 혼합비에 따른 $(Ba,Sr)TiO_3$ 박막의 XRD 스펙트럼.

Fig. 8. XRD spectra of the etched $(Ba,Sr)TiO_3$ film as function of Cl_2/Ar gas mixing ratio.

고 있다. Ar 플라즈마와 $Cl_2(20)/Ar(80)$ 의 가스 혼합비에서 $(Ba,Sr)TiO_3$ 박막을 식각한 경우는 (100) 피크가 다소 감소하지만, 전체적인 피크의 분포는 변하지 않음을 관찰할 수 있다. 그러나 Cl_2 플라즈마를 이용하여 식각하였을 경우, BST 박막 표면의 (100) 피크는 현저히 감소하였고 BST (110) 피크는 증가하여 원래의 결정성은 없어지고 비정질의 BST 박막으로 변화하였다. 이것은 식각시 BST 박막과 Cl이 결합한 비휘발성의 $BaCl_x$ 과 $TiCl_x$ 의 화합물이 형성하여 표면에 재 증착되어, BST 박막 표면의 결정성을 바꾸기 때문이다.

4. 결론

Cl_2/Ar 플라즈마를 이용한 BST 박막의 최대 식각률은 $400 \text{ \AA}/\text{min}$ 이었고, Pt와 포토레지스트에 관한 선택비는 0.4와 0.2이었다. 식각된 BST 박막 표면의 화학반응은 XPS를 이용한 분석으로 연구하였다. Ba와 Ti 원소의 경우 Cl_2 를 이용한 식각에서 Cl 라디칼과 결합하여 화합물을 만들어 Ba-O, Ti-O의 결합을 분리하여 Ba-Cl, Ti-Cl의 화합물을 생성한다. 그러나 Ba-Cl의 경우는 높은 비등점으로 표면에 식각 부산물로 남았다. Sr은 Cl 라디칼과 거의 반응을 하지 않고 Ar 이온에 의한 스퍼터링으로 식각되었다. XPS의 분석을 통하여 Ba-Cl과 Ti-Cl의 결합으로 생성된 부산물이 높은 비등점으로 표면에 남아있음을 확인하였다. AFM에 의하여 나타난바와 같이 Cl_2/Ar 의 가스 혼합비가 증가함에 따라 비휘발성의 식각 부산물들이 표면의 그레인 사이에 재증착하여 표면의 rms 거칠기는 감소하였고, Cl_2 100%의 플라즈마에서 2.8 nm 로 가장 낮은 수치를 나타내었다. 또한 Cl_2 를 이용하여 식각하였을 경우, (100) 방향의 피크가 현저히 감소하여 결정성을 변하는 것을 XRD를 통하여 관찰하였다. 이것은 식각중에 Cl의 화합물이 식각된 BST 박막 표면에 재증착되어 박막의 결정성에 결합을 발생시키는 것으로 확인되었다.

참고 문헌

[1] 류정선, 강성준, 윤영섭, "ULSI DRAM의 capacitor 절연막용 BST(Barium Strontium Titanate)박막의 제작과 특성에 관한 연구", 전기전자재료학회지, 9권 4호, pp.336-343 1996.

[2] 김창일, 김동표, 민병준, "강유전체 및 전극 재

- 료의 식각 기술 동향”, 전기전자재료, 13권 4호, pp.33-38, 2000.
- [3] Seung-Bum Kim, Chang-Il Kim, Eui-Goo Chang, and Guen-Young Yeom, "Study on surface reaction of (Ba,Sr)TiO₃ thin films by high density plasma etching", J. Vac. Sci. Tech. A 17, pp. 2156-2161, 1999.
- [4] 김창일, 권광호, "ICP에 의한 BCl₃/Cl₂ 플라즈마 내에서 Pt 박막의 식각 특성", 전기전자재료 학회논문지, 11권 10호, pp.804-808, 1998.
- [5] Seung-Bum Kim, Yong-Hyuk Lee, Tae-Hyung Kim, Geun-Young Yeom, and Chang-Il Kim, "Etch mechanism of (Ba,Sr)TiO₃ films in high density Cl₂/BCl₃/Ar plasma", J. Vac. Sci. Tech. A 18, pp. 1381-1384, 2000.
- [6] D. S. Wu, F. C. Liao, N. H. Kuo, R. H. Horng, and M. K. Lee, "Etching Characteristics and Mechanism of Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO₃ Thin Films in an Inductively coupled Plasma", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 39, Part 1, No. 4B, pp. 2068-2072, 2000.
- [7] S. J. Fonash, "Plasma processing damage in etching and deposition", IBM J. Res. Develop., Vol. 43, pp. 103-107, 1999.
- [8] S. J. Fonash, R. Singh, A. Rohatgi, P. Rai-Choudhury, P. J. Caplan, and E. H. Poindexter, "Silicon damage caused by CCl₄ reactive ion etching: Its characterization and removal by rapid thermal annealing", J. Appl. Phys., Vol. 58, pp. 862-866, 1985.
- [9] I. W. Wu, R. A. Street, and J. C. Mikkelsen, Jr., "Damage to shallow n⁺/p and p⁺/n junctions by CHF₃+CO₂ reactive ion etching", J. Appl. Phys., Vol. 63, pp. 1628-1635, 1986.
- [10] S. W. Pang, D. D. Rathman, D. J. Silversmith, R.W. Mountain, and P. D. DeGraff, "Damage induced in Si by ion milling or reactive ion etching", J. Appl. Phys., Vol. 54, pp. 3272-3277, 1983.
- [11] Hand Book of X-ray Photoelectron Spectroscopy, edited by J. Chastain (Perkin Elmer), p. 72, 1992.